UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Tatjana D. Miljković

OBJEKTIVNA I PERCEPTIVNA KARAKTERIZACIJA TONA I TONSKIH INTERVALA GENERISANIH MUZIČKIM INSTRUMENTIMA

doktorska disertacija

Beograd, 2025.

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Tatjana D. Miljković

OBJECTIVE AND PERCEPTUAL CHARACTERIZATION OF TONE AND TONE INTERVALS GENERATED BY MUSICAL INSTRUMENTS

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2025

Mentor:

dr DRAGANA ŠUMARAC PAVLOVIĆ, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

dr JELENA ĆERTIĆ, vanredni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr DRAGOMIR EL MEZENI, docent,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr DEJAN ĆIRIĆ, redovni profesor,
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

ZAHVALNICA

Dugujem zahvalnost profesorkama Dragani Šumarac Pavlović i Jeleni Ćertić, kao i profesoru Milošu Bjeliću, za podršku i doprinos mom dosadašnjem naučnom putu i izradi ove doktorske disertacije. Posebno se zahvaljujem svojoj mentorki, prof. Dragani Šumarac Pavlović, na prepoznavanju moje sklonosti ka interdisciplinarnom istraživanju i podsticanju prožimanja duha muzike i tehničke akustike. Profesorki Jeleni Ćertić iskreno zahvaljujem na nesebičnoj podršci i pomoći u realizovanju svih istraživačkih zamisli. Zahvaljujem se profesoru Milošu Bjeliću na podsticajnim, konstruktivnim diskusijama koje su unapredile ovu disertaciju, kao i na poverenju u moje istraživačke kapacitete, posebno u trenucima moje sopstvene sumnje. Čast mi je i privilegija što sam prihvaćena kao ravnopravan član vašeg istraživačkog tima.

Roditeljima, ocu Draganu i majci Ljiljani, dugujem najdublju zahvalnost za neprekidnu podršku tokom celokupnog školovanja i izrade ove doktorske disertacije. Ovaj rad posvećujem njima.

Subjektivni testovi u doktorskoj disertaciji realizovani su u prostorijama Palate nauke, Zadužbini Miodraga Kostića.

Naslov teze: Objektivna i perceptivna karakterizacija tona i tonskih intervala generisanih muzičkim instrumentima

Rezime – Osnovni element muzičkog signala je ton koji ima specifične vremenske i spektralne karakteristike. Postoji veliki broj karakteristika muzičkih tonova kojima se opisuje perceptivni kvalitet muzičkog zvuka sa aspekta slušaoca kao prijemnika takvih informacija. Istraživanje u ovoj disertaciji obuhvata tri instrumenta iz grupe žičanih muzičkih instrumenata: klavir, čembalo i harfu. Iako razlike među njima postoje sa aspekta mehanike pobude, konstrukcije, materijala, fenomen koji je zajednički za sva tri instrumenta je inharmoničnost. Inharmoničnost predstavlja odstupanje frekvencija parcijala tona od celobrojnog umnoška osnovne frekvencije tona. Ovaj fenomen vezan je isključivo za žičane instrumente, jer nastaje kao posledica krutosti žice. Nelinearna sprega transverzalnih i longitudinalnih vibracija u žicama i telu instrumenta dovodi do pojave spektralnih artefakata poznatih kao fantomski parcijali. Usled prisustva inharmoničnosti njihove frekvencije se ne poklapaju sa frekvencijama transverzalnih oscilacija, već se nalaze u njihovoj neposrednoj okolini. Osnovna ideja disertacije jeste objektivna karakterizacija tonova žičanih muzičkih instrumenata kroz prizmu inharmoničnosti i razmatranje njenih perceptivnih posledica.

Za potrebe istraživanja izvršeno je snimanje tonova klavira, čembala i harfe u celokupnom frekvencijskom opsegu od interesa. S obzirom na količinu podataka zahtevana je njihova dobra organizacija i sistematizacija, zbog čega je izrađen repozitorijuma za skladištenje audio signala kao portal sa otvorenim pristupom.

Objektivna karakterizacija tona predstavlja estimaciju koeficijenta inharmoničnosti iz tonova klavira, čembala i harfe. Pokazano je da postojeći algoritmi za procenu koeficijenta inharmoničnosti ne daju preciznu vrednost jer ne isključuju fantomske parcijale iz procesa estimacije. Sa tim ciljem, u okviru disertacije predložena je modifikacija algoritma koja se zasniva na detekciji i eliminaciji fantomskih parcijala. Verifikacija modifikacije izvršena je nad setom sintetisanih signala harfe kod kojih je kontrolisano varirana pozicija i broj fantomskih parcijala, kao i koeficijent inharmoničnosti. Sprovedena je i validacija poređenjem procenjenih koeficijenata inharmoničnosti iz realnih signala sa vrednostima teorijskog modela zasnovanog na fizičkim parametrima žice. Na osnovu estimacije koeficijenta inharmoničnosti predloženom modifikacijom algoritma ustanovljeno je da je na osnovu koeficijenta inharmoničnosti moguće izvršiti distinkciju među žičanim instrumentima.

Za potrebe objektivne i perceptivne karakterizacije muzičkih tonova i intervala u okviru disertacije razvijena je i aplikacija za digitalnu obradu muzičkih signala. Aplikacija je dizajnirana tako da je u njoj moguće vršiti analizu i sintezu signala. Okosnica aplikacije je dvostruko komplementarna filtarska banka sa faznom korekcijom koja omogućava idealnu rekonstrukciju. Uz pomoć aplikacije sintetisani su test signali za subjektivne testove metodom aditivne sinteza sa pridodatim atributima.

Perceptivna karakterizacija tonova i intervala muzičkih instrumenata izvršena je kroz dva subjektivna testa. Kroz prvi subjektivni test ispitivana je prirodnost prethodno predložene metode sinteze. Cilj takvog testa je izbor najverodostojnije sinteze realnom tonu, kako bi fokus drugog subjektivnog testa bio isključivo na uticaju inharmoničnosti na percepciju intervala. Drugim subjektivnim testom ispitivan je uticaj inharmoničnosti na konsonantnost, odnosno disonantnost intervala muzičkih instrumenata. Time se zaokružuje istraživački tok doktorske disertacije.

Ključne reči: fantomski parcijali, filtarska banka, inharmoničnost, muzički intervali, sinteza muzičkih signala, subjektivni test, žičani instrumenti.

Naučna oblast: Elektrotehnika

Uža naučna oblast: Akustika

UDK broj: 621.3

Dissertation title: Objective and perceptual characterization of tones and tonal intervals generated by musical instruments

Summary – The basic element of a musical signal is the tone, which has specific temporal and spectral characteristics. Numerous features of musical tones are used to describe the perceptual quality of musical sound from the listener's standpoint as the receiver of such information. The research in this dissertation covers three instruments from the family of string instruments: the piano, the harpsichord, and the harp. Although differences among them exist in terms of excitation mechanics, construction, and materials, the phenomenon common to all three is inharmonicity. Inharmonicity denotes the deviation of a tone's partial frequencies from integer multiples of the tone's fundamental frequency. This phenomenon pertains exclusively to string instruments, as it arises from string stiffness. Nonlinear coupling of transverse and longitudinal vibrations in the strings and the instrument body gives rise to spectral artefacts known as phantom partials. Due to inharmonicity, their frequencies do not coincide with those of the transverse oscillations, but lie in their immediate vicinity. The dissertation objectively characterizes string-instrument tones via inharmonicity and examines its perceptual consequences.

For the purposes of the research, recordings of piano, harpsichord, and harp tones were made across the entire frequency range of interest. Given the amount of data, good organization and systematization were required, for which a repository for storing audio signals was created and implemented as an open-access portal.

Objective characterization of tone refers to estimating the inharmonicity coefficient from tones of the piano, harpsichord, and harp. It has been shown that existing algorithms for estimating the inharmonicity coefficient do not yield accurate values because they do not exclude phantom partials from the estimation process. To that end, the dissertation proposes a modification to the algorithm based on the detection and removal of phantom partials. The modification was verified on a set of synthesized harp signals in which the position and number of phantom partials, as well as the inharmonicity coefficient, were systematically varied. Validation was also conducted by comparing the estimated inharmonicity coefficients from real signals with values predicted by a theoretical model based on the physical parameters of the string. Using the proposed estimation method, it was established that the inharmonicity coefficient can be used to differentiate among string instruments.

To support the objective and perceptual characterization of musical tones and intervals, a digital audio-signal-processing application was also developed within the dissertation. The application is designed to enable both analysis and synthesis of signals. Its backbone is a dual complementary filter bank with phase correction, enabling perfect reconstruction. Using the application, test signals for the subjective experiments were synthesized by means of additive synthesis, with assigned attributes.

Perceptual characterization of tones and intervals of musical instruments was carried out through two subjective tests. The first subjective test examined the naturalness of the previously proposed synthesis method. The aim was to select the synthesis that most faithfully matches a real tone, so that the focus of the second subjective test could be solely on the effect of inharmonicity on the perception of intervals. The second subjective test investigated the influence of inharmonicity on the consonance or dissonance of musical intervals. This completes the dissertation's research workflow.

Keywords: phantom partials, filter bank, inharmonicity, musical intervals, synthesis of musical signals, subjective test, stringed instruments.

Scientific area: Electrical engineering

Scientific subarea: Acoustics

UDK code: 621.3

Sadržaj:

1 UVOD 1

2 INHARMONIČNOST: FENOMENI, ALGORITMI I PERCEPTIVNE IMPLIKACIJE 4

2.1 OD IDEALNE DO KRUTE ŽICE: TALASNA JEDNAČINA I KOEFICIJENT INHARMONIČNOSTI 4
2.1.1. Idealna žica 4
2.1.2. Kruta žica 5
2.1.3. Koeficijent inharmoničnosti: Dosadašnja istraživanja 6
2.2 FANTOMSKI PARCIJALI 7
2.2.1. Mehanizam generisanja fantomskih parcijala 7
2.2.2. Uloga koeficijenta inharmoničnosti B 9
2.2.3. "Roditeljstvo" fantomskih parcijala 9
2.2.4. Dosadašnja istraživanja 10
2.3 METODE I ALGORITMI ZA PROCENU KOEFICIJENTA INHARMONIČNOSTI 11

3 O MUZIČKIM INSTRUMENTIMA: KLAVIR, ČEMBALO I HARFA 13

3.1 KLAVIR 13
3.1.1. Konstrukcija instrumenta 13
3.1.2. Mehanizam stvaranja zvuka 14
3.1.3. Klavir sa stanovišta signala 15
3.2 ČEMBALO 17
3.2.1. Konstrukcija instrumenta 17
3.2.2. Mehanizam stvaranja zvuka 19
3.2.3. Čembalo sa stanovišta signala 20
3.3 HARFA 21
3.3.1. Konstrukcija instrumenta 21
3.3.2. Mehanizam stvaranja zvuka 23
3.3.3. Harfa sa stanovišta signala 24
3.4 ZAKLJUČAK 26

4 ALGORITMI DIGITALNE OBRADE SIGNALA ZA ANALIZU I SINTEZU INHARMONIČNIH TONOVA 29

4.1 METODE ZA OBRADU I ANALIZU SIGNALA ŽIČANIH MUZIČKIH INSTRUMENATA 29
4.1.1. Vremenski zavisna Furijeova transformacija (STFT) 29
4.1.2. Dizajn digitalne filtarske banke 31
4.1.3. Procena obvojnice parcijala 34
4.1.4. Procena koeficijenta inharmoničnosti 35
4.2 ARHITEKTURA APLIKACIJE 36
4.2.1. Modul MuPI_S 37
4.2.2. Modul MuPI_B 38
4.2.3. Modul MuPI_A 41
4.3 ANALIZA PREDLOŽENOG KONCEPTA 43

5 SNIMANJE TONOVA MUZIČKIH INSTRUMENATA I REPOZITORIJUM ZA SKLADIŠTENJE SNIMAKA 48

5.1 SNIMANJE TONOVA MUZIČKIH INSTRUMENATA 48
5.2 KONCEPT PORTALA SA OTVORENIM PODACIMA 51
5.3 KORISNIČKI ZAHTEVI ZA REALIZACIJU SISTEMA 52
5.4 ARHITEKTURA SISTEMA I ORGANIZACIJA PRIVILEGIJA KORISNIKA 53
5.5 OPIS REALIZOVANOG PORTALA ZA AUDIO SNIMKE 55

6 KROZ PRIZMU KOEFICIJENTA INHARMONIČNOSTI: OBJEKTIVNA KARAKTERIZACIJA KLAVIRA, ČEMBALA I HARFE 59

6.1 PFD ALGORITAM 59
6.2 REZULTATI PFD ALGORITMA: KLAVIR, ČEMBALO I HARFA 60
6.2.1. Klavir 60
6.2.2. Čembalo 61
6.2.3. Harfa 62

6.2.4. Zaključak ... *62*
6.3 MODIFIKOVANI PFD ... 63
6.3.1. Opis algoritma ... *63*
6.3.2. Određivanje broja parcijala N ... *65*
6.3.3. Određivanje parametra Δf_p ... *66*
6.3.4. Verifikacija mPFD algoritma na skupu sintetisanih tonova ... *67*
6.3.4.1 Sinteza test signala ... 67
6.3.4.2 Uporedna analiza PFD i mPFD na sintetisanim signalima ... 70
6.4 UPOREDNA ANALIZA PFD I MPFD ALGORITAMA NA REALNIM SNIMCIMA ... 72
6.4.1. Klavir ... *72*
6.4.2. Čembalo ... *73*
6.4.3. Harfa ... *75*
6.5 VALIDACIJA PROCENE KOEFICIJENTA INHARMONIČNOSTI: PFD I MPFD U ODNOSU NA TEORIJSKI MODEL ... 77
6.6 FIZIČKA INTERPRETACIJA OBRAZACA ZA IZRAČUNAVANJE KOEFICIJENTA INHARMONIČNOSTI *B* ... 80
6.7 ZAKLJUČAK ... 81

7 PERCEPTIVNI EFEKTI INHARMONIČNOSTI: PRIRODNOST SINTEZE I KONSONANTNOST INTERVALA ... 83

7.1 SUBJEKTIVNA EVALUACIJA PRIRODNOSTI METODA SINTEZE MUZIČKIH TONOVA SA IZRAŽENOM INHARMONIČNOŠĆU ... 83
7.1.1. Dizajn stimulusa ... *84*
7.1.2. Formiranje seta stimulusa za subjektivni test ... *86*
7.1.3. Procedura i učesnici subjektivnog testa ... *87*
7.1.4. Analiza rezultata subjektivnog testa ... *87*
7.1.4.1 Ispitivanje kredibiliteta slušača ... 87
7.1.4.2 Zavisnost rezultata testa od reprodukovanog sadržaja ... 88
7.1.4.3 Rangiranje sinteza prema rezultatima subjektivnog testa ... 88
7.1.4.4 Korelacija subjektivnih i objektivnih ocena ... 90
7.1.5. Zaključak ... *92*
7.2 UTICAJ INHARMONIČNOSTI NA KONSONANTNOST I DISONANTNOST INTERVALA: OBJEKTIVNA I SUBJEKTIVNA PROCENA NA TONOVIMA HARFE I ČEMBALA ... 92
7.2.1. Objektivna karakterizacija intervala ... *93*
7.2.1.1 Kriva disonantnosti ... 93
7.2.1.2 Kritični opsezi ... 97
7.2.2. Subjektivni test ... *101*
7.2.2.1 Formiranje seta stimulusa za subjektivni test ... 101
7.2.2.2 Procedura i učesnici subjektivnog testa ... 103
7.2.2.3 Rezultati subjektivnog testa ... 103
7.3 ZAKLJUČAK ... 108

8 ZAKLJUČAK ... 110

8.1 NAUČNI DOPRINOSI ... 112
8.2 BUDUĆA ISTRAŽIVANJA ... 113

9 LITERATURA ... 114

10 PRILOZI ... 122

1 Uvod

Muzika predstavlja umetnost stvaranja uređenih odnosa između tonova. Tok muzičkog dela, prema utemeljenim načelima kontrapunkta i harmonije, čini smenjivanje konsonantnih i disonantnih intervala. Konsonantni intervali uspostavljaju stabilne tačke tonaliteta i čine osnove akorada, dok disonantni intervali napetošću i perceptivnom nelagodnošću pokreću razvoj muzičke misli. Kao i svaka misaona celina, i muzička ideja teži zaokruženju, iz nestabilne disonance razrešava se konsonancom. Da bi se proniklo u suštinu biti konsonance i disonance i šta je to što ih razdvaja na perceptivnoj skali, neophodno je razmatrati intervale sa gradivnog nivoa. Gradivni deo intervala kao kreatora toka muzičke misli jeste ton. Sa tim motivom, u ovoj doktorskoj disertaciji sprovedena je objektivna i perceptivna karakterizacija tonova i tonskih intervala muzičkih instrumenata.

Objektivna i perceptivna karakterizacija tonova muzičkih instrumenata predstavlja dve velike celine u naučno-istraživačkom smislu koje su uzročno-posledično povezane. Kako se kroz temu ove doktorske disertacije prožimaju grane oblasti muzičke akustike i digitalne obrade signala, muzički instrumenti su kako objektivno, tako i perceptivno okarakterisani na osnovu njihovih signala. Korpus istraživanja predstavljaju tri instrumenta iz grupe žičanih muzičkih instrumenata, odnosno klavir, čembalo i harfa. Motivacija za izbor instrumenata utkana je u činjenici da pripadaju različitim podgrupama žičanih muzičkih instrumenata formiranih prema mehanizmu generisanja zvuka. Iako evidentne razlike među njima postoje, sa aspekta mehanike pobude, konstrukcije, materijala (kako tela instrumenata, tako i žica), fenomen koji je zajednički za sva tri instrumenta je inharmoničnost.

Inharmoničnost predstavlja odstupanje frekvencija parcijala tona od celobrojnog umnoška osnovne frekvencije tona. Ovaj fenomen vezan je isključivo za žičane instrumente, jer nastaje kao posledica krutosti žice. Uticaj inharmoničnosti ne svodi se samo na poziciju frekvencija transverzalnih oscilacija žice. Žičani instrumenti su složeni sistemi u kojima međusobno deluju žice i rezonantno telo. Nelinearna sprega transverzalnih i longitudinalnih vibracija u žicama i telu instrumenta dovodi do pojave spektralnih artefakata poznatih kao fantomski parcijali. Usled prisustva inharmoničnosti njihove frekvencije se ne poklapaju tačno sa frekvencijama transverzalnih oscilacija, već se nalaze u njihovoj neposrednoj okolini. Imajući to u vidu inharmoničnost predstavlja fenomen koji se ne može posmatrati samostalno, već uz pratnju fantomskih parcijala i drugih karakteristika tona poput osnovne frekvencije i broja parcijala.

Jedan od važnih aspekta inharmoničnosti, jeste njen uticaj na percepciju zvuka instrumenata. Istraživanja koja su do sada sprovedena baziraju se na tonovima klavira i govore o uticaju inharmoničnosti na perceptivne osobine tonske visine, muzičkih intervala, kao i ukupni kvalitet zvuka. Imajući u vidu perceptivne implikacije, inharmoničnost se smatra fenomenom koji je nezaobilazan i pri sintezi tonova žičanih instrumenata.

Sa ciljem povezivanja objektivnih i perceptivnih karakteristika tonova i intervala, kroz prizmu inharmoničnosti i njenih posledica, u ovoj tezi sprovedena su tri istraživačka pravca. Prvi istraživački pravac odnosi se na estimaciju koeficijenta inharmoničnosti iz realnih tonova klavira, čembala i harfe. S obzirom da je inharmoničnost fenomen sa mnogo posledica u spektru, razvijen je algoritam za estimaciju koeficijenta inharmoničnosti uz uvažavanje fantomskih parcijala. Time je omogućena celovita i preciznija estimacija. Kako bi razvijani algoritam imao odlike automatizovane procedure, razvijena je i pomoćna aplikacija za analizu i sintezu muzičkih signala. Ideja aplikacije je da pruži analizu, sintezu i brze provere pomenutih fenomena, zarad lakše automatizacije algoritma.

Drugi istraživački pravac odnosi se na sintezu tonova žičanih muzičkih instrumenata. Kako bi se povezala saznanja objektivne analize tonova instrumenata sa njihovim perceptivnim implikacijama, neophodno je razviti metod sinteze koji će podražavati obrasce ustanovljene objektivnom analizom. Primarni zadatak ovog istraživačkog pravca jeste razvijanje što verodostojnije sinteze realnom tonu

instrumenta, ali sa mogućnošću jednostavne kontrole parametara procenjenih objektivnom analizom. Kao i u procesu razvoja algoritma za estimaciju koeficijenta inharmoničnosti, tako i u procesu razvoja sinteze korišćena je aplikacija radi lakšeg i sveobuhvatnijeg sagledavanja fenomena tonova muzičkih instrumenata. Krajnji ishod istraživanja, predstavlja adekvatna sinteza koja će omogućiti sprovođenje subjektivnih testova i time formirati most između objektivnih nalaza i njihovih perceptivnih posledica.

Treći istraživački pravac fokusira se na perceptivne efekte inharmoničnosti. Kroz dva komplementarna subjektivna testa sprovedena je perceptivna karakterizacija tonova i intervala muzičkih instrumenata. Najpre je, prvim subjektivnim testom, ispitivana prirodnost prethodno predložene metode sinteze. Motivacija takvog testa je izbor najverodostojnije sinteze realnom tonu, kako bi fokus drugog subjektivnog testa bio isključivo na uticaju inharmoničnosti na percepciju intervala. Drugim subjektivnim testom ispitivan je uticaj inharmoničnosti na konsonantnost, odnosno disonantnost intervala muzičkih instrumenata. Time se zaokružuje istraživački tok doktorske disertacije.

U skladu sa pomenutim istraživačkim pravcima formirana su poglavlja doktorske disertacije. U drugom poglavlju detaljno su objašnjeni pojam inharmoničnosti i fizički uzroci njenog nastanka. Posebno je razjašnjen mehanizam generisanja fantomskih parcijala. Prikazana su dosadašnja istraživanja u oblasti fizičkog modelovanja mehaničkih vibracija u žicama i telu instrumenta, kao i istraživanja perceptivnih posledica na različite atribute kojima se opisuju muzički tonovi i intervali. Koeficijent inharmoničnosti, kao parametar koji kvantifikuje fenomen inharmoničnosti, obrađen je sa stanovišta algoritama za njegovu automatsku estimaciju iz snimljenih signala.

U trećem poglavlju detaljnije su predstavljeni klavir, čembalo i harfa kao reprezentativni žičani instrumenti kod kojih su istovremeno prisutni inharmoničnost i fantomski parcijali. Predstavljene su razlike u načinu pobude, konstrukcionim rešenjima i materijalima (telo instrumenta, tip i dimenzije žica) ova tri instrumenta, sa ciljem prikaza njihovog sistematskog uticaja na promenu koeficijenta inharmoničnosti duž frekvencijskog opsega, kao i na izraženost fantomskih parcijala. Svakom instrumentu posvećeno je posebno potpoglavlje organizovano u tri celine u kojima se obrađuju konstrukcija i materijali, sa naglaskom na relevantne mehaničke i akustičke parametre, mehanizam generisanja zvuka i specifičnosti pobude, kao i struktura vremenskih obvojnica reprezentativnih tonova i njihovih parcijala. Ovakva struktura poglavlja omogućava uporedno sagledavanje uticaja mehanike pobude i konstrukcije na inharmoničnost i pojavu fantomskih parcijala kod tri različita tipa žičanih instrumenata.

U četvrtom poglavlju opisan je razvoj aplikacije MuPI (***Mu**sical Signal **P**rocessing with Prominent **I**nharmonicity*) koja predstavlja most između objektivne i perceptivne karakterizacije tonova. Prikazan je dizajn dvostruko komplementarne filtarske banke sa faznom korekcijom, koja predstavlja okosnicu aplikacije. U okviru poglavlja opisane su funkcionalnosti tri modula aplikacije, koja prate razvoj istraživačkih tema disertacije. Aplikacija omogućava: inicijalnu segmentaciju i vizualizaciju signala, procenu parametara signala i dizajn filtarske banke, dekompoziciju signala, aproksimaciju obvojnica parcijala, kontrolisanu sintezu i rekombinaciju signala.

Kao osnov za sprovedena istraživanja u okviru disertacije izvršeno je snimanje tonova klavira, čembala i harfe u celokupnom frekvencijskom opsegu od interesa. S obzirom na količinu podataka zahtevana je njihova dobra organizacija i sistematizacija, zbog čega se javila potreba za izradom repozitorijuma za skladištenje audio signala. U poglavlju 5. prikazana je postavka i proces snimanja tonova instrumenata, kao i arhitektura i organizacija audio portala. Takođe, dato je uputstvo za način pristupa i korišćenja repozitorijuma.

U šestom poglavlju prikazana je objektivna karakterizacija analiziranih instrumenata sa aspekta inharmoničnosti tonova. Izloženi su rezultati estimacije koeficijenta inharmoničnosti na osnovu

Partial Frequency Deviation(PFD) algoritma predloženog u literaturi, na osnovu kojih je ustanovljeno da algoritam greši pri estimaciji usled izraženog prisustva fantomskih parcijala. Opisan je razvoj predložene modifikacije PFD algoritma, koja se odlikuje detekcijom i eliminacijom fantomskih parcijala iz procene koeficijenta inharmoničnosti. Predložena modifikacija sprovedena je tako da je moguće primeniti je na sva tri analizirana instrumenta. U okviru poglavlja data je i verifikacija modifikacije sprovedena nad setom sintetisanih signala harfe kod kojih je kontrolisano varirana pozicija i broj fantomskih parcijala, kao i koeficijent inharmoničnosti B. Sprovedena je i dodatna validacija modifikacije, poređenjem procenjenih koeficijenata inharmoničnosti iz realnih signala sa vrednostima teorijskog modela zasnovanog na fizičkim parametrima žice. Na osnovu estimacije koeficijenta inharmoničnosti predloženom modifikacijom PFD algoritma, ustanovljeno je da je na osnovu koeficijenta inharmoničnosti moguće izvršiti distinkciju među žičanim instrumentima. Time je pokazan značaj fenomena inharmoničnosti u tonovima žičanih muzičkih instrumenata.

U sedmom poglavlju prikazani su perceptivni efekti inharmoničnosti kroz dva komplementarna subjektivna testa. Samim tim poglavlje se može posmatrati kroz dve celine. Prva celina se bazira na dizajnu adekvatnog stimulusa za subjektivno testiranje. Prikazan je metod na osnovu kog su sintetisane četiri različite varijante stimulusa. Sprovedenim subjektivnim testom, u kojem je učestvovalo 46 ispitanika (sa i bez formalnog muzičkog obrazovanja), ispitivana je prirodnost predložene sinteze. Cilj ovog testa je da se ukloni neprirodan prizvuk sinteze, koji može prebaciti fokus ispitanika sa fenomena inharmoničnosti. U drugoj celini sedmog poglavlja, uz usvojenu metodu sinteze, ispitivan je uticaj inharmoničnosti na disonantnost intervala. Najpre je izvedena objektivna analiza utemeljena na teorijskim modelima krive disonantnosti i kritičnih opsega. Tim modelima se kvantifikuje uticaj inharmoničnosti na disonantnost, kao i uticaj položaja i međusobne interakcije parcijala tonova u okviru kritičnog opsega. Zatim je izvršeno subjektivno testiranje uticaja inharmoničnosti na disonantnost intervala na tonovima čembala i harfe sa 12 subjekata (sa formalnim muzičkim obrazovanjem). Diskutovana je korelacija rezultata objektivnih analiza disonantnosti intervala sa rezultatima subjektivnog testa.

U poslednjem, osmom poglavlju, rezimirani su ostvareni rezultati i izvedeni zaključci do kojih se došlo u istraživanjima prikazanim u disertaciji. Pored toga istaknuti su i ostvareni naučni doprinosi disertacije. Na kraju, date su smernice za buduća istraživanja i dalja unapređenja koja je moguće ostvariti u oblasti muzičke akustike.

2 Inharmoničnost: fenomeni, algoritmi i perceptivne implikacije

U ovom poglavlju, kroz pregled literature i dosadašnjih istraživanja, predstavljen je fenomen inharmoničnosti. Polazeći od talasnih jednačina, obrazloženi su uzroci njenog nastanka. Posebno je analiziran mehanizam generisanja fantomskih parcijala. Pokazano je da je izraženo prisustvo fantomskih parcijala neposredna posledica inharmoničnosti kod žičanih muzičkih instrumenata. Potom su izložene perceptivne implikacije inharmoničnosti i fantomskih parcijala, koje predstavljaju neposrednu motivaciju za razvoj postupaka za procenu koeficijenta inharmoničnosti. Na kraju je dat pregled postojećih algoritama, uz identifikaciju ograničenja i prostora za unapređenja, što predstavlja jedan od ključnih motiva ove disertacije.

2.1 Od idealne do krute žice: talasna jednačina i koeficijent inharmoničnosti

Poznato je još iz antičkog perioda stare Grčke da su Pitagorejci proučavali oscilacije žice razapete iznad drvene rezonantne kutije nazvane monokord. Menjajući efektivnu dužinu žice pomičnim pragom, uočili su da konsonantni intervali proističu iz celobrojnih odnosa dužina, odnosno 1:2 za oktavu, 2:3 za kvintu i 3:4 za kvartu [1]. Zatim se u XVIII veku na istraživanja vezana za oscilaciju žice nadovezuju dAlembert, Euler i Bernoulli [2], koji formalizuju model idealno fleksibilne žice pričvršćene na oba kraja. Model počiva na pretpostavkama malih otklona i konstantne tenzije, uz zanemarivanje krutosti i debljine žice. U takvim uslovima oscilacija žice se može opisati talasnom jednačinom čije rešenje vodi ka harmonijskom nizu, čiji se harmonici javljaju na celobrojnim umnošcima osnovne frekvencije žice [3]. Ovakav model predstavlja polaznu tačku za istraživanja lorda Rayleigh u XIX veku gde je pokazano da se žice muzičkih instrumenata ne mogu predstaviti tako jednostavnim modelom, već je neophodno uključiti i krutost [4]. Ta spoznaja dovela je do toga da se frekvencije dobijene oscilacijom žice više ne nalaze na celobrojnim umnošcima osnovne frekvencije žice. Fenomen odstupanja frekvencija parcijala od celobrojnih umnožaka osnovne frekvencije naziva se inharmoničnost. Pedesetih godina XX veka Young je na osnovu merenja sprovedenih na klaviru kvantifikovao fenomen, uveo koeficijent inharmoničnosti B i izveo analitičku vezu između frekvencija parcijala žice i koeficijenta inharmoničnosti B [5].

2.1.1. Idealna žica

Sa ciljem kvantifikacije prethodno navedenog istorijskog toka proučavanja oscilacija žice, najpre je analiziran problem talasne jednačine idealne žice učvršćene na oba kraja. Pretpostavimo idealnu žicu dužine L, uniformne tenzije T i linearne gustine μ. Transverzalni pomeraj žice $y(x,t)$ se može opisati sledećom talasnom jednačinom:

$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \qquad 2.1$$

Neka je rešenje talasne jednačine 2.1 u obliku $y(x,t) = e^{j(\omega t - kx)}$. Zamenom rešenja u jednačinu 2.1 dobija se:

$$\frac{\omega^2}{k^2} = c^2 \qquad 2.2$$

gde c predstavlja brzinu prostiranja transverzalnog talasa koja se može izraziti kao $c = \sqrt{T/\mu}$. Rešenje dato izrazom 2.2 pokazuje da idealna žica koja nije ograničena može oscilovati na proizvoljnoj ugaonoj frekvenciji ω, za koju važi da je odnos ugaone frekvencije i talasnog broja k konstantan i jednak brzini prostiranja talasa c.

Pretpostavimo da je žica dužine L ograničena između dva kraja x=0 i x=L. U tom slučaju rešenje jednačine 2.1 biće u obliku $y(x,t)=\Re\{Y(x)e^{j\omega t}\}$. Zamenom rešenja u jednačinu 2.1 dobija se:

$$\frac{d^2Y(x)}{dx^2}+\frac{\omega^2}{c^2}Y(x)=0 \qquad 2.3$$

Opšte rešenje jednačine 2.3 je oblika $Y(x)=A\cos(kx) + B\sin(kx)$, gde je $k=\omega/c$. S obzirom na to da je žica zategnuta na oba kraja, važe granični uslovi $Y(0)=Y(L)=0$. Iz uslova $Y(0)=0$ sledi da je $A=0$, dok drugi uslov dovodi do sledeće jednakosti $Y(L)=B\sin(kL)=0$. Na osnovu drugog uslova dobija se netrivijalno rešenje:

$$k_n=\frac{n\pi}{L}\Rightarrow\omega_n=c\frac{n\pi}{L} \qquad 2.4$$

Rešenje iskazano izrazom 2.4 govori o tome da u slučaju idealne žice koja je ograničena na dva kraja, žica može oscilovati samo na određenim ugaonim frekvencijama ω_n time stvarajući harmonijski niz.

2.1.2. Kruta žica

Kada se analizira prostiranje talasa kroz realnu žicu mora se uzeti u obzir i njena krutost. Talasna jednačina takve žice glasi:

$$\mu\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}=T\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}+ESK^2\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \qquad 2.5$$

Krutost žice definisana je sa ESK^2, gde je E Young-ov moduo elastičnosti, S predstavlja poprečni presek žice, a K^2 poluprečnik inercije preseka žice. U ovoj formulaciji zanemareni su drugi tipovi gubitaka kod realne žice, kao što su gubici usled trenja. Pretpostavimo isti oblik rešenja kao i za slučaj prostiranja talasa kroz idealnu žicu. Zamenom rešenja u talasnu jednačinu realne žice dobija se:

$$\omega^2=c^2k^2+\frac{ESK^2}{\mu}k^4 \qquad 2.6$$

Kao i kod idealne žice koja je učvršćena na oba kraja u tačkama $x=0$ i $x=L$ dobija se da su dozvoljeni samo diskretni talasni brojevi k_n (jednačina 2.4). Takva struktura rezonanci ostaje nepromenjena iako se u model uvedu gubici, disperzija, čak i spoljne pobude, te je moguće bez gubitka opštosti zameniti talasni broj dobijen jednačinom 2.4 u jednačinu 2.6. Time dobijamo sledeći izraz za kružnu frekvenciju žice:

$$\omega_n=\sqrt{c^2\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2+\frac{ESK^2}{\mu}\left(\frac{n\pi}{L}\right)^4}=c\frac{n\pi}{L}\sqrt{1+\frac{ESK^2}{T}\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2} \qquad 2.7$$

S obzirom da se radi o oscilaciji žice proizvod poprečnog preseka žice S i poluprečnika inercije K^2 može se napisati kao: $SK^2=S\frac{I}{S}=\frac{\pi d^4}{64}$, gde I predstavlja drugi moment površine oko centralne ose, a d prečnik žice. Konačno se može uvesti izraz za koeficijent inharmoničnosti B:

$$B=\frac{\pi^2 ESK^2}{TL^2}=\frac{\pi^2 EI}{TL^2}=\frac{\pi^3 Ed^4}{64TL^2} \qquad 2.8$$

Na osnovu relacije 2.8 može se zaključiti da sa porastom krutosti, koja se u ovom izrazu ogleda u proizvodu Young-ovog modula elastičnosti E i drugog momenta površine I, raste i koeficijent B, dok sa porastom tenzije T opada vrednost koeficijenta B. Uvrštavanjem izraza za relaciju između osnovne ugaone frekvencije žice i brzine prostiranja talasa $\omega_0=c\pi/L$, kao i izraza za koeficijent inharmoničnosti B datog u 2.8, dobija se da je ugaona frekvencija krute žice pričvršćene sa oba kraja:

$$\omega_n = n\omega_0\sqrt{1+Bn^2} \qquad 2.9$$

Ukoliko se jednakost 2.9 prevede iz ugaone frekvencije u frekvenciju dobija se:

$$f_n = nf_0\sqrt{1+Bn^2} \qquad 2.10$$

Rešenje dato izrazom 2.10 predstavlja sopstvene frekvencije žice pričvršćene na oba kraja pri čemu krutost žice nije zanemarena. U slučaju kada je B=0 rešenje 2.10 se svodi na harmonijski niz opisan jednačinom 2.4, dok za B>0 parcijali odstupaju pomerajući se na više u odnosu na idealne harmonike, pri čemu je odstupanje veće za veće redove n. U skladu sa izrazom 2.8 za koeficijent inharmoničnosti B, što je krutost veća (ili tenzija manja) to je odstupanje izraženije i obrnuto.

Fletcher je pokazao da se formulacija data izrazom 2.10 može smatrati univerzalnom jer predstavlja dobru aproksimaciju i za različite granične uslove nastale načinom pričvršćavanja žice za telo instrumenta (eng. *pinned* i *clamped*) [6]. U tom slučaju, razlika u načinu pričvršćavanja žice utiče samo na efektivnu vrednost koeficijenta inharmoničnosti B , a dok funkcionalna zavisnost frekvencije f_n od broja parcijala n ostaje istog oblika. U praksi, značajnija odstupanja nastaju tek pri vrlo velikoj krutosti ili ekstremno kratkim dužinama žica, što nije slučaj kod žica koje čine sastavni deo žičanih muzičkih instrumenata.

2.1.3. Koeficijent inharmoničnosti: Dosadašnja istraživanja

S obzirom da je inharmoničnost fenomen koji je zastupljen u grupaciji žičanih muzičkih instrumenata predmet je različitih istraživačkih tema. Jedna od najrazvijenijih bavi se uticajem inharmoničnosti na različite perceptivne osobine tonova. Anderson i Strong analizirali su uticaj inharmoničnosti na percepciju visine tona kod klavira sprovođenjem subjektivnog testa gde su ispitanici imali zadatak da povežu ton sa izraženom inharmoničnošću i njemu odgovarajući ton bez inharmoničnosti [7]. Rezultati testa pokazali su da perceptivni pomak tonske visine raste sa porastom koeficijenta inharmoničnosti B, odnosno što je veće B veće je odstupanje i tonske visine naročito u višim registrima tonova klavira. Järveläinen i saradnici radili su istraživanja o uticaju inharmoničnosti na percepciju boje tona [8]. Subjektivnim testom došli su do rezultata da se inharmoničnost lakše percipira kod tonova nižih frekvencija iako je za te tonove vrednost koeficijenta inharmoničnosti B manja nego kod viših tonova. Razlog tome je što se slušaoci oslanjaju na frekvencijska izbijanja među parcijalima. U tom slučaju čak i mala vrednost B dovodi do pomeranja viših parcijala, što implicira da izbijanja postaju jasno čujna. Nasuprot tome, kod visokih frekvencija tonova prag za detekciju promene boje tona izjednačava se sa pragom za promenu tonske visine, te je teško govoriti o samostalnom efektu inharmoničnosti na boju tona kod viših frekvencijskih opsega [8], [9]. Takođe, postoje tvrdnje da inharmoničnost zajedno sa spektralnom obvojnicom tona utiče na ocenu prirodnosti tonova klavira, naročito u slučaju kada je inharmoničnost izražena [10]. Postoje istraživanja koja o uticaju inharmoničnosti na percepciju tonova klavira govore kvalitativno, opisujući ga određenim atributima. Fletcher u tom kontekstu navodi da umerena inharmoničnost doprinosi subjektivno doživljenoj toplini klavirskog tona kao važnoj dimenziji kvaliteta tona [11]. Dodatno Bensa i saradnici su, u subjektivnim testovima sa sintetisanim klavirskim tonovima različitih vrednosti inharmoničnosti, na osnovu odgovora ispitanika, ustanovili 3 nivoa kvalitativnih opisa [12]. Prvi nivo, gde je inharmoničnost bila mala, ispitanici su te tonove opisali kao prigušene, siromašne i mat. Drugi nivo, sa srednjom vrednosti koeficijenta B, ispitanici su ton okarakterisali kao umereno bogat i negde između prigušenog i jasnog. Dok je treći nivo stimulusa sa veoma izraženom inharmoničnošću dobio epitete izobličeno, bogatije i blago metalno.

Sa stanovišta intervala i konsonantnosti, Plomp i Levelt pokazali su da konsonantnost i disonantnost intervala zavisi od spektralno-vremenske interakcije parcijala unutar kritičnog opsega i

inharmoničnosti pojedinačnih tonova koji čine intervale [13]. Rad Greay-a to eksplicitno proširuje razmatrajući parove inharmoničnih tonova, gde utvrđuje da porastom inharmoničnosti raste i verovatnoća preklapanja komponenti unutar kritičnih opsega i dovodi do opadanja konsonantnosti intervala [14]. Razmatrajući percepciju intervala Cohenova, razmatra dva slučaja. Kada stimulusi koji grade interval poseduju malu inharmoničnost, tada slušaoci ocenjuju konosnantnost intervala prema slaganju parcijala, dok u slučaju stimulusa sa izraženom inharmoničnošću presudnu ulogu preuzimaju vremenske odrednice (gde slušaoci razmatraju izbijanja među parcijalima) [15]. Imajući to u vidu, novija istraživanja pokazuju da manipulacije nad spektralnom obvojnicom, a samim tim i inharmoničnošću, mogu uticati na percipiranu konsonantnost intervala [16].

Čulo sluha je osetljivo na odstupanja parcijala i pri relativno malim vrednostima koeficijenta inharmoničnosti *B* [17]. U skladu s tim, pokazano je da porast *B* sistematski pomera percipiranu visinu tona i utiče na preferencije za štimovanje klavira [18]. Odnosno, na nivou skale klavira, Railbackova kriva se može objasniti kombinacijom inharmoničnosti i senzornih disonanci, gde da bi se minimizovala izbijanja između parcijala (nastala usled inharmoničnosti), štimovanjem se odstupa od jednako temperovanih vrednosti što se manifestuje „raširenim“ oktavama. Pojam „raširena“ oktava podrazumeva da se tonovi iz bas registra klavira štimuju na nešto niže frekvencije, dok se tonovi iz visokog registra štimuju na nešto više frekvencije u odnosu na jednako temperovanu skalu [19], [20], [21]. Takođe, pokazano je da u slučaju tonova klavira gde su za proizvodnju zvuka odgovorne 2 ili 3 žice, neophodno je finom korekcijom štimovati žice da zbog prisutne inharmoničnosti ne bi došlo do izbijanja unutar istog tona [22].

Zbog ustanovljene velike važnosti fenomena inharmoničnosti sa perceptivnog aspekta, koeficijent inharmoničnosti *B* postao je nezaobilazni parametar i različitih sinteza tonova žičanih instrumenata [23], [24]. Kao i sva prethodno navedena istraživanja, uglavnom je koeficijent inharmoničnosti pri sintezi zastupljen kod tonova klavira. Međutim, postoje istraživanja koja ističu i da je kod čembala neophodno uključiti inharmoničnost kako se ne bi izgubilo na prirodnosti tona i njegovoj karakterističnoj boji [25].

2.2 Fantomski parcijali

Pored imanentno prisutne inharmoničnosti parcijala, spektar žičanih instrumenata je kompleksan kao posledica više udruženih fizičkih fenomena. Jedan od fenomena jesu fantomski parcijali. Termin „fantomski parcijali” odnosi se na spektralne komponente koje ne potiču isključivo od transverzalnog talasnog kretanja (kao inharmonični parcijali), već su rezultat sprezanja transverzalnih i longitudinalnih oscilacija žice, kao i prinudnih vibracija u telu instrumenta [26], [27], [28], [29]. Takvo sprezanje različitih tipova oscilacija predstavlja nelinearne procese koji dovode do generisanja novih spektralnih komponenti na frekvencijama koje odgovaraju zbirovima inharmoničnih parcijala ili dvostrukim frekvencijama pojedinačnih inharmoničnih parcijala [30], [31]. Njihovo prisustvo u tonovima klavira prvi je dokumentovao Conklin istovremeno dajući im naziv fantomski parcijali [30], [31]. U ovom potpoglavlju razmatra se mehanizam generisanja fantomskih parcijala, veza između koeficijenta inharmoničnosti *B* i fantomskih parcijala, kao i perceptivne implikacije.

2.2.1. Mehanizam generisanja fantomskih parcijala

Radi razumevanja porekla fantomskih parcijala neophodno je prvobitno razmatrati pojednostavljeni model nelinearne sprege transverzalnih i longitudinalnih vibracija u žici. Predstavljeni model predstavlja sažetak iz relevantne literature sa ciljem pojašnjenja nastanka fenomena fantomskih parcijala [32], [33].

Posmatrajmo žicu koja vibrira u jednoj ravni gde su prisutne po jedna transverzalna i longitudinalna polarizacija. Takođe, zarad jednostavnosti pretpostavimo da je žica homogena, kruto pričvršćena za oba kraja i bez gubitaka. Tada, talasna jednačina koja odgovara longitudinalnom kretanju glasi:

$$\mu\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}=ES\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}+\frac{1}{2}ES\frac{\partial\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2}{\partial x}, \qquad 2.11$$

gde su $y=y(x,t)$ i $\xi=\xi(x,t)$ transverzalni odnosno longitudinalni pomeraji žice. Na osnovu jednačine 2.11 može se uočiti da transverzalne oscilacije žice mogu pobuditi žicu na longitudinalne vibracije samo ako je transverzalni otklon žice relativno veliki. S obzirom da posmatramo kruto pričvršćenu žicu na oba kraja uprošćena formulacija transverzalnog otklona žice je:

$$y(x,t)=\sum_{n=1}^{\infty}y_n(t)\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right). \qquad 2.12$$

Raspodela sile kojom transverzalne oscilacije pobuđuju longitudinalne može se napisati kao:

$$F_{t\to l}(x,t)=\frac{1}{2}ES\frac{\partial\left[\frac{\partial y(x,t)}{\partial x}\right]^2}{\partial x}=\frac{1}{2}ES\frac{\partial\left[\sum_{n=1}^{\infty}y_n(t)\frac{n\pi}{L}\cos\frac{n\pi x}{L}\right]^2}{\partial x}. \qquad 2.13$$

Sređivanjem parcijalnog izvoda iz jednačine 2.13 dobija se da je:

$$F_{t\to l}(x,t)=-ES\frac{\pi^3}{4L^3}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}y_m(t)y_n(t)mn\left[(m+n)\sin(\frac{m+n}{L}\pi x)+(m-n)\sin(\frac{m-n}{L}\pi x)\right]. \qquad 2.14$$

gde su m i n promenljive koje odgovaraju transverzalnim modovima žice. Poput transverzalnog otklona žice datog jednačinom 2.12, longitudinalni otklon žice se može predstaviti u istom obliku:

$$\xi(x,t)=\sum_{k=1}^{\infty}\xi_k(t)\sin(\frac{n\pi x}{L}). \qquad 2.15$$

Trenutna amplituda $\xi_k(t)$ longitudinalnog moda k može se dobiti na osnovu izraza (izvedenih u [33]):

$$\xi_k(t)=F_{t\to l,k}(t)*\xi_{\delta,k}(t), \qquad 2.16\text{ a}$$

$$F_{t\to l,k}(t)=\int_0^L F_{t\to l}(x,t)\sin(\frac{k\pi x}{L})dx \qquad 2.16\text{ b}$$

$$\xi_{\delta,k}(t)=\frac{1}{\pi L\mu}\frac{e^{-t/\tau_k'}}{f_k'}\sin(2\pi f_k' t), \qquad 2.16\text{ c}$$

gde * označava konvoluciju u vremenskom domenu, a $F_{t\to l,k}(t)$ je pobudna sila koja deluje na longitudinalni mod k. Impulsni odziv longitudinalnog moda k označen je sa $\xi_{\delta,k}(t)$, gde su promenljive f_k' i τ_k' frekvencija i vreme opadanja longitudinalnog moda k.

Radi utvrđivanja pobudnih frekvencija koje nastaju sprezanjem transverzalnih i longitudinalnih vibracija, neophodno je izračunati pobudnu silu $F_{t\to l,k}(t)$ datu izrazom 2.16 b koja predstavlja skalarni proizvod raspodele pobudne sile $F_{t\to l,k}(x,t)$ i longitudinalnog modalnog oblika. Kombinovanjem jednačina 2.14 i 2.16 b dobija se da pobudna sila $F_{t\to l,k}(t)$ ima vrednost različitu od 0 samo za slučajeve $m+n=k$ i $|m-n|=k$. Za sve ostale slučajeve prostorna raspodela pobude $F_{t\to l,k}(x,t)$ je ortogonalna na modalni oblik moda k. Pomenuta dva slučaja se mogu definisati tako da pobudna sila $F_{t\to l,k}(t)$ predstavlja zbir dve komponente. Komponenta koja potiče od rezultata $m+n=k$ je:

$$F_{t\to l,k}(t)^{+}=-ES\frac{\pi^3}{8L^2}\sum_{n=1}^{k-1}y_{k-n}(t)y_n(t)k(k-n)n. \qquad 2.17$$

Komponenta koja potiče od $|m\text{-}n|=k$ je:

$$F_{t\to l,k}(t)^{-} = -2ES\frac{\pi^3}{8L^2}\sum_{n=1}^{\infty} y_{k+n}(t)y_n(t)k(k+n)n \cdot \qquad 2.18$$

Na osnovu jednačina 2.17 i 2.18 frekvencije nastale spregom transverzalnih i longitudinalnih vibracija mogu se izračunati kao:

$$\begin{aligned} F_{t\to l,k}(t)^{+}: & \begin{matrix} f_n + f_{k-n} \approx f_k \\ f_n - f_{k-n} \approx f_{|2n-k|} \end{matrix}, \\ F_{t\to l,k}(t)^{-}: & \begin{matrix} f_n + f_{k+n} \approx f_{2n+k} \\ f_n - f_{k+n} \approx f_k \end{matrix} \end{aligned} \qquad 2.19$$

Iz relacija 2.19 vidi se da se pobuda longitudinalnih modova označenih sa k razlaže na sume ili razlike transverzalnih frekvencija, gde je transverzalni mod označen sa n. Do relacija opisanih sa 2.19 došlo je počevši od homogene žice kruto pričvršćene na oba kraja. U potpoglavlju 2.2.2 biće objašnjeno kako inharmoničnost koja je prisutna kod realnih žica utiče na frekvencije prikazane relacijama 2.19.

2.2.2. Uloga koeficijenta inharmoničnosti *B*

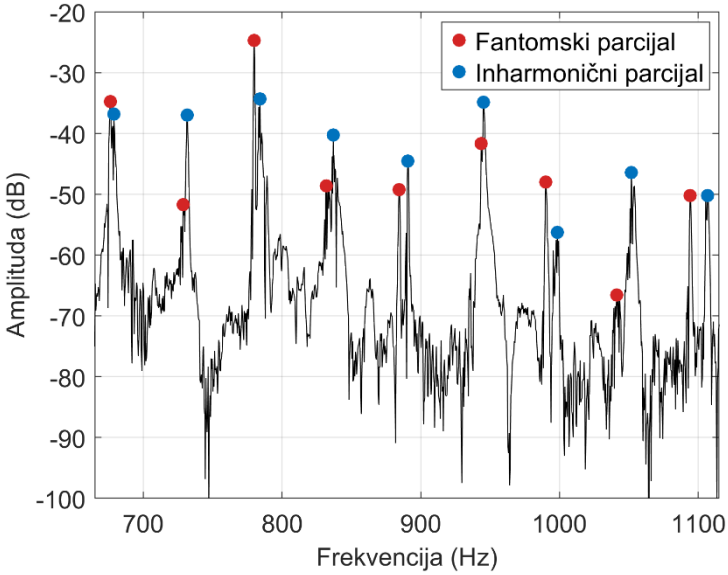
Ukoliko se posmatra idealna žica, njenim oscilovanjem formiraju se samo komponente koje su posledica transverzalnih vibracija, što dovodi do idealnog harmoničnog niza $f_n=nf_0$. Tada izrazi za frekvencije vibracija žice 2.19 više nisu aproksimacije već zauzimaju formu jednakosti, odnosno $f_n + f_{k-n}=f_k$. To za posledicu ima da se u spektru javlja izražena komponenta na frekvenciji f_k i niz parcijala koji su na frekvencijama f_{2n-1} u slučaju kada je k neparno, odnosno f_{2n-2} u slučaju parnog k. Sa stanovišta oscilacija žice to znači da bi neparni longitudinalni modovi bili pobuđivani na istim frekvencijama kao neparni transverzalni modovi, a parni longitudinalni modovi na istim frekvencijama kao parni transverzalni modovi.

Međutim, u slučaju realnih žica muzičkih instrumenata krutost se ne može zanemariti. Uticaj krutosti se direktno ogleda kroz činjenicu da parcijali nastali transverzalnim kretanjem više ne formiraju idealni harmonični niz već odstupaju od njega formirajući niz frekvencija opisanih formulom 2.10. Tada zbirovi frekvencija nastali transverzalnim i longitudinalnim sprezanjem oscilacija (f_n+f_{k-n}) neće odgovarati frekvenciji f_k, već će formirati komponentu u okolini frekvencije f_k. Na kojem frekvencijskom rastojanju će se fantomski parcijal naći od transverzalnog inharmoničnog parcijala zavisi od koeficijenta inharmoničnosti B i rednog broja longitudinalnog moda k. U slučaju kada je vrednost koeficijent inharmoničnosti B mala, niz parcijala koji se dobija oscilacijom žice je skoro harmonijski i frekvencije fantomskih parcijala javljaju se na istim frekvencijama kao i izvorni transverzalni modovi žice, što direktno za posledicu ima manju perceptivnu primetnost. Dok u slučaju kada B ima veću vrednost, fantomski parcijali se javljaju na većim frekvencijskim rastojanjima od inharmoničnih transverzalnih parcijala, što nekad može dovesti da se takva komponenta nađe na sredini između dva sukcesivna transverzalna parcijala. Usled toga dolazi do frekvencijskog izbijanja što čini uticaj fantomskih parcijala perceptivno primetnijim.

2.2.3. "Roditeljstvo" fantomskih parcijala

Na osnovu relacije 2.19 i činjenice da se, usled inharmoničnosti, frekvencije fantomskih parcijala javljaju na frekvencijama zbirova ili razlika transverzalnih inharmoničnih komponenti, u ovom odeljku biće identifikovano koje kombinacije od predstavljenih teorijskih su najverovatnije da se nađu u spektrima tonova žičanih muzičkih instrumenata. Istraživanja koja je Conklin sproveo pokazuju da postoje dve vrste fantomskih parcijala parni i neparni [30], [31]. Neparni fantomski parcijali javljaju se najčešće kao zbir dva susedna inharmonična parcijala. Na primer, ukoliko se fantomski parcijal nalazi u blizini 13og inharmoničnog parcijala, veća je verovatnoća da on potiče od zbira inharmoničnih parcijala koji se nalaze na pozicijama 6. i 7. inharmoničnog parcijala, nego od

zbira parcijala koji se nalaze na pozicijama 5. i 8. ili 4. i 9. inharmoničnog parcijala. U slučaju parnih fantomskih parcijala, teoretski na osnovu relacije 2.19 oni bi mogli da se u spektru nađu na frekvencijama oblika f_{2n-k} sa parnim pomakom k=2,4,6,… itd. Međutim, Conklin je pokazao empirijski da se parni fantomski parcijali najčešće nalaze na frekvencijama dvostruko većim od pojedinačnih inharmoničnih parcijala [30], [31]. Na primer, ukoliko se fantomski parcijal nalazi u blizini 8. inharmoničnog parcijala, njegova frekvencija biće duplo veća od frekvencije 4. inharmoničnog parcijala. Odnosno smatraće se da je roditelj takvog fantomskog parcijala 4. inharmonični parcijal. Radi ilustracije prethodno izloženih mehanizama na slici 2.1 prikazan je uvećani deo spektra tona As1 odsviranog na harfi. Crvenim kružićima označene su frekvencije fantomskih parcijala, dok su plavim kružićima označene frekvencije inharmoničnih parcijala. Deo spektra koji je obuhvaćen slikom pripada rednim brojevima parcijala od 13. do 21.



Slika 2.1 Uvećani prikaz spektra tona As1 odsviranog na harfi (od 13og do 21og parcijala)

Analizirajući spektar može se zaključiti da su fantomski parcijali koji se nalaze na pozicijama blizu 13., 15., 19. i 21. parcijala većih amplituda u odnosu na inharmnonične parcijale. Dok fantomski parcijali na ostalim pozicijama nisu toliko izraženi. Uzrok fluktuacije amplituda fantomskih parcijala unutar jednog tona pripisuje se amplitudama njihovih roditeljskih parcijala [32]. U konkretnom slučaju prikazanom na slici 2.1, kada amplituda 7. parcijala (roditelja) nije dovoljno izražena, samim tim neće biti ni izražena amplituda fantomskog parcijala u okolini 14. inharmoničnog parcijala.

2.2.4. Dosadašnja istraživanja

Kao što je već navedeno, fenomen fantomskih parcijala u zvuku žičanih muzičkih instrumenata prvobitno je opisan u radu Conklina, gde su definisani kao komponente nastale spregom transverzalnih i longitudinalnih vibracija žice. Istraživanja novijeg datuma pokazala su na osnovu merenja da i drveni delovi klavira, poput mosta, rezonantne ploče i rezonantne kutije mogu da imaju udela u izraženosti fantomskih parcijala kod klavira [28], [29]. Međutim, sistemska analiza uticaja tela i koji tačno delovi su odgovorni za izraženost fantomskih parcijala i dalje nije sprovedena. Sa aspekta percepcije u literaturi postoje istraživanja vezana za klavir. Bank i Lehtonen sproveli su subjektivni test ispitujući percepciju longitudinalnih komponenti nastalih vibracijom žice klavira [27]. Na osnovu rezultata testa pokazano je da su longitudinalne komponente (samim tim i fantomski parcijali) primetni sve do tona C_5 (f_0=523.3 Hz). Sa kvalitativnog aspekta, ispitanici su ocenili tonove koji sadrže longitudinalne komponente kao realističnije, dok tonove bez njih opisuju kao sintetizovane. Takođe, neki od ispitanika su istakli da početak tona sa longitudinalnim komponentama zvuči raštimovano i oštrije, dok su tonovi bez longitudinalnih komponenti percipirani kao mekši i tamniji. Dodatno, Bensa je sa saradnicima vršio perceptivno-kognitivna ispitivanja modela sinteze

klavira [12]. U tom istraživanju test signali su predstavljali sintetizovane tonova klavira sa različitim vrednostima koeficijenta inharmoničnosti i različitim nivoima prisutnosti fantomskih parcijala. Rezultati su pokazali da su tonove sintetisane sa manjim brojem fantomskih parcijala ispitanici ocenili kao šuplje i prigušene, tonove koji su imali veći broj fantomskih parcijala opisali su kao jasne, zaobljene i uravnotežene, dok su tonove sa maksimalnim brojem fantomskih parcijala ocenili kao blago metalne i agresivne. Time je pokazano da u boji tona klavira važnu ulogu pored inharmoničnosti igra i prisutnost fantomskih parcijala.

Iako je najveći deo literature fokusiran na klavir, Woodhouse je pokazao da su fantomski parcijali prisutni i kod instrumenata poput laute, gitare i harfe [26], [34], [35]. U svojim radovima Woodhouse sistematski upoređuje eksperimentalna merenja na gitari i harfi sa numeričkim kako linearnim tako i nelinearnim modelima [26], [35]. Zaključci navedenih istraživanja jesu da nelinearni modeli znatno vernije reprodukuju spektre realnih tonova gitare i harfe. Pored toga, došao je do saznanja da su fantomski parcijali posebno izraženi kod harfe. Prvenstveno zbog geometrije instrumenta, gde se žice harfe nalaze pod uglom u odnosu na rezonantnu ploču, te samim tim longitudinalne vibracije efikasnije prenose pobudu na rezonantnu ploču i pojačavaju nelinearne komponente [26], [36]. Drugi razlog odnosi se na tehniku trzanja žice, gde je pokazano da kod harfe žica pri okidanju ima znatno veću slobodu pomeranja oko ravnotežnog položaja [37]. Veliki otklon pri izvođenju žice iz ravnotežnog položaja rezultuje snažnijim pobuđivanjem fantomskih parcijala nego kod drugih žičanih instrumenata [38].

2.3 Metode i algoritmi za procenu koeficijenta inharmoničnosti

S obzirom na zastupljenost inharmoničnosti kod velike grupe muzičkih instrumenata i njene perceptivne važnosti razvijani su različiti algoritmi za estimaciju koeficijenta inharmoničnosti. Analitička veza između frekvencije parcijala žice koje osciluje i koeficijenta inharmoničnosti B, data izrazom 2.10, predstavlja okosnicu savremenih modela žica, automatizovanih procedura za procenu koeficijenta inharmoničnosti na osnovu realnih signala muzičkih instrumenata i sagledavanje ostalih fenomena koji su posledica inharmoničnosti žice. Generalni koncept metoda i algoritama za procenu inharmoničnosti svodi se na što tačniju estimaciju frekvencija parcijala tona iz signala, a zatim zajedničku procenu osnovne frekvencije tona f_0 i koeficijenta inharmoničnosti B. U literaturi su se izdiferencirale različite tehnike iz frekvencijskog domena analize signala, gde je jedna od njih procena koeficijenta inharmoničnosti na osnovu inharmoničnog češljastog filtra [39]. Takav metod zahteva izražene komponente u spektru signala na osnovu čijih frekvencija će biti formiran inharmonični češljasti filtar. Međutim, problem ovakve metode jeste frekvencijska rezolucija koja iznosi 1.5 Hz. Pri tako velikoj rezoluciji teško je razlučiti inharmonične transverzalne parcijale od fantomskih parcijala, što direktno narušava tačnost estimacije koeficijenta inharmoničnosti. Klapuri kombinujući tehnike za određivanje tonske visine i HPS (*Harmonic Product Spectrum*) u signalima u kojima figuriše više tonova (različitih tonskih visina), posredno određuje i koeficijent inharmoničnosti [40]. Takođe, kao i u slučaju inharmoničnog komb filtra Klapurijev metod zasniva se na analizi spektra u predefinisanim frekvencijskim opsezima nedovoljne frekvencijske rezolucije, što u slučaju prominentnih nelinearnih spektralnih artefakata neće dati tačnu estimaciju koeficijenta inharmoničnosti. Godsil i Davy su predstavili modelovanje zvuka klavira u vremenskom domenu na osnovu Bajesovog zaključivanja, gde su parametri modela B i f_0 estimirani maksimiziranjem aposteriorne funkcije gustine verovatnoće [41]. Riguad i saradnici predložili su algoritam koji se zasniva na NMF (*Non-negative Matrix Factorization*) sa ciljem estimacije B i f_0, gde su ovi parametri dalje korišćeni kao ulazni parametri pri štimovanju tonova klavira [42]. Dixon je sa saradnicima razmatrao procenu koeficijenta B kod čembala istovremeno određujući i štim u kojem je snimano muzičko delo [43]. Finska grupa naučnika predvođena V. Välimäki, dala je predlog efikasnog i robusnog algoritma pod imenom PFD (*Partial Frequency Deviation*) koji se zasniva na minimiziranju devijacije koja je nastala kao razlika frekvencija parcijala procenjenih iz spektra tona i frekvencija parcijala računatih na osnovu matematičkog modela predstavljenog izrazom 2.10 [44], [45].

Pomenute metode i algoritmi za procenu inharmoničnosti razvijani su na tonovima klavira, iako je inharmoničnost fenomen prisutan kod svih žičanih muzičkih instrumenata.

U okviru inicijalnih istraživanja u okviru rada na doktorskoj disertaciji izvršena je procena koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira, čembala i harfe [46], [47], [48]. Procena koeficijenta B tonova čembala izvršena je pomoću PFD algoritma koji se pokazao kao robustan i efikasan algoritam pri proceni koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira. Međutim na celokupnom frekvencijskom opsegu čembala PFD algoritam nije uspešno procenio koeficijent B. U radu je sprovedena analiza uticaja estimacije frekvencija parcijala na procenu koeficijenta inharmoničnosti pomoću PFD algoritma [46]. Poređene su metoda korišćena u PFD algoritmu za estimaciju spektra koja se zasniva na DFT analizi i AR modelovanju. Iako je AR model kao metod za estimaciju spektra dao tačniji niz frekvencija parcijala čembala koji se koristi u PFD algoritmu za procenu koeficijenta inharmoničnosti, postoji nekoliko ograničenja takvog načina estimiranja spektra. Da bi se izvršila procena spektra AR modelom neophodno je odrediti red modela. Određivanje reda modela zavisi od osnovne frekvencije tona koji se analizira i potrebno ga je uskladiti za svaki ton analiziranog frekvencijskog opsega kako bi se dobio niz odgovarajućih frekvencija parcijala. Ovakvim načinom onemogućeno je sprovesti automatizovanu proceduru nad celim opsegom čembala, čime se narušava efikasnost PFD algoritma. Sa ciljem karakterizacije harfe takođe je sprovedena estimacija koeficijenta inharmoničnosti za ceo frekvencijski opseg tonova harfe [47]. U ovom istraživanju takođe je primenjen PFD algoritam za procenu koeficijenta inharmoničnosti. Međutim izraženo prisustvo spektralnih artefakata u tonovima harfe onemogućilo je tačnu estimaciju na osnovu PFD algoritma zbog čega je razvijan alat za manuelno određivanje koeficijenta inharmoničnosti. Na osnovu analize spektara tonova harfe pomoću manuelnog alata razvijanog u Matlab okruženju ustanovljeno je da tonovi harfe poseduju izražene fantomske parcijale, čije su amplitude značajno veće u odnosu na inharmonične parcijale tona. Time je utvrđeno da prisustvo nelinearnih artefakata u spektrima žičanih instrumenata otežava procenu koeficijenta inharmoničnosti postojećim metodama i ukazuje na potrebu za njihovim unapređenjem. Jedan od doprinosa ove disertacije je upravo unapređenje postojećeg PFD algoritma tako da se pri proceni koeficijenta inharmoničnosti eliminiše uticaj fantomskih parcijala.

3 O muzičkim instrumentima: klavir, čembalo i harfa

U ovom poglavlju detaljnije su predstavljeni klavir, čembalo i harfa kao reprezentativni primeri žičanih muzičkih instrumenata kod kojih su istovremeno prisutni fenomeni inharmoničnosti i fantomskih parcijala. Motivacija za izbor ovih instrumenata leži u činjenici da pripadaju različitim podgrupama žičanih instrumenata prema mehanizmu generisanja zvuka. Klavir je udarni instrument (zvuk nastaje udarcem čekića o žicu), dok su čembalo i harfa trzani, gde se kod čembala žica pobuđuje posredno mehanizmom (plektrumom), a kod harfe direktno prstima izvođača. Razlike u mehanici pobude, konstrukcijskim rešenjima i materijalima (telo instrumenta, tipovi i dimenzije žica) sistematski se odražavaju na promene koeficijenta inharmoničnosti B kroz frekvencijski opseg instrumenta, kao i na istaknutost fantomskih parcijala.

Svakom pojedinačnom instrumentu posvećeno je posebno potpoglavlje koje je strukturirano u tri celine: (1) konstrukcija i materijali, sa naglaskom na relevantne mehaničke i akustičke parametre, (2) mehanizam generisanja zvuka i specifičnosti pobude i (3) vremensko-frekvencijska analiza, u kojoj se instrument analizira preko dugovremenog spektra, kao i preko spektralnih i vremenskih obvojnica reprezentativnih tonova.

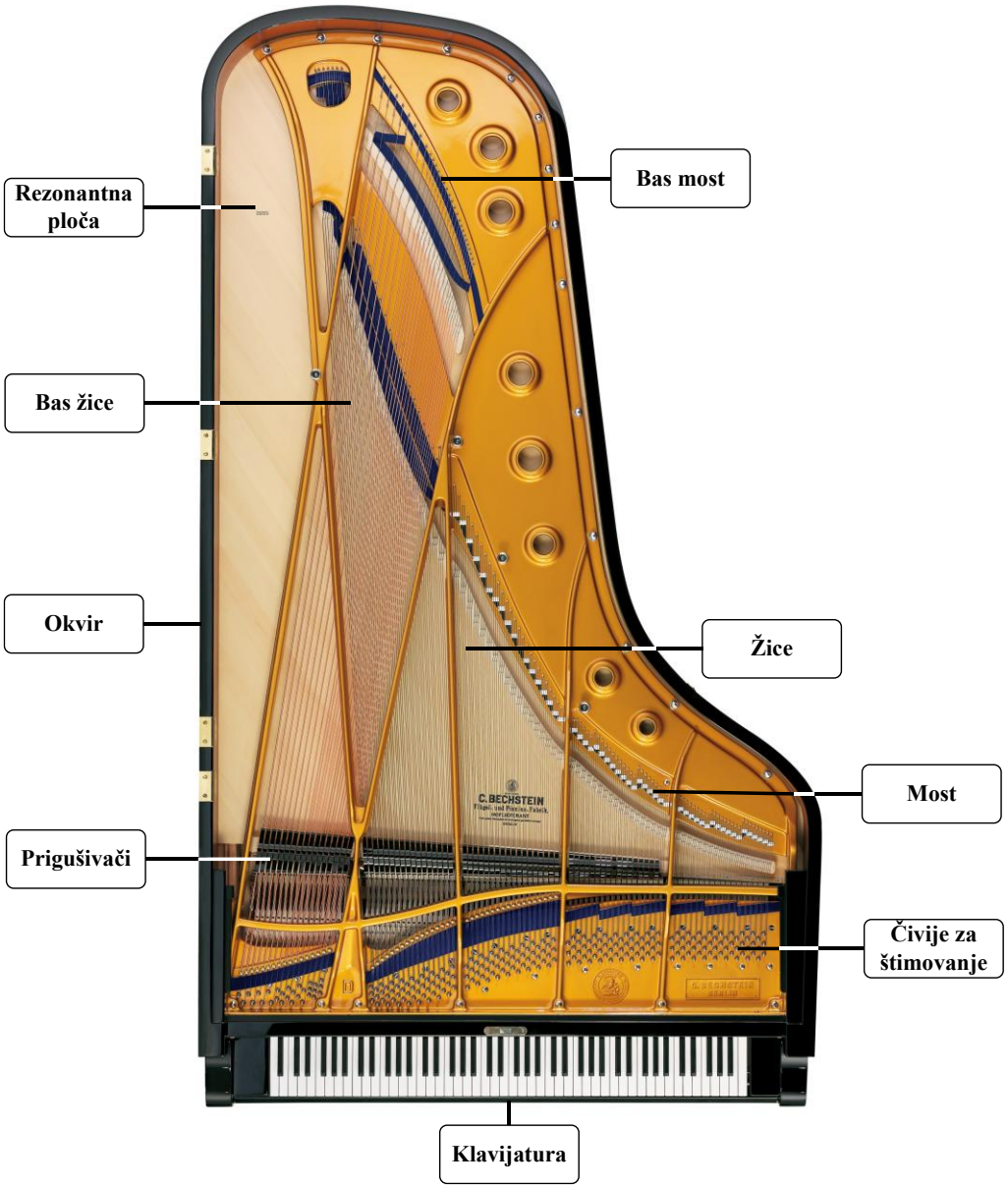
3.1 Klavir

3.1.1. Konstrukcija instrumenta

Klavir je predstavnik žičanih muzičkih instrumenata koji po klasifikaciji nastanka zvuka spada u podgrupu udarnih žičanih instrumenata [49]. Osnovu građe koncertnog klavira čini: okvir sa razapetim žicama, rezonantna ploča, klavijatura sa mehanizmom čekića kojim se stvara zvuk i sistem pedala. Na slici 3.1 prikazana je konstrukcija klavira. Okvir savremenog klavira izgrađen je od livenog gvožđa budući da izdržava napetost žica koje ga opterećuju pritiskom većim od 20 tona. Moderni klavir ima standardno 88 dirki koje obuhvataju tonski raspon od 7¼ oktava, od najnižeg tona A0 do najvišeg C8.

Rezonantna ploča klavira uglavnom se izrađuje od jelovine debljine do 1 cm i kao takva ima dualnu funkciju, statičku i akustičku. Sa stanovišta statike, ona deluje kao protivteža vertikalnim silama tenzije žica koje se preko mosta prenose na nju, pri čemu te sile iznose od 10 do 20 N po žici. Sa akustičkog stanovišta rezonantna ploča je primarni izvor akustičkog zračenja instrumenta jer pretvara deo mehaničke energije žica i mosta u zvučnu energiju. Kod savremenih klavira najčešće se nalaze dva mosta: glavni, za tonove viših frekvencija, i kraći bas most, koji je viši za 2 do 3 cm kako bi bas žice koje odgovaraju tonovima nižih frekvencija mogle nesmetano da pređu preko žica visokog registra [50]. Žice su jednim krajem pričvršćene za metalne klinove koji se nalaze u čeličnom okviru, dok se drugim krajem obavijaju oko čivija kojim se reguliše njihova napetost i vrši štimovanje.

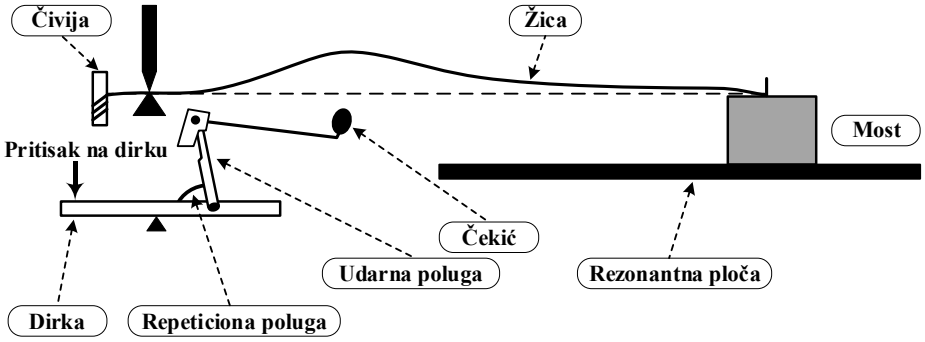
Žice se izrađuju od čelika visoke čvrstoće, pri čemu se za bas tonove koriste čelična jezgra obavijena sa jednim ili dva sloja bakarne legure. Ovako omotane žice imaju veću masu po jedinici dužine, čime se postiže niža frekvencija uz istovremeno smanjenje krutosti i inharmoničnosti [51]. U višim registrima koriste se žice manjeg prečnika koje su kraće i postavljene po tri za svaki ton, dok se za tonove iz nižeg registra, radi jačeg zvuka i stabilnije intonacije, koriste jedna ili dve žice po tonu. Ukupan broj žica u koncertnom klaviru kreće se oko 228-243, zavisno od modela: deset tonova najniže frekvencije (od A0 do Fis1) imaju po jednu žicu, narednih šesnaest tonova (od G1 do Ais2) imaju po dve žice, dok preostalih 62 tona (od H2 do C8) imaju po tri žice, što obezbeđuje ujednačenost zvučnog intenziteta u čitavom opsegu. Dužina žica varira od oko 2 m u bas području do svega nekoliko centimetara u najvišem registru. Visoka napetost, prosečno oko 1 N po žici, rezultira ukupnom silom većom od 20 tona koju konstrukcija od livenog gvožđa mora da izdrži [51]. Upravo ovaj sistem rasporeda žica, materijala od kojih su napravljene i njihove napetosti predstavlja ključni element u obezbeđivanju bogatog zvuka modernog koncertnog klavira.



Slika 3.1 Konstrukcija klavira [52]

3.1.2. Mehanizam stvaranja zvuka

Unutrašnji mehanizam klavira predstavlja najsloženiji i najprecizniji deo njegove konstrukcije i čini osnovu tehničke izvedbe instrumenta. Osnovna funkcija ovog mehanizma jeste da energiju pokreta prsta svirača prenese na čekić, koji potom udara u žicu i izaziva njeno oscilovanje. Završni element sistema jeste niz čekića, izrađenih od drvenog štapića i glave obložene filcom, čija masa i tvrdoća imaju presudan značaj na kvalitet i boju proizvedenog tona. Posrednici u ovom procesu su složeni sistemi poluga i prenosa, pažljivo konstruisani da omoguće preciznu kontrolu nad pokretima čekića i prigušivača. Na slici 3.2 prikazan je mehanizam za pobudu žice i stvaranje zvuka kod klavira. Kada svirač pritisne dirku, njen prednji deo se spušta, dok zadnji kraj pomoću klinastog oslonca (eng. *capstan*) prenosi pritisak na prenosnu konstrukciju poznatu kao viljuška (eng. *whippen assembly*). Ova konstrukcija se rotira oko svoje ose, pri čemu udarna poluga (eng. *jack*) svojim vrhom deluje na odbojni valjak na dršci čekića i time pokreće čekić ka žici [50]. U trenutku kada se čekić približava žici udarna poluga se povlači i omogućava da čekić slobodno udari žicu. Nakon udara u žicu, čekić se odbija i biva zaustavljen od strane zadržača čekića (eng. *backcheck*), čime se sprečava višestruko udaranje.



Slika 3.2 Skica mehanizma za stvaranje zvuka klavira

Repeticiona poluga zadržava čekić u polu podignutom položaju, što omogućava da se isti ton ponovi i bez potpunog otpuštanja dirke. Ovakav mehanizam predstavlja ključni element moderne mehanike koncertnog klavira, jer omogućava brzu repeticiju tonova i različite izvođačke tehnike [49]. Kada se dirka otpusti, zadržač oslobađa čekić, a repeticiona poluga ga podiže dovoljno visoko kako bi udarna poluga ponovo mogla da se podvuče ispod valjka čekića. Time je mehanizam spreman za ponovni udar. U opisanom mehanizmu presudnu ulogu u formiranju zvuka klavira ima čekić. Masa čekića kod koncertnog klavira varira od približno 10 grama u području bas tonova do oko 4 grama u najvišem registru [50]. Tvrdi čekići efikasnije pobuđuju više frekvencijske modove žice, čineći da zvuk klavira bude svetliji i prodorniji, dok mekši čekići slabije pobuđuju visoke frekvencije žice i samim tim boja tona tako dobijenog zvuka je tamnija i prigušenija [53]. Ukoliko je čekić previše tvrd, to dovodi do tona čija je boja oštra, dok suviše mekani čekić daje mutan i nedovoljno jasan zvuk. Zbog toga podešavanje tvrdoće čekića u praksi zahteva fine mehaničke ili hemijske intervencije na filcu.

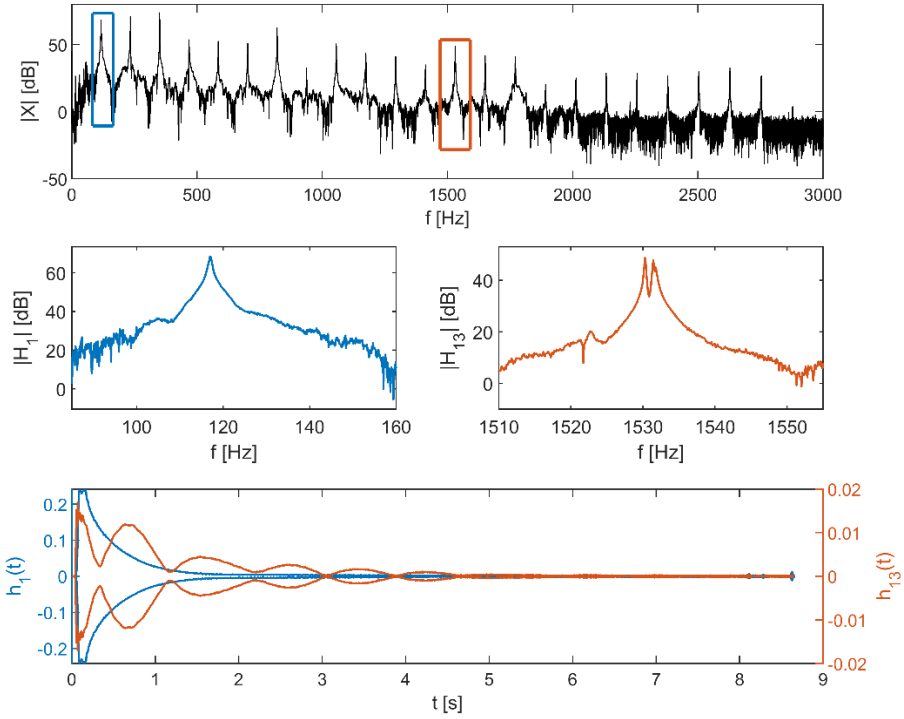
Pored toga, značajnu ulogu u kontroli trajanja i boje tona imaju prigušivači, koji putem posebnih poluga prate kretanje dirki. Njihova funkcija je da zaustavljaju oscilacije žica i time sprečavaju neželjeno preklapanje tonova. Međutim, u muzičkoj praksi, pored dirki i čekića, od velikog značaja su i pedale, koje proširuju izražajne mogućnosti instrumenta. Koncertni klavir obično poseduje tri pedale. Desna pedala, poznata kao pedala za produžavanje (eng. *sustain*), podiže sve prigušivače i time omogućava da ton nastavi da zvuči i nakon što je dirka otpuštena. Na ovaj način, osim produženja trajanja pojedinačnih tonova, dolazi i do obogaćivanja zvuka alikvotnim rezonancama, jer i žice koje nisu direktno pobuđene ulaze u slobodno treperenje [49]. Leva pedala, poznata kao *una corda* ili „meka pedala“, menja boju i jačinu zvuka. Kod koncertnih klavira, pritisak na ovu pedalu pomera ceo mehanizam blago u stranu, tako da čekić u višim registrima pogađa samo dve umesto tri žice, odnosno jednu umesto dve u nižim registrima. Takođe, udar se ostvaruje mekšim delom filca na glavi čekića, što rezultuje tišim, mekšim i tamnijim zvukom. Srednja pedala (*sostenuto* pedala) ima drugačiju funkciju od desne pedale, jer ne podiže sve prigušivače, već samo one koji su već aktivirani u trenutku pritiska na pedalu. Na taj način omogućava da pojedini tonovi ostanu produženi i rezonantni, dok se ostali tonovi sviraju normalno, bez produžavanja. Ova osobina pruža svirača veću kontrolu nad polifonijskim teksturama i omogućava izvođenje složenih muzičkih efekata koji nisu ostvarivi drugim pedalama [49].

Kombinacija sofisticirane mehanike čekića, prigušivača i pedala omogućava klaviru da odgovori na širok spektar izražajnih i dinamičkih zahteva, čineći ga jednim od najsavršenijih akustičkih instrumenata i osnovnim stubom muzičkog stvaralaštva od 18. veka do danas.

3.1.3. Klavir sa stanovišta signala

Radi kompletne akustičke slike instrumenta, pored pregleda konstrukcije i mehanizma nastanka zvuka neophodno je analizirati i vremensko-frekvencijske karakteristike tona instrumenta. Na slici 3.3 prikazan je spektar tona Ais2 odsviranog na klaviru, sa uvećanim prikazom prvog i trinaestog parcijala tona kao i prikazom njihovih vremenskih obvojnica. Na osnovu spektra tona vidi se da postoje samo 23 istaknuta parcijala, gde su osmi i šesnaesti parcijali nižih amplituda u odnosu na

ostale. Uzrok za niže amplitude 8. i 16. parcijala leži u tome što da bi se proizveo ton Ais2 na klaviru čekić udara žicu na osminu njene dužine čime potiskuje parcijale koji se javljaju na umnošku broja osam. Takva raspodela amplituda parcijala karakteristična je za spektralnu obvojnicu klavira. Kao što je navedeno u poglavlju 2 nelinearna sprega između transverzalnih i longitudinalnih oscilacija dovode do nastanka komponenti koje se nazivaju fantomski parcijali. U drugom redu slike 3.3 nalaze se uvećani prikazi prvog parcijala i trinaestog parcijala tona. Jasno se uočava da trinaesti parcijal ima dve frekvencijski bliske komponente, gde levi vrh odgovara fantomskom parcijalu koji je čak poredive amplitude sa desnim vrhom koji odgovara inharmoničnom parcijalu nastalom transverzalnim oscilacijama žice.

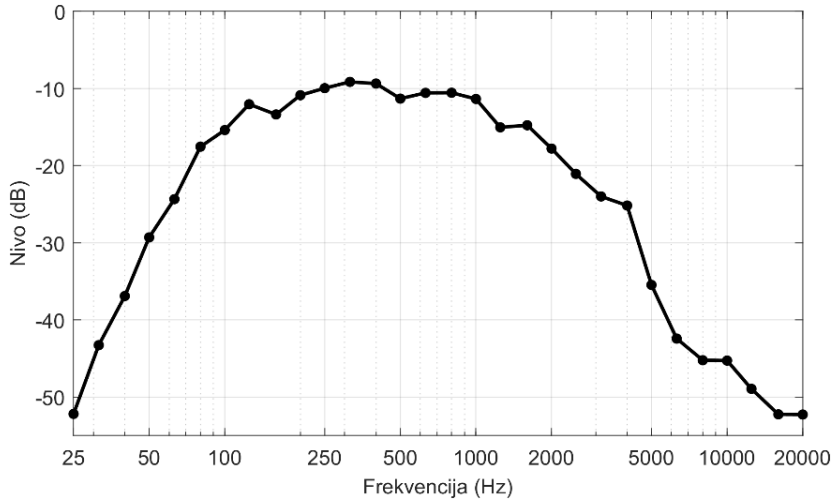


Slika 3.3 Spektar tona Ais2 odsviranog na klaviru sa prikazom vremenske obvojnice prvog i trinaestog parcijala

Radi procene uticaja fantomskog parcijala analizirane su i vremenske obvojnice. Neophodno je da se iz signala tona Ais2 najpre izdvoje parcijali od interesa. Oni su izdvojeni pomoću dvostruko komplementarne IIR filtarske banke analize sa faznom korekcijom [54] na čijem se izlazu dobijaju uskopojasni signali pojedinačnih parcijala. Na osnovu signala na izlazu iz banke koji odgovara parcijalu od interesa primenom Hilbertove transformacije dobija se obvojnica parcijala. Na taj način dobijene su obvojnice prvog i 13. parcijala tona Ais2. Opisani postupak izdvajanja vremenskih obvojnica implementiran je u okviru aplikacije MuPI razvijene u ovoj disertaciji (Poglavlje 4). Iz prikaza u trećem redu slike 3.3 uočava se da obvojnica prvog parcijala ima oblik karakterističan za vremenski razvoj tona klavira gde je naglašena usponska ivica (eng. *attack*), a zatim se nastavljaju faze opadanja (eng. *decay*) i smirivanja (eng. *release*). Za razliku, obvojnica 13. parcijala ne poseduje karakterističan vremenski razvoj parcijala, već zbog frekvencijski bliskog fantomskog parcijala njena obvojnica postaje amplitudski modulisana.

Pored vremensko-frekvencijskih obeležja tipičnog tona, dugovremeni spektar dobijen nad tonovima iz kompletnog frekvencijskog registra posmatranog instrumenta upotpunjuje informacije o instrumentu gledano sa aspekta akustike. S obzirom da se fenomeni žičanih muzičkih instrumenata u ovom doktoratu posmatraju kroz prizmu klavira, čembala i harfe, u ovom poglavlju biće objašnjen princip izračunavanja dugovremenog spektra koji je primenjivan na sva tri instrumenta. Dugovremeni spektar dobija se primenom 1/3 oktavne filtarske banke koja se sastoji od 31 filtra [55]. Na ulaz takve banke filtara dovode se tonovi iz celokupnog registra posmatranog instrumenta, pri čemu je frekvencijski opseg od interesa od 25 Hz do 20 kHz. Zatim se nakon filtriranja tonova izračunava

efektivna vrednost (eng. *RMS-Root Mean Square*), što predstavlja veličinu proporcionalnu snazi signala u posmatranom frekvencijskom opsegu. Za svaki frekvencijski opseg (definisan odgovarajućim filtrom) vrši se usrednjavanje RMS vrednosti dobijenih za svaki ton. Opisani postupak ponavlja se za sve opsege od interesa (od 1 do 30). Nakon usrednjavanja dobija se 30 vrednosti koje predstavljaju dugovremeni spektar u 1/3 oktavnim opsezima. Te vrednosti se zatim preračunavaju u decibele i normalizuju tako da ukupni nivo u celokupnom frekvencijskom opsegu od interesa bude 0 dB. Na osnovu opisanog postupka dobijen je dugovremeni spektar klavira prikazan na slici 3.4.



Slika 3.4 Dugovremeni spektar klavira

Sa slike 3.4 može se uočiti da je energija tonova klavira većinski koncentrisana u frekvencijskom opsegu od 100 Hz do 2 kHz. Nakon 2 kHz uočava se postepen pad nivoa od oko 30 dB do 5 kHz, dok iznad 5 kHz praktično ne postoji energetski doprinos u tonovima klavira. Ovakva energetska raspodela je posledica kombinovanog delovanja načina pobude, žice i rezonantne ploče. Udarac čekića deluje kao niskofrekventna pobuda, zbog svog kratkog kontakta sa žicom kao i mesta na kojem udara žicu [53]. Takođe, neprilagođenje impedansi rezonantne ploče klavira i žica postaje sve izraženije sa porastom frekvencije što direktno uzrokuje manju prominentnost parcijala na višim frekvencijama.

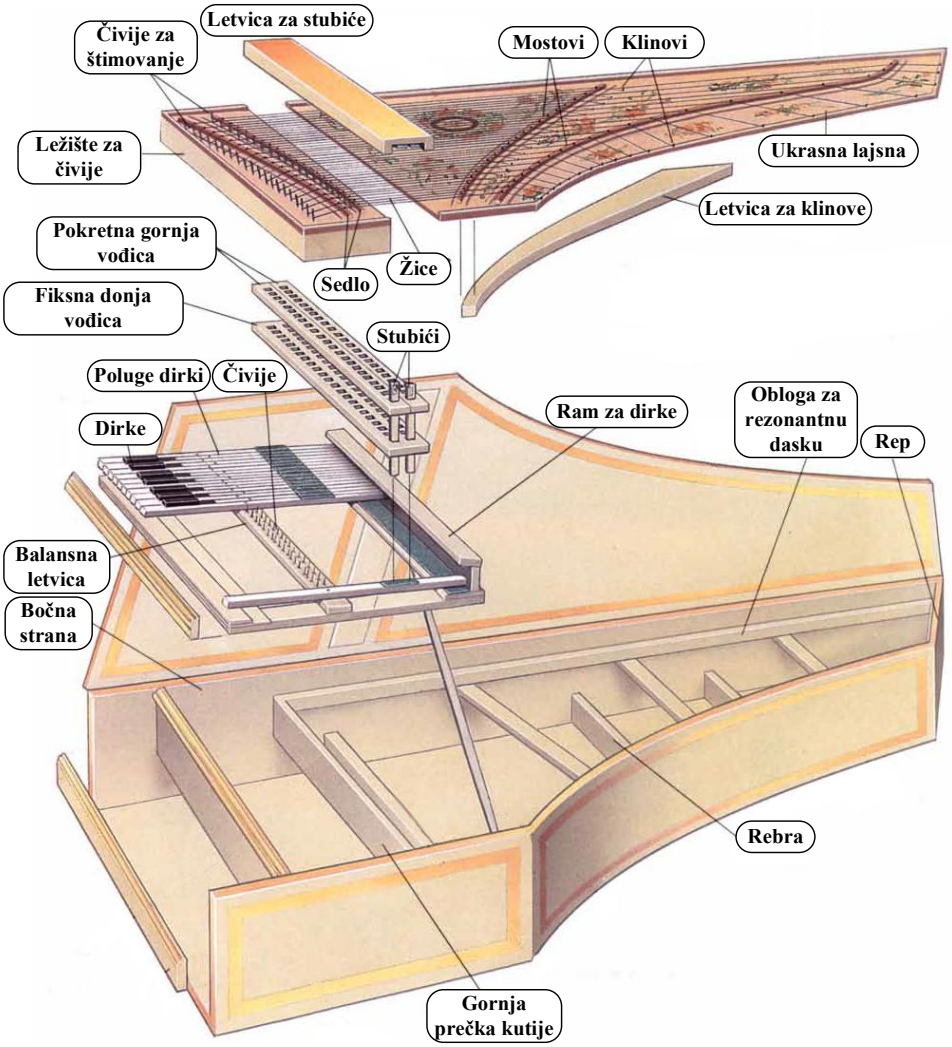
3.2 Čembalo

3.2.1. Konstrukcija instrumenta

Čembalo je predstavnik žičanih instrumenata koji po klasifikaciji nastanka zvuka spadaju u podgrupu trzanih žičanih instrumenata [49]. Trougaoni oblik, gde je kosa strana tela obično zakrivljena, kao i prisustvo klavijature, predstavljaju konstrukcijske delove koji veoma podsećaju na klavir. Klavijatura pokriva opseg od 4.5 oktava, proizvodeći tonove od A1 do F6. Građa čembala je jako kompleksna i sastoji se od mnoštva elemenata. Sa aspekta akustike i generalnih principa nastanka zvuka postoji nekoliko bitnih elemenata u građi čembala a to su: rezonantna ploča, mostovi, ležište za čivije (eng. *wrest plank*), kao i klinovi odnosno spojnice (eng. *hitch pins*). Rezonantna ploča je veoma tanka između 2 do 4 mm i najčešće se pravi od smrče ili čempresa. Dodatno je ojačana sa nekoliko rebara, koja su postavljena tako da ostavljaju trapezoidne oblasti slobodne za vibraciju. Kao i kod ostalih žičanih instrumenata glavna funkcija rezonantne ploče je da pojača zvuk nastao vibracijom žica. Na slici 3.5 prikazana je slika konstrukcije čembala na kojoj su označeni pomenuti delovi.

Žičani sistem čembala sadrži niz elemenata koji omogućavaju efikasno prenošenje vibracija sa žica na rezonantnu ploču. Svaka žica je namotana oko čivije za štimovanje (eng. *tuning pin*), koja je pričvršćena za čvrst drveni blok poznat kao ležište za čivije [50]. Zatim se žica pruža pod blagim uglom i prelazi preko mesingane igle postavljene na drvenom elementu poznatom kao sedlo (eng. *nut*). Sedlo je takođe učvršćeno na ležištu za čivije i određuje tačnu dužinu aktivnog dela žice

koji osciluje. Nakon toga, žica prelazi preko zakrivljenog mosta koji je učvršćen za rezonantnu ploču. Most ima ulogu kao kobilica kod gudačkih muzičkih instrumenata, jer prenosi vibracije žice na rezonantnu ploču što doprinosi čujnosti vibracija žice. Pre nego što dođe do kraja, žica se savija oko još jedne mesingane igle kako bi bila dodatno usmerena i napeta, i zatim se učvršćuje za klin koji se nalazi u okviru unutrašnje ivice kućišta [50].



Slika 3.5 Konstrukcija čembala [25]

Žice čembala su organizovane u setove koji se nazivaju registri. Uobičajeno, čembalo poseduje dva do četiri seta žica, najčešće u konfiguraciji od dva osmostopska (8′) i jednog četvorostopskog (4′) registra [50]. Žice od 8′ obuhvataju skoro ceo frekvencijski opseg instrumenta, od basova do visokih tonova, i prostiru se preko celokupne dužine rezonantne ploče. Četvorostopske žice (4′) nalaze se ispod njih, počinju otprilike od sredine ploče, imaju vlastito sedlo i most, i završavaju na zakrivljenom drvenom nosaču zalepljenom sa donje strane rezonantne ploče. Kod retkih i većih instrumenata može se naći i šesnaestostopski (16′) registar. Razlog za postojanje dva 8′ registra je u različitim tačkama okidanja žice. Zbog toga se nazivaju “zadnji” i “prednji” 8′ registar, pri čemu “zadnji” označava set kod kojeg je tačka okidanja udaljenija od sedla (i izvođača), a “prednji” se okida na poziciji bližoj izvođaču. Time se postižu različita spektralna svojstva tona čembala koja doprinose boji tona, ali i dinamici izvođenja [56].

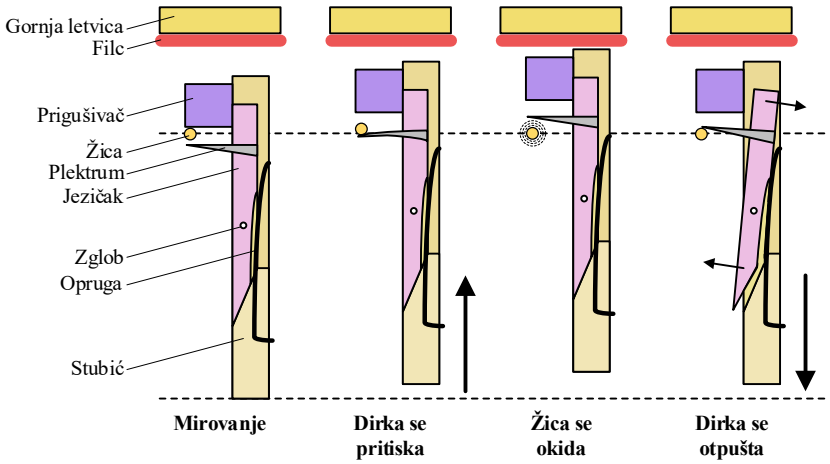
Osmostopski registri štimuju se u unisonu, odnosno štimuju se tako da oba registra proizvode isti ton. Četvorostopski registar proizvodi ton za oktavu više, a šesnaestostopski registar ton za oktavu niže. Opseg osnovnih frekvencija tonova koje proizvode žice osmostopskog (8′) registra kreće se od približno 50 Hz do 1.5 kHz, dok četvorostopski (4′) registar proširuje gornji kraj opsega do oko

3 kHz. Čembala koja poseduju i šesnaestostopski (16′) registar mogu da proizvedu niže tonove frekvencija do približno 25 Hz. Svaki registar ima svoj niz žica i sopstveni mehanizam koji ih pobuđuje na oscilovanje. Kod čembala koji imaju dve klavijature (manuala), prednji 8′ registar obično je povezan sa gornjom klavijaturom, a zadnji 8′ registar sa donjom, dok se 4′ registar najčešće koristi iz donje klavijature. Funkcija 4′ registra je da doda svetlinu i sjaj zvuku, bilo da se koristi samostalno, ili u kombinaciji sa jednim ili oba 8′ registra [56]. Kombinacije registara se biraju mehanizmom za uparivanje (polugom, dugmetom ili pedalom), što omogućava izvođaču da menja boju tona i dinamiku prilikom sviranja [56].

Za razliku od klavira gde se pojedini tonovi proizvode udarom dve ili tri žice, kod čembala se okidanjem jedne žice dobija jedan ton. Za tonove iz visokog registra koriste se žice koje su od niskougljeničnog čelika, dok se za tonove iz nižeg registra preferiraju mesingane žice koje se odlikuju većom gustinom, ali su samim tim i manje otporne na tenziju. Često se primenjuju dve vrste legura: crveni mesing (90% bakar, 10% cink) za ekstremno niske tonove i žuti mesing (70% bakar, 30% cink) za tonove iz srednjeg frekvencijskog opsega [36]. U istorijskim instrumentima, debljina žica varirala je od oko 0.2 mm za najviše tonove, do 0.7 mm kod tonova najnižih frekvencija [50]. Žice u 4′ registru su još tanje, dok one u 16′ registru moraju biti znatno deblje da bi zadržale stabilnu tenziju. Zbog ovako malih prečnika i manjih tenzija, krutost žica kod čembala je vrlo niska.

3.2.2. Mehanizam stvaranja zvuka

Mehanizam nastanka zvuka kod čembala zasniva se na jednostavnom, ali sofisticiranom principu okidanja žica pomoću plektruma. Kada svirač pritisne dirku, njen zadnji kraj se podiže, a time i stubić (eng. *jack*) – uspravna drvena letvica koja se nalazi neposredno iznad zadnjeg kraja svake dirke. Na vrhu stubića nalazi se mali, savitljiv jezičak postavljen na zglobu, koji omogućava da se pri povratku stubića naniže izbegne ponovno okidanje žice. U jezičku je usađen plektrum, ranije izrađivan od pera vrane ili gavrana, a danas najčešće od savremenih polimera poput delrina ili celkona, koji kombinuju čvrstinu i elastičnost [50]. Na slici 3.6 je prikazan mehanizam stvaranja zvuka kod čembala.



Slika 3.6 Skica mehanizma za stvaranje zvuka kod čembala

Kada se stubić podigne, plektrum zakači žicu, savija je i zatim je oslobađa, što proizvodi jasan i precizan početak uzlazne ivice tona karakterističan za čembalo. Vibracije koje tada nastaju prenose se na most, a zatim na rezonantnu ploču koja ih pojačava posredstvom zvučne kutije. Tokom pritiska na dirku, prigušivač, mali komad filca postavljen na vrh stubića, podignut je iznad žice omogućavajući da vibracije nesmetano traju. Kada se dirka otpusti stubić pod dejstvom gravitacije pada nazad, plektrum zahvaljujući zglobnom jeziku klizi ispod žice bez dodira, a prigušivač se spušta i trenutno zaustavlja vibraciju što dovodi do prekidanja tona [50].

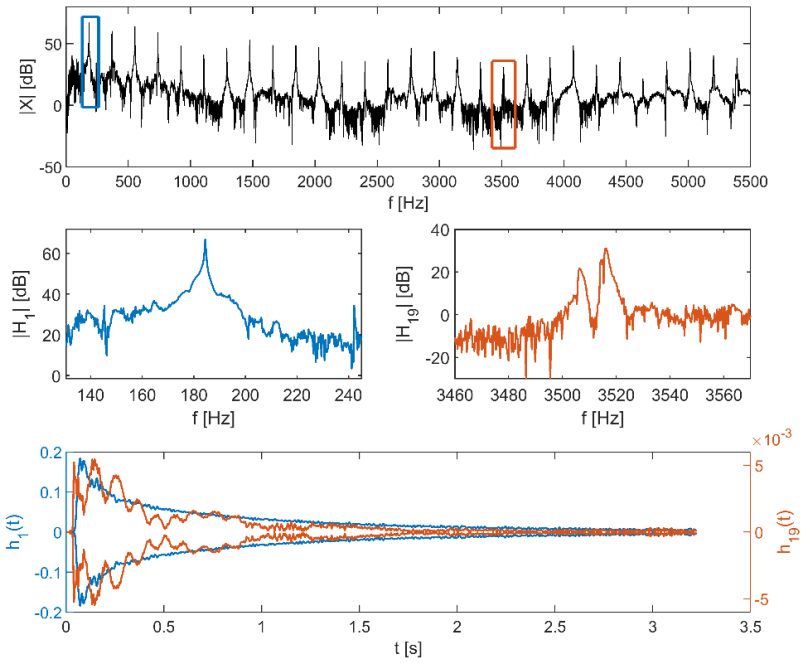
Kod čembala sa više registara, svaka dirka može imati više stubića – po jedan za svaki set žica. Stubići su postavljeni u klizne letvice, koje se mogu pomerati ulevo ili udesno kako bi se uključili ili isključili

određeni registri. Kod dvomanualnih čembala, redovi stubića su orijentisani u suprotnim pravcima – jedan okida žice sa leve strane, a drugi sa desne – omogućavajući različite tačke okidanja i time bogatije spektralne osobine zvuka. Upravo različite pozicije okidanja žice u različitim registrima imaju uticaj na tonalni balans zvuka. Kod tonova nižih frekvencija odnos mesta okidanja žice i ukupne dužine žice je manji, što dovodi do bogatije harmonijske strukture, povećava razvoj parcijala i pomera energetski balans ka višim parcijalima tona [36]. Samim tim kod bas tonova viši parcijali se bolje čuju u odnosu na osnovu frekvenciju tona. Suprotno tome, kod tonova čija je osnovna frekvencija viša i nalaze se u drugoj polovini klavijature, plektrum zahvata žicu pri kraju njene dužine, čime povećava odnos okidanja žice i njene ukupne dužine. Zbog toga se broj izraženih parcijala i njihova snaga smanjuje, dajući mekši zvuk. Na ovaj način postignuto je da je subjektivna jačina i kvalitet zvuka ujednačena za ceo opseg čembala.

Zbog svoje konstrukcije, dinamika sviranja na čembalu ne može se regulisati jačinom pritiska dirke, za razliku od klavira. Varijacije u glasnoći postižu se isključivo uključivanjem i isključivanjem različitih registara tokom sviranja, dok je konstrukcija instrumenta odgovorna za ujednačenost jačine zvuka**.** Kod modernih čembala, jačina zvuka je skoro ujednačena kroz ceo opseg od 4 i po oktave, sa prosečnim vrednostima oko 70 dB(A) za 8′ registar i 68 dB(A) za 4′ registar, dok kombinacija oba registra daje oko 72 dB(A). Ova ujednačenost postiže se izborom dimenzija i materijala rezonantne ploče, prečnika i dužine žica, kao i položaja trzanja. Pored tonalnog balansa, važan aspekt sa stanovišta akustike je i vreme trajanja tona (eng. *decay time*). Vreme trajanja tona kod čembala kao i kod svih žičanih instrumenata zavisi od količine energije koju žica dobija prilikom trzanja i brzine gubitka te energije kroz vazduh i rezonantnu ploču. Merenjem je pokazano da se vreme trajanja tona smanjuje sa porastom visine tona, tako da najniži tonovi 8′ registra traju dvostruko duže u odnosu na više tonove istog registra. Vreme trajanja tonova iz 4′ registra je manje, to jest oni brže opadaju, pa tako niži tonovi iz 4′ registra traju do oko 4 puta duže od viših tonova iz istog registra [36].

3.2.3. Čembalo sa stanovišta signala

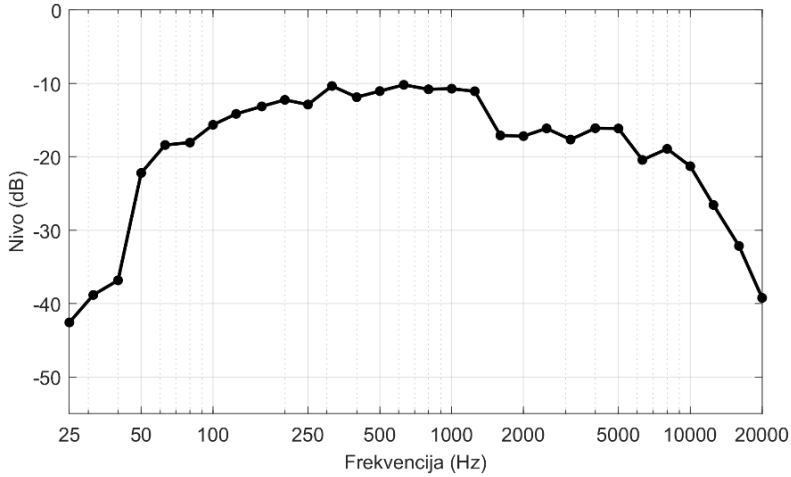
Analogno prikazu za klavir, u ovom potpoglavlju prikazan je spektar pojedinačnog tona čembala sa karakterističnim vremenskim obvojnicama parcijala, kao i dugovremeni spektar instrumenta. Na slici 3.7 prikazan je ton G3, gde prvi red slike sadrži amplitudski spektar, drugi red sadrži uvećane regione oko prvog i devetnaestog parcijala, dok su u trećem redu prikazane odgovarajuće vremenske obvojnice parcijala.



Slika 3.7 Spektar tona G3 odsviranog na čembalu sa prikazom vremenske obvojnice prvog i devetnaestog parcijala

Radi preglednosti slike spektar signala je ograničen na 5.5 kHz, mada ton G3 poseduje istaknute parcijale i do 15 kHz. U okviru prikazanog opsega vidi se 29 parcijala, dok ton G3 sadrži ukupno oko 70 prominentih parcijala. Kao i kod klavira, i kod čembala je prisutna blaga spektralna obvojnica gde je svaki 6. parcijal slabiji. To je neposredna posledica mesta pobude, to jest mesta na kom plektrum okida žicu. U drugom redu slike 3.7 prikazan je uvećani prikazi prvog i devetnaestog parcijala tona G3. Posmatranjem devetnaestog parcijala uočavaju se dve spektralne komponente, gde levi vrh odgovara fantomskom parcijalu, a desni vrh inharmoničnom parcijalu tona. Za razliku od klavira, amplituda fantomskog parcijala kod čembala je primetno manja od amplitude susednog inharmoničnog parcijala. Treći red prikazuje vremenske obvojnice 1. i 19. parcijala. Obvojnica 1. parcijala predstavlja tipičan vremenski razvoj tona čembala, dok se obvojnica 19. parcijala značajno razlikuje usled prisustva frekvencijski bliskog fantomskog parcijala. Iako je amplitudski manji od inharmoničnog parcijala, doprinos fantomskog parcijala je evidentan u vremenskoj obvojnici 19. parcijala.

Koristeći proračun koji je opisan u potpoglavlju 3.1.3 izračunat je dugovremeni spektar čembala i prikazan na slici 3.8. Sa slike se može uočiti da je energija tonova čembala relativno ujednačena u širokom frekvencijskom opsegu, približno od 50 Hz do 10 kHz.



Slika 3.8 Dugovremeni spektar čembala

Ovakva raspodela je u skladu sa opažanjem da spektri tona obuhvataju vrlo veliki broj istaknutih parcijala (oko 70 za ton G3). Takođe, veliki broj istaknutih parcijala u spektru posledično generiše zvonak i svetliji zvuk, koji predstavlja prepoznatljivu boju čembala. Visokofrekvencijski sadržaj koji se održava do 10 kHz može se povezati sa načinom pobude i konstrukcijom. Trzaj plektrumom predstavlja kratku i impulsivnu pobudu koja generiše spektar bogat parcijalima na višim frekvencijama. Takođe, rezonantna ploča izgrađena od tanjeg drveta obezbeđuje manje neprilagođenje po impedansi sistema rezonantna ploča-most-žica. Zbog toga je prenos i zračenje visokih parcijala efikasnije nego kod masivnijih konstrukcija [57]. Samim tim i energija na višim frekvencijama je izraženija u dugovremenom spektru.

3.3 Harfa

3.3.1. Konstrukcija instrumenta

Harfa je predstavnik žičanih instrumenata koji po klasifikaciji nastanka zvuka poput čembala spadaju u podgrupu trzanih žičanih instrumenata [49]. Harfa je specifičan instrument koja poseduje trostrani okvir, visok oko 180 cm sa nizom žica razapetim pod uglom na rezonantnu ploču. Na slici 3.9 prikazana je koncertna harfa sa prednje i zadnje strane. Okvir harfe se sastoji iz 5 delova. Osnovu instrumenta čini postolje, koje se naziva pedalijera, jer su u njegovim stepenastim prorezima smeštene pedale za preštimavanje. Normalno na postolje postavljen je šuplji stub kroz čiju unutrašnjost prolaze čelične poluge. One povezuju pedale sa gornjim delom mehanizma za preštimavanje.

Slika 3.9 Konstrukcija koncertne harfe (prednja i zadnja strana instrumenta) [58]

Drugi krak okvira čini rezonantno telo. Kod koncertne harfe ono je šuplje, gde je leđna strana zaobljena i usmerena nadole. Kod savremenih koncertnih harfi leđna strana se najčešće izrađuje slojevitom strukturom od četiri lista furnira bukve, breze ili javora koji se polažu preko kalupa. Preko njih dolazi dekorativni furnir od tvrdog drveta (npr. mahagonij, trešnja, orah) [51]. Ukupna debljina takve laminirane strukture je oko 10 mm. Unutar zadnje strane rezonantne kutije nalaze se rebra u obliku latiničnog slova U koja sprečavaju preveliku fleksiju rezonantne kutije pod naponom žica. Rebra su najčešće izrađena od bukve, aluminijuma, nekad čak i čelika [36]. Takođe, na zadnjoj strani rezonantne kutije obično se nalazi 4 ili 5 zvučnih otvora. Njihova primarna funkcija je pristup radi ugradnje ili zamene žica. Međutim ti otvori imaju i izvestan akustički efekat. Grupa Francuskih naučnika bavila se vibroakustičkim istraživanjima niskofrekvencijskog odziva rezonantne kutije koncertne harfe [59]. Cilj istraživanja je bio usmeren na vezu između kretanja vazduha u rezonantnim otvorima i pomeranja rezonantne ploče kako bi se identifikovali modovi rezonantne kutije na nižim frekvencijama. Od prvih 6 modova, modovi pod brojevima 4 i 6 povezani su sa kretanjem vazduha kroz rezonantne otvore. Pokazano je da ispod 150 Hz rezonantna ploča se kreće ka spolja, dok se vazduh kreće ka unutra (i obrnuto), a iznad 200 Hz rezonantna ploča i vazduh kreću se istovremeno kako ka spolja tako i ka unutra [59].

Gornja površina rezonantne kutije je rezonantna ploča koja ima laminiranu strukturu koja se sastoji od dva sloja i trapezoidnog je oblika. Debljina ploče je promenljiva i kreće se od oko 4.7 mm pri dnu, gde se nalaze žice koje proizvode tonove nižih frekvencija, do oko 2.5 mm pri vrhu, gde se nalaze žice koje proizvode tonove viših frekvencija [51]. Prvi sloj se izrađuje od oko 15 uskih daščica rezonantnog drveta, gde se daščice lepe tako da se dobije specifičan nagib (deblje u zoni bas žica uz postepeno stanjivanje ka žicama viših frekvencija). Drugi sloj se kreće od ose u kojoj se nalaze žice prema ivici. U unutrašnjoj strani ploče, na njenom centru, nalazi se letvica koja izgrađena od tvrdog drveta (bukva) i na nju se vezuje donji kraj žica.

Treću stranu trougaonog okvira harfe čini drveni vrat. Vrat ima dve funkcije, da pričvrsti žice za okvir harfe i da zaštiti mehanizam preštimavanja koji povezuje žice sa pedalama. Kroz vrat su povučene čivije koje su metalni zavrtnji. Oni drže gornje krajeve žica. Same žice su zakačene sa leve strane, a sa desne strane se nalaze čivije koje se posebnim ključem mogu opuštati ili zatezati. Na taj način se podešava osnovno štimovanje žica [49]. Takođe, na levoj strani vrata pričvršćena je i mesingana ploča

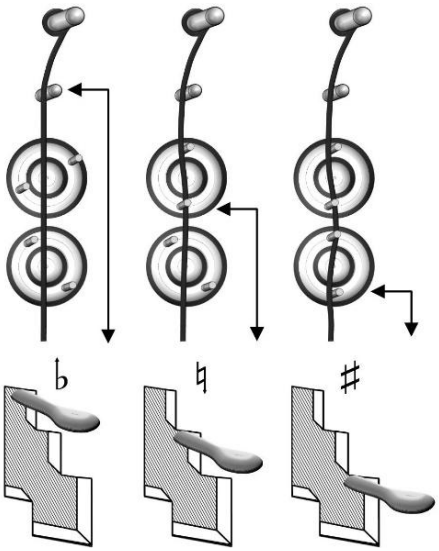
radi povećanja mehaničke nosivosti za zatezanje žica. Sila kojom su žice zategnute kreće se između 700 i 1400 N, u zavisnosti od položaja žice na vratu, njene dužine, prečnika i materijala.

Savremena koncertna harfa ima 46 do 48 žica, gde se standardom smatra harfa od 47 žica koja obuhvata tonski opseg od 6.5 oktava (od Ces1 do Ges7). Žice koncertne harfe izgrađene su od tri različite vrste materijala i to od: čelika obmotanog bakrom, creva i najlona. Dvanaest najdužih žica koje odgovaraju tonovima iz bas registra (od Ces1 do As2) imaju čelično jezgro obmotano bakrom. Tonovima od As2 do Es6 odgovaraju žice koje su izgrađene od creva, dok tonovima od Fes6 do Ges7 odgovaraju žice izgrađene od najlona. S obzirom na veliki broj žica orijentacija izvođača u tolikom nizu žica olakšana je time što su sve C žice obojene u crveno, a F žice obojene plavom bojom.

3.3.2. Mehanizam stvaranja zvuka

Harfa je po osnovnom štimovanju dijatonski instrument, za razliku od klavira i čembala koji spadaju u hromatske instrumente. Dijatonska lestvica predstavlja lestvicu od 7 tonova, koji imaju međusobne razmake od stepena ili polustepena, u zavisnosti da li su durske ili molske. U tom smislu, dijatonski instrument podrazumeva da se kod njega bez dodatne mehaničke intervencije mogu dobiti tonovi koji odgovaraju isključivo jednoj dijatonskoj lestvici. Međutim, dijatonskim štimovanjem ne mogu se proizvesti hromatski tonovi i ostvariti brze modulacije. Zbog toga je kod koncertne harfe razvijen pedalni mehanizam preštimavanja koji proširuje tonske mogućnosti bez povećanja broja žica.

Gornji deo mehanizma za preštimavanje nalazi se između dve mesingane ploče koje se nalaze na vratu harfe. Poluge ovog mehanizma, koje su sa pedalama u postolju povezane kroz stub harfe, pokreću sistem od 90 bakarnih koturića postavljenih u dvostrukom nizu na spoljnoj levoj strani mosta. Svaki koturić ima po dva mala klina između kojih prolazi žica, a svaku od 47 žica harfe zahvataju po dva takva koturića. Jedino najniže dve žice koje odgovaraju tonovima Ces1 i Des1 nemaju ove koturiće. Ovi tonovi se ređe upotrebljavaju, te tako izvođači pre sviranja naštimuju te dve žice pomoću ključa na odgovarajuće tonske visine koje se pojavljuju u muzičkom delu. Na slici 3.10 prikazan je opisani sistem za preštimavanje žica na harfi. Pored koturića, na slici se može se uočiti da u postolju harfe postoje 3 stepenasta proreza, koji označavaju da se pedale mogu postaviti u tri različita položaja.



Slika 3.10 Sistem preštimavanja žica na harfi

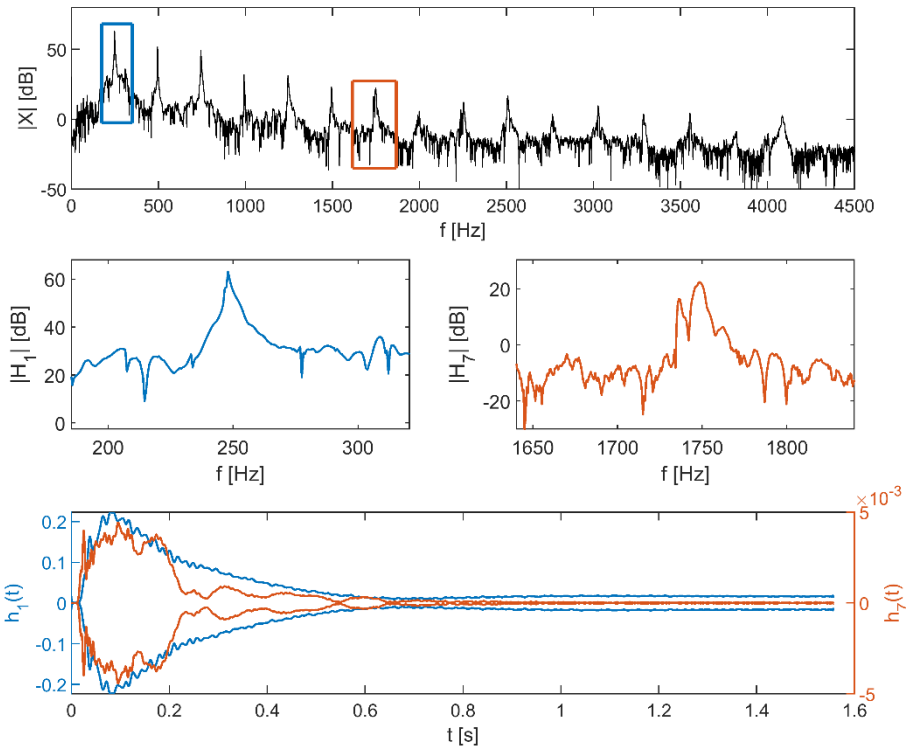
Kada se pedala nalazi u gornjem položaju, ona je opuštena i ne deluje na gornji mehanizam koturića. Tada klinovi koturića ne dotiču žicu i ona slobodno osciluje celom svojom dužinom. Ako se pedala pritisne i prebaci u srednji položaj, takva akcija aktivira polugu koja okreće gornji od dva koturića za toliko da samo njemu pripadajući klinovi zahvate žicu. Time se aktivna dužina žice skraćuje, pa žica daje ton viši od osnovnog štimovanja za pola stepena. Pomeranjem u donji položaj, pedala pokreće

posredstvom poluga i donji koturić, te njegovi klinovi skraćuju još više dužinu žice i povise joj ton za još pola stepena. Opisanim postupkom na svakoj od žica može se dobiti 3 različite tonske visine. Bitno je napomenuti da jedna pedala mehanizmom zahvata istovremeno žice istoimenih tonova u svim oktavama (npr. E1, E2, E3 sve do E7) i zahvaljujući mehanizmu za preštimavanje njihove hromatske varijante (Es1 do Es7 i Eis1 do Eis7). Time je broj pedala sveden na 7. Pedale su raspoređene naspram leve i desne noge svirača i nose ime žica. Osnovno štimovanje harfe je dijatonski Ces-dur. Za ostvarenje te lestvice moraju sve žice da osciluju slobodno, celom dužinom, odnosno sve pedale moraju biti u gornjem položaju. Ako su sve pedale u srednjem položaju, dobija se C-dur, a donji položaj svih pedala daje Cis-dur. Kombinacijom različitih položaja pojedinih pedala harfa se može naštimovati na bilo koju drugu lestvicu, osim naravno hromatske.

S obzirom da harfa spada u trzane žičane instrumente mehanizam stvaranja zvuka se zasniva na okidanju žice prstima, pri čemu se vibracije žice prenose na telo instrumenta koje tu energiju zrači u vazduh. Za razliku od drugih žičanih instrumenata gde se žice nalaze paralelno sa rezonantnom pločom, harfa je specifična po tome što se žice nalaze pod uglom od 30 do 40° u odnosu na rezonantnu ploču [50]. Posledica takve konstrukcije jeste da prilikom pobuđivanja žice, njene longitudinalne vibracije mogu znatno efikasnije da pobude rezonantnu ploču instrumenta [26]. Još jedna od posledica geometrije jeste da nakon okidanja žice njene vibracije poprimaju rotaciono-eliptično kretanje jer se frekvencije oscilovanja neznatno razlikuju u pravcima normalnim i paralelnim na ravan rezonantne ploče [51]. Na taj način razvija se vrtložna putanja, što je eksperimentalno pokazano u [36] u uslovima fluorescentnog osvetljenja. Drugi fizički fenomen povezan je sa velikim brojem međusobno bliskih žica koje su spregnute preko rezonantne ploče. Među njima se javljaju interakcije zbog kojih vibracije pobuđene žice indirektno pobuđuju i druge žice čije su sopstvene rezonance u harmonijskom odnosu sa osnovnom frekvencijom pobuđene žice. Takve vibracije nazivaju se simpatetički modovi. Oni obogaćuju ton harfe čineći ga toplijim i predstavljaju jedno od njenih prepoznatljivih obeležja [60], [61]. Takođe, pozicija okidanja žice određuje kako dinamiku izvođenja tako i boju tona koji se proizvodi. Žice se najčešće okidaju na rastojanju između jedne trećine i jedne polovine dužine žice od rezonantne ploče ka vratu, ali ukoliko je potrebno da se proizvede zvuk sličniji gitari žica se okida bliže rezonantnoj ploči [36]. Promenom sile okidanja žice harfista oblikuje dinamiku izvođenja, ali, između ostalog, dinamika zavisi i od položaja prsta. Trzaj bliže sredini prvog zgloba prsta daje topliji ton, dok trzaj bliži vrhu prsta daje svetliji i glasniji ton [51]. Zbog pomenutih finesa u izvođenju, poznato je da različiti izvođači mogu proizvesti specifičan zvuk na istom instrumentu i da se uprkos tome izvođač može prepoznati po sopstvenom stilu i tehnici. Istraživanjem okidanja žice harfe i njenih posledica bavila se grupa naučnika na čelu sa Chadefaux [37], [62].

3.3.3. Harfa sa stanovišta signala

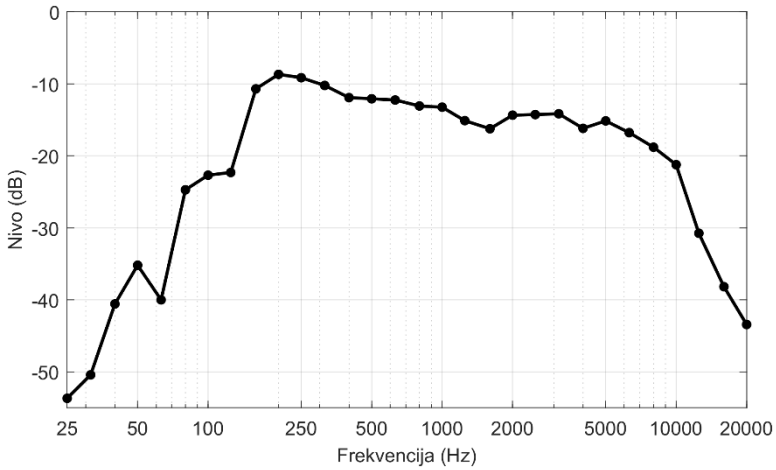
U ovom potpoglavlju izvršena je vremensko-frekvencijska analiza tipičnog tona harfe, kao i analiza dugovremenog spektra dobijenog za ceo njen frekvencijski opseg. Na slici 3.11 prikazan je ton Ces4, gde prvi red slike sadrži amplitudski spektar tona, drugi red prikazuje uvećane regione oko prvog i sedmog parcijala, dok su u trećem redu prikazane odgovarajuće vremenske obvojnice parcijala. Na osnovu spektra signala možemo primetiti samo 15 istaknutih parcijala, pri čemu poslednjih 5 je znatno manje izdignuto iz šuma u odnosu na prvih 10. Za razliku od klavira i čembala koji imaju prepoznatljive spektralne obvojnice, za koje je pokazano da ih odlikuje pad amplitude svakog n-tog parcijala (gde je n redni broj parcijala koji odgovara poziciji na kojoj se udara/okida žica), harfa nema takvu spektralnu obvojnicu. Razlog tome leži u njenoj specifičnoj geometriji, gde se žice harfe nalaze pod uglom na rezonantnu ploču. To je razlog što će žica, iako pobuđena na transverzalno oscilovanje u ravni normalnoj na ravan žice, razviti drugačije kretanje u odnosu na klavir ili čembalo čije se žice nalaze u ravni sa rezonantnom pločom.



Slika 3.11 Spektar tona Ces4 odsviranog na harfi sa prikazom vremenske obvojnice prvog i sedmog parcijala

U drugom redu slike 3.11 nalaze se uvećani prikazi prvog i sedmog parcijala tona Ces4. Kao i kod klavira i čembala, posmatranjem sedmog parcijala uočavaju se dve spektralne komponente, frekvencijski jako bliske, gde leva komponenta odgovara fantomskom parcijalu, a desna komponenta inharmoničnom parcijalu. U ovom slučaju amplituda fantomskog parcijala je niža u odnosu na amplitudu inharmoničnog parcijala. Treći red slike 3.11 prikazuje vremenske obvojnice 1. i 7. parcijala, gde se i kod harfe, kao i kod druga dva opisana instrumenta, obvojnice značajno razlikuju.

Procedurom detaljno opisanom u slučaju klavira izračunat je dugovremeni spektar harfe i prikazan na slici 3.12. U opsegu od 25 do 125 Hz ne postoji izražena energija, kao što je u slučaju kod klavira i čembala. To se može pripisati manjoj efektivnoj površini i masi rezonantne ploče, kao i drugačijoj sprezi žica sa rezonantnim telom, što smanjuj efikasnost zračenja na niskim frekvencijama. Istovremeno, izraženo prisustvo simpatetičkih modova doprinosi održavanju energije u srednjem i višem frekvencijskom opsegu. Shodno tome, dugovremeni spektar harfe u opsegu od 250 Hz do 10 kHz ostaje relativno ujednačen, uz postepen pad ka višim učestanostima.

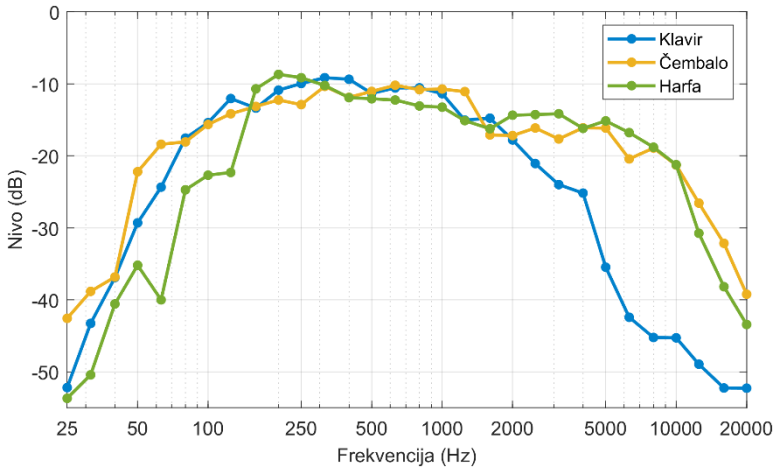


Slika 3.12 Dugovremeni spektar harfe

3.4 Zaključak

U ovom poglavlju prikazani su najvažniji aspekti klavira, čembala i harfe relevantni za ovu disertaciju prikupljeni iz literature. Radi objedinjavanja podataka o konstrukciji instrumenta, mehanizmu generisanja zvuka i prethodno navedenim spektralnim fenomenima (inharmoničnost i fantomski parcijali), izvršena je uporedna analiza kroz objedinjeni prikaz dugovremenih spektara sva tri instrumenta (slika 3.13), kao i kroz tabelu sa parametrima reprezentativnim za ovu analizu.

Prikazani dugovremeni spektri na slici 3.13, izračunati su svi na identičan način opisan u potpoglavlju 3.1.3. Sva tri instrumenta dele prepoznatljiv obrazac, gde je energija najkonzistentnije raspoređena u srednjem frekvencijskom opsegu između oko 100 Hz do otprilike 2 kHz, a ka višim učestanostima sledi energetski pad. Međutim, upravo nagib energetskog pada ka višim frekvencijama i granica do koje je prisutna značajna energija zvuka razlikuju se kod tri posmatrana instrumenta. Te razlike određuju boju tona instrumenta.



Slika 3.13 Prikaz dugovremenih spektara klavira, čembala i harfe

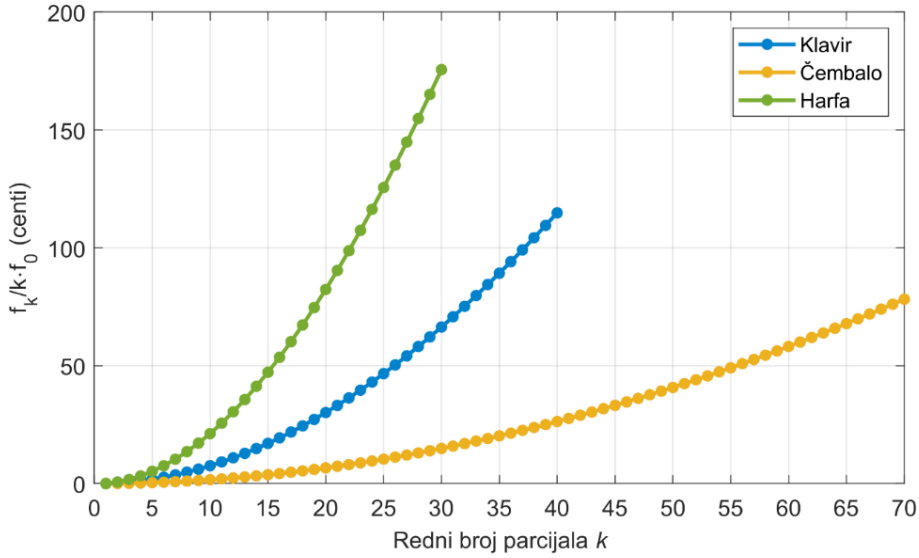
Dugovremeni spektar klavira pokazuje dominantu energiju na niskim i srednjim frekvencijama, dok ima najstrmiji pad ka višim frekvencijama počevši od 2 kHz do 5 kHz. Ovakva raspodela energije je mehaničko-akustički uslovljena iz dva razloga. Prvi razlog je neprilagođenje impedansi između sprege rezonantna ploča-most-žica, što doprinosi tome da prenos energije sa žice na telo nije efikasan. Jedan od načina kako bi se poboljšalo sprezanje žice sa rezonantnom pločom je povećanje prečnika a samim tim i mase žice, čime bi se smanjilo neprilagodjenje impedansi, ali bi istovremeno povećalo inharmoničnost. Da do toga ne bi došlo, kod klavira u višem registarskom opsegu postoje dve ili tri žice koje zajedno generišu ton, što predstavlja drugi razlog za strmi energetski pad na višim frekvencijama. Kada čekić udari tri žice, one u početku vibriraju u fazi i na most deluju normalnim silama iste faze, i tada je prenos energije maksimalan. Međutim, pošto žice nisu štimovane unisono već sa malim frekvencijskim razlikama, one ubrzo izlaze iz faze, smanjuju rezultantnu silu na mostu i brzina opadanja visokih frekvencija postaje manja.

Za razliku od klavira, čembalo poseduje najpostojaniji visokofrekvencijski sadržaj koji je prisutan sve do 10 kHz, a zatim ima blagi pad ka 20 kHz. Uzrok za takvu raspodelu energije leži pre svega u načinu stvaranja zvuka. Pobuda kojom plektrum čembala okine žicu je kratka i impulsna i samim tim generiše veliki broj spektralnih komponenti. Sa druge strane, laka drvena rezonantna ploča omogućava bolje prilagođenje impedansi između rezonantne ploče i žica. Time je omogućeno lakše prostiranje viših frekvencija. Takođe, zbog velikog broja parcijala prisutnih u tonovima čembala, boja njegovog tona je karakteristična, svetlija i zvonkija u odnosu na klavir.

Dugovremeni spektar harfe odlikuje se dominantnom energijom na srednjim frekvencijama sve do 5 kHz, kada počinje blagi energetski pad. Na višim frekvencijama od 5 do 20 kHz, energetski pad prisutan u dugovremenom spektru harfe nešto je strmiji od energetskog pada čembala. Posledica

takve raspodele je što se harfa pobuđuje prstima, što povlači za sobom duži kontakt pri pobudi žice (samim tim smanjuje se impulsnost pobude) i jagodice prstiju kojima se žica okida mekše su u odnosu na plektrum čembala. Međutim, specifična građa harfe, gde se žice nalaze pod uglom u odnosu na rezonantnu ploču, doprinosi da žice kreiraju eliptičko kretanje čime pobuđuju kako transverzalne tako i longitudinalne vibracije žice efektnije u odnosu na klavir i čembalo. Zbog toga, a i zbog karakterističnih simpatetičkih modova dugovremeni spektar harfe ima zavidno veću energiju na višim frekvencijama u odnosu na klavir. Jedini nedostatak koji se uočava u dugovremenom spektru harfe, jeste manjak energije na nižim frekvencijama što je direktna posledica manjeg rezonantnog tela harfe u odnosu na klavir i čembalo.

Pored dugovremenih spektara važno je istaći da sva tri instrumenta ispoljavaju inharmoničnost parcijala, što je najlakše uočiti posmatranjem pojedinačnog tona kroz zavisnost odnosa f_k/kf_0 i rednog broj parcijala k. Na slici 3.14 prikazana je zavisnost frekvencija parcijala f_k/kf_0 u odnosu na redni broj parcijala k prikazana za tonove Ais2 (klavir), G3 (čembalo) i Ces4 (harfa) čiji su spektri prikazani na slikama 3.3, 3.7 i 3.11 respektivno. Odnos parcijala f_k/kf_0 prikazan je u centima. Ideja prikaza slike 3.14 je konceptualna sa ciljem da pokaže da frekvencije tonova klavira, čembala i harfe ne čine idealno harmoničan niz jer u tom slučaju ne bi postojale krive zavisnosti već bi prikaz činio pravu liniju. S obzirom da su pitanju tonovi različitih osnovnih frekvencija, kao i da se razlikuju po broju parcijala oni se ne mogu porediti na taj način sa stanovišta koeficijenta inharmoničnosti. Jedino se može govoriti o stepenu inharmoničnosti gde se upoređuje u okviru jednog tona odstupanje prvog od poslednjeg parcijala u centima. Te tako posmatrajući ton Ces4 odsviran na harfi uočava se da poslednji 30. parcijal odstupa za otprilike 170 centi, što je razlika od 1.5 tona unutar oktave (rastojanje dva tona unutar oktave je 100 centi). U slučaju klavira i tona Ais2, poslednji 40. parcijal odstupa od prvog parcijala za oko 100 centi što predstavlja razliku od jednog tona. Dok je odstupanje između prvog i poslednjeg parcijala, najmanje izraženo kod čembala, gde poslednji 70. parcijal odstupa oko 70 centi, što predstavlja razliku manju od tona unutar oktave.



Slika 3.14 Zavisnost frekvencija parcijala f_k/kf_0 u odnosu na redni broj parcijala k prikazana za tonove Ais2(klavir), G3 (Čembalo) i Ces4 (harfa)

Grafički prikaz inharmoničnosti prikazan na slici 3.14 otvara pitanje uzroka uočenih razlika po pitanju inharmoničnosti i koeficijenta inharmoničnosti B. Radi kvantitativnog utemeljenja, Tabela 3.1 sabira ključne konstruktivno–materijalne parametre žica za klavir, čembalo i harfu - frekvencijski opseg tonova f_0, efektivnu dužinu žice L, prečnik d, gustinu ρ, tenziju T, Young-ov moduo elastičnosti E, zajedno sa reprezentativnim vrednostima koeficijenta inharmoničnosti B. Parametri prikazani u tabeli preko relacije 2.7 direktno govore o opsegu koeficijenta inharmoničnosti B. Odnosno kod čembala da manja tenzija kojom su zategnute žice, kao i debljina žice, doprinosi i manjim vrednostima za koeficijent inharmoničnosti u odnosu na klavir. Takođe, parametri koji opisuju žice

harfe nalaze se između vrednosti karakterističnih za klavir i čembalo, što se oslikava i u opsegu vrednosti koeficijenta inharmoničnosti koji se nalazi između vrednosti klavira i čembala.

Tabela 3.1 Uporedni prikaz parametara žice i koeficijenta inharmoničnosti za klavir, čembalo i harfu

	Ton	**f_0 (Hz)**	**L (m)**	**D (mm)**	**ρ (kg/m^3)**	**T (N)**	**E (GPa)**	**B**
Klavir	A0-C8	27.5-4186	2.05-0.05	1.65-0.7	78835.23-7850	1722-576	202	10^{-5}–10^{-2}
Čembalo	Fis1-Fis6	43.6-1395.6	1.80-0.128	0.365-0.2	8746-7850	108.1-32.67	100-200	10^{-6}–10^{-4}
Harfa	Es1-Es6	38.9-1244.59	1.495-0.0168	2.7-0.7	7400-1320	557-84	6-10	10^{-5}–10^{-4}

Sve vrednosti prikazane u Tabeli 3.1 preuzete su iz literature [63], [64], [65], [66]. Vrednost koeficijenta inharmoničnosti *B* prikazane za klavir i čembalo dobijene su na osnovu algoritama za procenu inharmoničnosti. Kod harfe ove vrednosti su računate bez direktne primene automatskih procedura za procenu inharmoničnosti [36]. Pored toga što harfa u literaturi nije bila predmet razmatranja koeficijenta inharmoničnosti kroz automatske procedure za procenu, takođe sve vrednosti koeficijenta inharmoničnosti dobijene za klavir i čembalo su upitne zbog toga što algoritmi u literaturi nisu izuzimali prisustvo fantomskih parcijala iz proračuna, što i predstavlja jednu od motivacija ove doktorske disertacije.

4 Algoritmi digitalne obrade signala za analizu i sintezu inharmoničnih tonova

Analiza tonova žičanih instrumenata često je otežana različitim spektralnim artefaktima zbog čega standardne automatske procedure nisu uvek pouzdane. Dodatno, ukupno trajanje signala je vrlo kratko, a sam signal izrazito nestacionaran, sa veoma kratkim intervalima kvazistacionarnosti. U takvim slučajevima korisno je osloniti se na kontrolisane, ponekad i ručne procene ključnih parametara (npr. osnovna frekvencija tona f_0, koeficijent inharmoničnosti B, obvojnice parcijala), uz alate koji omogućavaju vizuelizaciju, izdvajanje značajnih parametara i ciljanu manipulaciju signalom. U okviru disertacije, kao jedan od rezultata, razvijen je postupak za analizu inharmoničnih tonova zasnovan na dekompoziciji signala na parcijale i analizi u potkanalima. Razvijena je dvostruko komplementarna filtarska banka sa faznom korekcijom, pogodna za ovu namenu. Kao dodatni alati digitalne obrade signala korišćeni su standardni algoritmi za obradu signala kao što su vremenski zavisna Furijeova transformacija (eng. *Short Time Fourier Transform*, STFT) i diskretna Furijeova transformacija DFT (eng. *Discrete Fourier Transform*, DFT), gde se pod STFT podrazumeva obrada, odnosno računanje spektra, po prozorima (segmentima) signala, dok se DFT koristio kao alat za procenu spektra na nivou prozora, kao i za procenu spektra celog signala. Dodatno, kao još jedan rezultat, razvijena je kompletna aplikacija koja implementira izabrane algoritme. Predložen koncept podrazumeva, a realizovana aplikacija omogućava, kvalitetnu dekompoziciju signala, izdvajanje i aproksimaciju vremenskih obvojnica pojedinačnih parcijala, kao i rad sa specifičnim parametrima poput koeficijenta inharmoničnosti B i obvojnica parcijala, koji nisu neposredno podržani u drugim aplikacijama kao što su LTFAT [67], Essentia [68] i MIRtoolbox [69]. Predložen koncept i razvijena aplikacija omogućavaju kontrolu nad potkanalnim signalima i njihovu rekombinaciju, što je naročito važno pri pripremi stimulusa za perceptivne eksperimente. Dizajn i funkcionalnosti aplikacije detaljno su prikazani u objavljenom radu koji je jedan od rezultata proisteklih iz istraživanja u okviru ove disertacije [70].

U ovom poglavlju dat je sažet pregled ključnih metoda obrade signala koje čine osnovu predloženog koncepta i razvijene aplikacije (filtarska banka, DFT/STFT, izdvajanje obvojnice Hilbertovom transformacijom, procena f_0 i B). Zatim je dat kratak opis arhitekture same aplikacije i funkcionalnosti tri modula (od inicijalne segmentacije i vizuelizacije, preko procene parametara i dizajna banke, do dekompozicije, aproksimacije obvojnica i kontrolisane sinteze i rekombinacije). Na kraju, dati su i neki indikatori koji verifikuju prikazan koncept.

4.1 Metode za obradu i analizu signala žičanih muzičkih instrumenata

U ovom potpoglavlju dat je sažet pregled glavnih metoda obrade i analize signala koje su implementirane u razvijenoj aplikaciji, sa fokusom na žičane instrumente sa izraženom inharmoničnošću. Pregled obuhvata tehnike spektralne i vremensko-frekvencijske analize (DFT/STFT), izdvajanje obvojnica Hilbertovom transformacijom, procenu osnovne frekvencije i koeficijenta inharmoničnosti B, kao i osnove dizajna i primene višekanalne (komplementarne) filtarske banke.

4.1.1. Vremenski zavisna Furijeova transformacija (STFT)

Signali koji predstavljaju snimljene tonove muzičkih instrumenata su nestacionarni signali. Za ovakve tipove signala, analizu je neophodno sprovoditi po prozorima. Obrada signala po prozorima implementirana je u aplikaciji u cilju procene spektra u funkciji vremena. Vremenski zavisna Furijeova transformacija se koristi za spektralnu analizu u sledećem obliku [71]:

$$X_{STFT}(p,e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]w[k-pR]e^{-j\omega k} \\ \sum_{l=0}^{L-1} x[l+pR]w[l]e^{-j\omega(l+pR)}, \qquad 4.1$$

gde je $w[l]$, l=0,1,…,L-1 prozorska funkcija dužine L, p je redni broj prozora, a R pomeraj sukcesivnih prozora. Pomeraj R se izražava u odbircima. Izraz 4.1 se može napisati u formi:

$$X_{STFT}(p,e^{j\omega}) = e^{-j\omega pR}\sum_{l=0}^{L-1} x[l+pR]w[l]e^{-j\omega l} \qquad 4.2$$

Analiza spektra prozorovanog signala se vrši diskretnom Furijeovom transformacijom (DFT) prema sledećem izrazu:

$$X_{STFT}[p,q] = e^{-j\frac{q}{2\pi}pR}\sum_{l=0}^{L-1} x[l+pR]w[l]e^{-j\frac{q}{2\pi}l}, q = 0,1,...,N_{fft}-1, \qquad 4.3$$

gde je N_{fft} dužina niza dobijenog diskretnom Furijeovom transformacijom. U slučaju kada je dužina DFT veća od dužine prozora, niz se dopunjava nulama (eng. *zero padding*). U nastavku poglavlja termin STFT se koristi kada se govori o vremenski zavisnoj analizi signala, dok se termin DFT koristi za analizu jednog prozora signala ili za ceo signal.

Iako postoje različite vrste prozorskih funkcija, u ovoj aplikaciji implementirane su samo Hanova i Blackman-Harrisova prozorska funkcija s obzirom da su one pogodne za spektralnu analizu muzičkih signala. Parametar R koji govori o pomaku prozora, odnosno pomeraju između dva sukcesivna prozora, izabran je na osnovu *Constant Overlap- Add* (COLA) principa [71]:

$$\begin{aligned}\sum_{p=-\infty}^{\infty} X_{STFT}(p,e^{j\omega}) &= \sum_{p=-\infty}^{\infty}\sum_{l=0}^{L-1} x[k]w[k-pR]e^{-j\omega k} = \\ \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]e^{-j\omega k}&\left(\sum_{p=-\infty}^{\infty} w[k-pR]\right) = X(e^{j\omega})\end{aligned}, \qquad 4.4$$

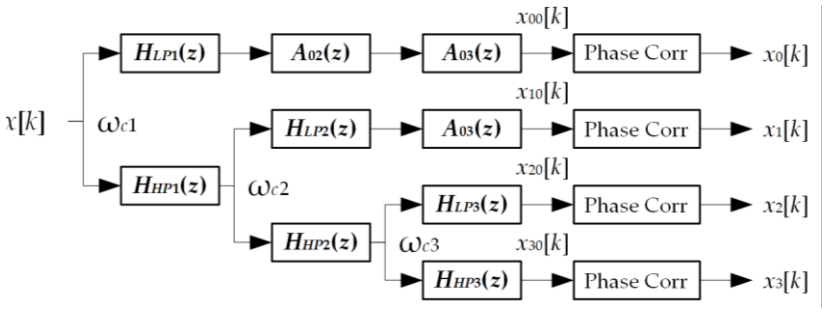
uz uslov $\sum_{p=-\infty}^{\infty} \omega[k-pR] = 1$ za svako k. Parametru R na osnovu uslova zadatog izrazom 4.4 dodeljena je vrednost 0.125, koja zadovoljava COLA kriterijum za obe prozorske funkcije. Za deo istraživanja koje je do sada realizovano, COLA kriterijum nije kritičan jer se signali ne obrađuju na nivou svakog prozora, ali su izabrane kombinacije prozorskih funkcija i vrednosti p koje zadovoljavaju kriterijum zbog mogućih daljih proširenja aplikacije dodavanjem algoritama koji podrazumevaju i modifikaciju signala po prozorima i rekonstrukciju nakon te modifikacije.

U razvijenoj aplikaciji se za vizualizaciju umesto klasičnog spektrograma koristi prikaz u kome se crtaju preklopljeni DFT nizovi koji potiču od pojedinih prozora. Razlog je taj što se STFT računa samo za ograničen broj prozora i koristi sa ciljem praćenja fluktuacije frekvencije parcijala (eng. *frequency glide*), tipično na početku signala ili u okviru nekog segmenta signala od interesa. Ukoliko se dužina prozora skrati zarad bolje rezolucije u vremenskom domenu, frekvencijska rezolucija neće biti zadovoljavajuća. Tehnike poput dodavanja nula mogu pomoći pri određivanju položaja maksimuma u spektru signala, ali ne rešavaju problem frekvencijske rezolucije. Ukoliko postoje komponente koje su frekvencijski veoma bliske njih je veoma teško razdvojiti. Kombinacija predloženih tehnika obrade signala, kao što su prozorovanje signala, preklapanje susednih prozora i dopunjavanje nulama, predstavlja, kao što je poznato iz teorije STFT transformacije, kompromis između vremenske i frekvencijske rezolucije. Ovakav pristup analizi signala nije potpuno pogodan za analizu snimljenih tonova žičanih muzičkih instrumenata sa izraženom inharmoničnošću jer su oni po svojoj prirodi kratki i nestacionarni signali. Kako je objašnjeno u Poglavlju 2.2,u spektru signala sa izraženom inharmoničnošću, gotovo uvek su prisutni fantomski parcijali koji su u određenim situacijama veoma blizu inharmoničnih parcijala. Zbog toga je problem razdvajanja bliskih komponenti u spektru značajan. Predloženim konceptom obrade signala i aplikacijom razvijenom u okviru ove doktorske disertacije, problem se delimično rešava istovremenim posmatranjem

vremenskih obvojnica signala i spektra signala koji odgovaraju uskom frekvencijom opsegu koji je centriran oko pozicija inharmoničnih parcijala.

4.1.2. Dizajn digitalne filtarske banke

Signal koji predstavlja ton muzičkog instrumenta je širokopojasni signal sa izraženim sinusnim komponentama. Kao takav, obično je kratkog trajanja i samim tim sadrži kratke kvazistacionarne intervale. Zbog takve prirode signala pogodno je njegovu analizu sprovesti posmatrajući signal u frekvencijskim podopsezima. Da bi se izvršila dekompozicija signala, neophodno je kreirati odgovarajuću digitalnu filtarsku banku. Cilj filtarske banke je da omogući uvid kako u vremenske tako i frekvencijske parametre svakog parcijala tona ponaosob. Iako se različiti setovi filtara mogu koristiti za ovu namenu [72], izabrani dizajn filtarske banke ima prednost jer je banka dvostruko komplementarna [73] (*all-pass* komplementarna i komplementarna po snazi). Izlazni signali svakog od kanala banke nisu decimirani, čime je omogućeno korisniku da sluša signal svakog kanala sa istom frekvencijom odabiranja kao i originalni signal. Takođe, zbog svoje dvostruke komplementarnosti, predloženi dizajn filtarske banke omogućava rekonstrukciju ulaznog signala sabiranjem svih kanala.



Slika 4.1 Struktura višekanalne dvostruko komplementarne filtarske banke bez decimacije (primer sa četiri kanala)

Filtarska banka projektovana je kao više-etapna u strukturi stabla (eng. *tree structure*), gde su kaskadno povezane dvostruko komplementarne dvokanalne filtarske banke [74], [75]. Ukupan broj kanala nije ograničen i može biti proizvoljno veliki. Na slici 4.1 prikazan je princip dizajna za četiri kanala. U predloženoj aplikaciji, dodatim *all-pass* filtrima (prikazanim na slici 4.1 kao $A_{02}(z)$ i $A_{03}(z)$), postiže se svojstvo dvostruke komplementarnosti. Zbir signala $\{x_{n0}[k]\}$ koji se nalaze na izlazu kanala jednak je ulaznom signalu filtriranom kroz kaskadnu vezu *all-pass* filtara:

$$A_{0total}(z) = \prod_{n=1}^{N+1} A_{0n}(z), \qquad 4.5$$

gde je N+2 ukupan broj kanala. Završni blok u svakom kanalu jeste blok za korekciju faze. Korekcija faze implementirana je po ugledu na dobro poznat Powell and Chau algoritam za postizanje linearnosti faze proizvoljnog IIR filtra [76], [77] zasnovane na inverziji u vremenu [78]. Po tom algoritmu, linearnost faze proizvoljnog IIR filtra $H(z)$ se postiže dodatnim filtriranjem filtrom $H(z^{-1})$. Rezultujući filtar $H(z)\cdot H(z^{-1})$, posmatrano u logaritamskoj razmeri (dB) duplira slabljenje u nepropusnom opsegu i ima nultu faznu karakteristiku. Praktična implementacija se svodi na inverziju u vremenu signala na ulazu u drugu kaskadu istog filtra $H(z)$ i ponovnu inverziju u vremenu signala na izlazu tog drugog filtra. Za konkretnu prikazanu filtarsku banku od interesa je da se fazna korekcija realizuje u odnosu na funkciju prenosa datu izrazom 4.5. Blok za korekciju faze realizuje se inverznim filtriranjem signala svakog kanala filtrom $A_{0total}(z)$ datim izrazom 4.5 [79], pri čemu se pod inverznim filtriranjem podrazumeva filtriranje sa dvostrukom inverzijom u vremenu. Uz ovako implementiranu faznu korekciju, zbir izlaza svih kanala predstavlja ulazni signal filtriran *all-pass* filtrom nulte faze. U teoriji, to bi značilo da se ulazni signal može potpuno rekonstruisati sabiranjem svih kanala. Međutim, u realnosti postoje razlike između ulaznog signala i na ovaj način rekonstruisanog signala. Razlika je prisutna u odbircima na kraju signala i ne može se potpuno eliminisati usled ograničenja

filtriranja filtrom nulte faze realizovanim inverznim filtriranjem. Razvijena aplikacija nije namenjena obradi u realnom vremenu, te je lako implementirati faznu korekciju opisanu na ovaj način. Benefiti fazne korekcije leže u tome što su na ovaj način vremenski odnosi komponenti signala očuvani, što omogućava jednostavne manipulacije poput isključivanja pojedinih kanala i slično.

Svaka dva kanala filtarske banke dobijena su spektralnom transformacijom prototip *half-band* filtra propusnika niskih frekvencija [73], [80]. Prototip filtar propusnik niskih frekvencija mora biti neparnog reda a dizajniran je kao Batervortov (*Butterworth*) filtar ili kao eliptički filtar sa minimalnim Q faktorom (EMQF) [80], [81]. Polovi funkcije prenosa *half-band* niskopropusnog filtra sa realnim koeficijentima $H_{LP}^{HB}(z)$ pozicionirani su na imaginarnoj osi. Jedan je pozicioniran u koordinatnom početku, dok ostali polovi predstavljaju konjugovano-kompleksne parove. U tom slučaju, komplementarni filtarski par, filtar propusnik niskih frekvencija $H_{LP}^{HB}(z)$ i filtar propusnik visokih frekvencija $H_{HP}^{HB}(z)$ mogu biti implementirani kao paralelna veza dva *all-pass* filtra, $A_0^{HB}(z)$ i $A_1^{HB}(z)$ [81]:

$$H_{LP,HP}^{HB}(z) = \frac{A_0^{HB}(z) \pm A_1^{HB}(z)}{2}. \qquad 4.6$$

All-pass grane sastoje se od kaskadne veze jednostavnih *all-pass* sekcija drugog reda, uz dodatno kašnjenje u $A_1(z)$ grani koje odgovara polu lokalizovanom u koordinatnom početku:

$$\begin{aligned} A_0^{HB}(z) &= \prod_{m=2,4,\ldots}^{(M+1)/2} \frac{\beta_m^{HB} + z^{-2}}{1+\beta_m^{HB} z^{-2}}, \\ A_1^{HB}(z) &= z^{-1} \prod_{m=3,5,\ldots}^{(M+1)/2} \frac{\beta_m^{HB} + z^{-2}}{1+\beta_m^{HB} z^{-2}}, \end{aligned} \qquad 4.7$$

gde je β_m^{HB} kvadrat poluprečnika odgovarajućeg pola r_m^{HB} za m=2,3,…,(M+1)/2 i $\beta_m^{HB} < \beta_{m+1}^{HB}$. Neparni red *M half-band* filtra određen je na osnovu zahtevanih vrednosti slabljenja u nepropusnom opsegu A_s, kao i zahtevane granične učestanosti propusnog opseg filtra ω_{p0}. Na osnovu izraza 4.7 može se zaključiti da su nule *all-pass* funkcije prenosa recipročne u odnosu na polove. Prednost Batervortovih i EMQF filtara je u tome što se par ovakvih *half-band* filtara (jednostavna dvokanalna filtarska banka) može jednostavno transformisati u filtarsku banku sa proizvoljnom presečnom frekvencijom [73], [75], [80]. Jedini dodatni parametar potreban za spektralnu transformaciju je tačna vrednost željene presečne frekvencije ω_c. U tom slučaju, svaka sekcija drugog reda definisana izrazom 4.7 je transformiše se u sekciju sa promenjenim polovima i nulama:

$$\frac{\beta_m^{HB} + z^{-2}}{1+\beta_m^{HB} z^{-2}} \rightarrow \frac{\beta_m + \alpha(1+\beta_m)z^{-1} + z^{-2}}{1+\alpha(1+\beta_m)z^{-1} + \beta_m z^{-2}}, \qquad 4.8$$

gde su $\alpha = -\cos(\omega_c), \beta_l = \dfrac{\beta_l^{HB} + \alpha_1^2}{1+\beta_l^{HB}\alpha_1^2}$ i $\alpha_1 = \dfrac{1-\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha} = -\tan(\dfrac{\pi/2 - \omega_c}{2})$.

Trivijalna sekcija prvog reda transformiše se u netrivijalnu *all-pass* sekciju:

$$z^{-1} \rightarrow \frac{\alpha_1 + z^{-1}}{1+\alpha_1 z^{-1}}. \qquad 4.9$$

Transformacije predstavljene izrazima 4.8 i 4.9 oslanjaju se na spektralne transformacije digitalnih filtara koje se mogu primeniti na različite klase filtara [82]. U dizajnu aplikacije, početni *half-band* filtar ograničen je na Batervortov ili EMQF tip filtara, jer je za ove tipove filtara vrednost koeficijenta α ista u svim sekcijama drugog reda opisanih izrazom 4.8. Time je omogućeno brzo izračunavanje

rezultujućeg filtarskog para. Opisanom transformacijom se granična učestanost propusnog opsega rezultujućeg niskopropusnog filtra ω_p postavlja na vrednost određenu [73]:

$$\tan(\frac{\omega_p}{2}) = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \tan(\frac{\omega_c}{2}), \qquad 4.10$$

gde je ω_c presečna frekvencija transformisanog filtarskog para, a ζ je parametar selektivnosti određen graničnom učestanošću propusnog opsega ω_{p0} prototip *half-band* filtra propusnika niskih frekvencija:

$$\zeta = \frac{1}{\tan^2(\frac{\omega_{p0}}{2})}. \qquad 4.11$$

Granična frekvencija nepropusnog opsega filtra ω_s određena je na osnovu:

$$\tan(\frac{\omega_s}{2}) = \sqrt{\zeta} \tan(\frac{\omega_c}{2}). \qquad 4.12$$

Na osnovu 4.10 i 4.11 može se zaključiti da prelazna zona rezultujućeg filtarskog para zavisi od njegove presečne frekvencije i granične frekvencije propusnog opsega prototip *half-band* filtra propusnika niskih frekvencija.

S obzirom na to da je aplikacija prevashodno namenjena za signale koji predstavljaju tonove sa izraženom inharmoničnošću, niz presečnih frekvencija (ω_c) izračunat je na osnovu procenjenih pozicija parcijala za zadate vrednosti osnovne frekvencije f_0 i koeficijenta inharmoničnosti B kao normalizovana geometrijska srednja vrednost dva sukcesivna parcijala:

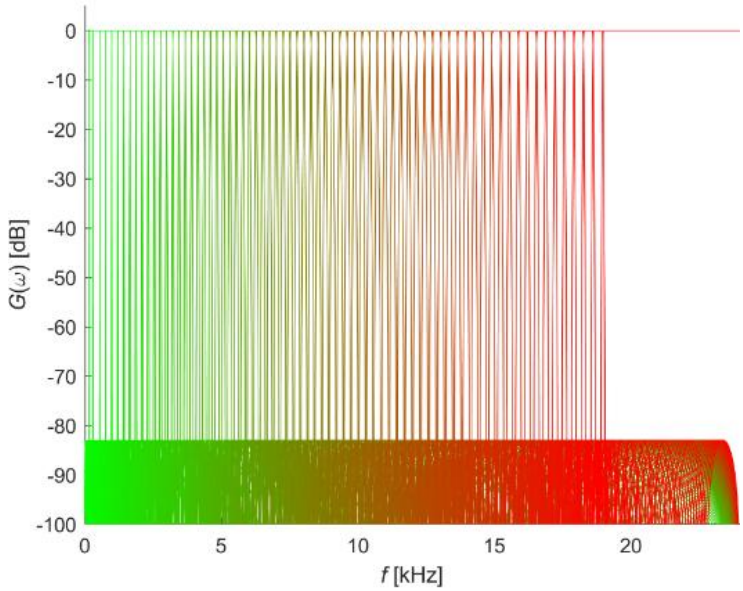
$$\begin{aligned} \omega_{c,n+1} &= \frac{2\pi}{f_s}\sqrt{f_n f_{n+1}}, n = 1,2,...N \\ \omega_{c,1} &= \frac{2\pi}{f_s}\sqrt{f_1} \end{aligned} \qquad 4.13$$

gde f_n predstavlja frekvencije izračunate na osnovu 4.13, a f_s predstavlja frekvenciju odabiranja ulaznog signala. Trodecibelska širina n-tog kanala definisana je presečnim frekvencijama $\omega_{c,n}$ i $\omega_{c,n+1}$. Na ovaj način dizajnirana filtarska banka podrazumeva da je ukupni broj kanala jednak broju parcijala N uvećanom za 2. Prvi kanal, označen kao nulti u aplikaciji, sadrži komponente signala koje se nalaze na frekvencijama manjim od osnovne frekvencije tona. Poslednji kanal sadrži opseg viših frekvencija, odnosno opseg u kome nema izraženih parcijala.

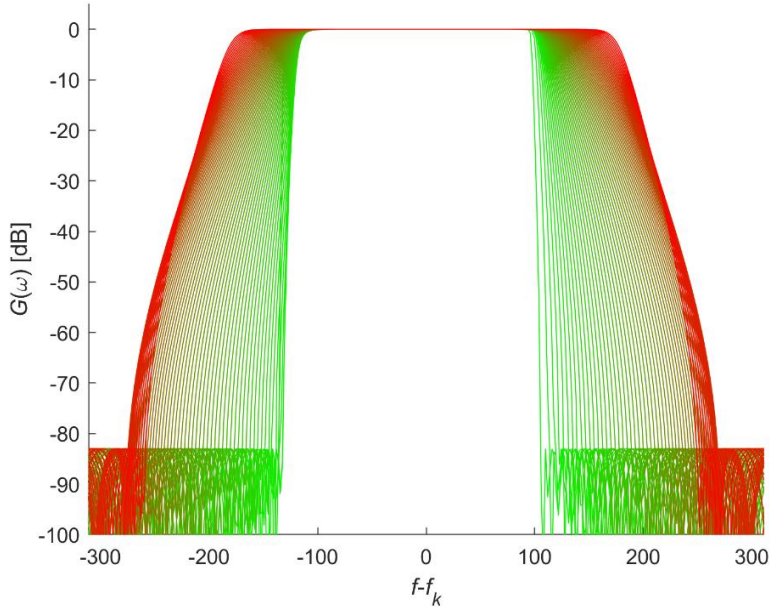
Praktično ista struktura filtarske banke može se koristiti u različitim konfiguracijama, uključujući i oktavne i uniformne banke. U okviru ovog istraživanja, korišćena je raspodela kanala potpuno prilagođena signalima sa izraženom inharmoničnošću. U slučaju kada je B=0, banka postaje uniformna u delu frekvencijskog opsega od interesa, odnosno opsega koji obuhvata parcijale prisutne u konkretnom signalu. Ukupna računska složenost zavisi od reda prototip filtra i od broja kanala. U trenutnom dizajnu aplikacije, za svaki dodatni kanal potreban je dodatni filtarski par, koji se dobija na osnovu prototip filtra pomoću transformacija 4.8 i 4.9. U fazi testiranja dizajna, korišćeno je do 90 kanala sa slabljenjem do 80 dB u nepropusnom opsegu i ω_{p0} u opsegu od 0.45 do 0.495. U slučaju primene Batervort-ovih filtara, zbog njegovih svojstava, slabljenje u nepropusnom opsegu je limitirano na vrednosti do 60 dB, a ω_{p0} do 0.45.

Iako je akcenat istraživanja u okviru ove doktorske disertacije na instrumentima čiji tonovi poseduju izraženu inharmoničnost, predloženi dizajn filtarske banke pogodan je za širi skup signala, odnosno analizu jednog tona muzičkog signala sa ili bez uočljive inharmoničnosti i za različit broj istaknutih parcijala i osnovnih frekvencija u širokom opsegu. Kao primer, na slici 4.2 prikazana je karakteristika pojačanja filtarske banke sa ukupno 72 kanala, što podrazumeva obradu signala sa čak 70 parcijala.

Na slici 4.3 prikazane su preklopljene karakteristike kanalnih filtara centralizovanih oko odgovarajućih parcijala (svaki kanalni filtar centralizovan je oko frekvencije odgovarajućeg parcijala). Sa slike se vidi kako se propusni opsezi filtara postepeno šire, u skladu sa koeficijentom inharmoničnosti, odnosno povećavanjem međusobnog razmaka parcijala usled inharmoničnosti.



Slika 4.2 Karakteristika pojačanja višekanalne filtarske banke, broj kanala 72.



Slika 4.3 Karakteristika pojačanja višekanalne filtarske banke, broj kanala 72, karakteristike su centralizovane oko odgovarajuće frekvencije parcijala. Banka je projektovana pod pretpostavkom da je B=1e-4.

4.1.3. Procena obvojnice parcijala

Predloženom filtarskom bankom moguće je izvršiti dekompoziciju signala na potkanale, čime se dobijaju uskopojasni signali centrirani oko pojedinačnih parcijala. U nastavku je opisano na koji je način, za svaki uskopojasni signal, moguće izvršiti procenu obvojnice. Na osnovu prethodno opisanog dizajna filtarske banke u potpoglavlju 4.1.2, dobija se niz od N+2 kanala a samim tim i toliko signala $\{x_n[k]\}$, k=0,1,…,K-1, n=0,1,…,N+1. Ukoliko su parametri banke ispravno izabrani, sadržaj svakog kanala od 1. do N-tog, odgovaraće jednom parcijalu signala. Signal $x_n[k]$ može biti analiziran kako u vremenskom, tako i u frekvencijskom domenu.

U literaturi postoje različite metode za procenu obvojnice muzičkog signala [83], [84]. Imajući u vidu da će na izlazu filtarske banke signali biti uskopojasni, moguće je primeniti jednostavan metod procene obvojnice na osnovu Hilbertove transformacije signala. U razvijenoj aplikaciji, obvojnice parcijala pojedinačnih kanala na izlazu filtarske banke dobijene su direktnom primenom Hilbertove transformacije, na sledeći način:

$$A_n[k] = \sqrt{x_n^2[k] + \hat{x}_n^2[k]}, \qquad 4.14$$

gde $\hat{x}_n[k]$ predstavlja Hilbertovu transformaciju signala $x_n[k]$. Postoje situacije u kojima je korisno obvojnice parcijala predstaviti analitički, a ne samo kao niz odbiraka numerički određenih iz odbiraka signala prema 4.14. Pored obvojnice dobijene pomoću Hilbertove transformacije, u aplikaciji se za dalju obradu koristi i obvojnica predstavljena u sledećem obliku:

$$A_n^{fit}[k] = A_{n1}(t[k])^{A_{n2}-1} A_{n3}^{-\frac{t[k]-A_{n4}}{A_{n5}}}, \qquad 4.15$$

gde su parametri A_{n1} do A_{n5} izračunati aproksimacijom (fitovanjem) obvojnice $A_n[k]$ dobijene izrazom 4.14. Procena parametara A_{n1} do A_{n5} vrši se pomoću MATLAB funkcije fit [85] za svaki parcijal svakog signala koji se obrađuje. U Tabeli 4.1 prikazane su početne vrednosti, kao i zadate minimalne i maksimalne vrednosti za samu funkciju MATLAB fit. Ostali ulazni parametri funkcije su postavljeni na podrazumevane vrednosti.

Tabela 4.1 Parametri iz analitičkog modela 4.15 i odgovarajuće vrednosti (početne, minimalne i maksimalne) za MATLAB fit funkciju

Parametar	Početna vrednost	Minimalna vrednost	Maksimalna vrednost
A_{n1}	0.5	10^{-6}	10
A_{n2}	2	1.001	Beskonačno
A_{n3}	e	0.1	Beskonačno
A_{n4}	0	-0.5	0.5
A_{n5}	2	10^{-6}	Beskonačno

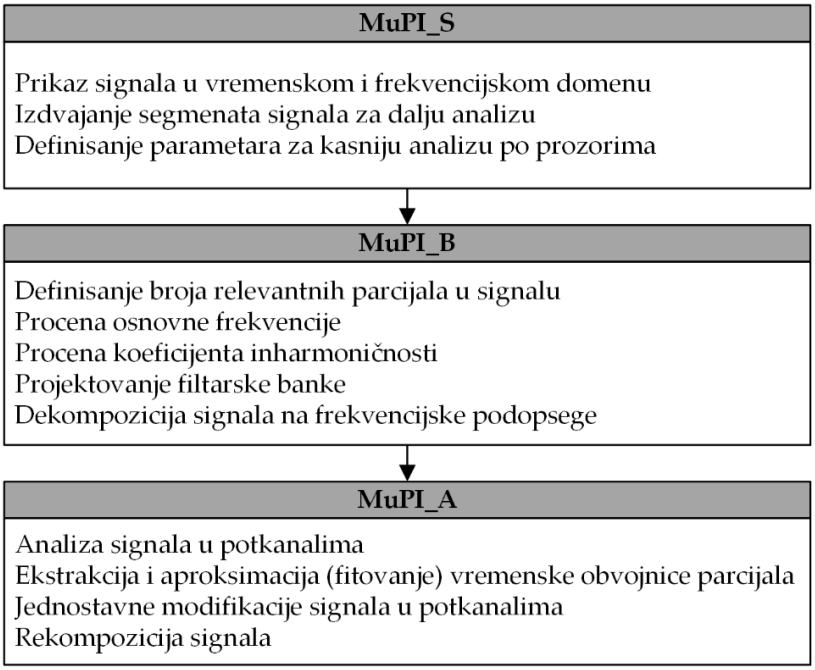
Analitički oblik obvojnice predstavljen izrazom 4.15 predstavlja aproksimativnu jednačinu koja je modifikovana, donekle uprošćena verzija obvojnice predložene u [86]. Predloženi analitički oblik 4.15 je pojednostavljen u odnosu na [86], jer ne polazi od klasične segmentacije muzičkog tona na faze [87]. To je donekle kompenzovano dodatnom komponentom aproksimacije $(t[k])^{An2-1}$ date u izrazu 4.15. Aplikacija razvijena u okviru ove doktorske disertacije namenjena je brzom, automatskom procesiranju signala uz ograničen skup izmena i rekombinacija signala iz podkanala filtarske banke. Obvojnice estimirane na osnovu snimljenih odbiraka signala uglavnom nisu idealne, te je neophodna dodatna predobrada. Polazeći od tih zahteva, izraz 4.15 odabran je kao kompromis između što vernije aproksimacije obvojnice i jednostavnosti implementacije. Eksperimentalna ispitivanja pokazuju da je predloženi oblik obvojnice (4.15) dovoljno dobar za automatsku obradu test signala tonova žičanih instrumenata. U daljem radu na obradi muzičkih signala, biće analizirani i složeniji aproksimativni izrazi prilagođeni širem skupu signala različitih muzičkih instrumenata.

4.1.4. Procena koeficijenta inharmoničnosti

Aplikacija je prvenstveno projektovana za analizu tonova žičanih muzičkih instrumentima. Kod podgrupa žičanih instrumenata gde zvuk nastaje okidanjem žice ili udarcem čekića o žicu, inharmoničnost je fenomen koji se ne može zanemariti. Inicijalna procena koeficijenta inharmoničnosti u okviru aplikacije je potrebna jer se dizajniranje filtarske banke oslanja na frekvencije parcijala tonova. Čak i kada je inharmoničnost mala, u signalima sa većim brojem

izraženih parcijala odstupanja u odnosu na harmonijski niz postaju značajna za parcijale višeg reda. Imajući to u vidu, procena koeficijenta inharmoničnosti B mora prethoditi dizajnu filtarske banke.

U aplikaciji, procena koeficijenta inharmoničnosti B se vrši u dva koraka. Prvobitno se izvrši jednostavno vizuelno poravnavanje između spektralnih komponenti samog signala i niza frekvencija sa pretpostavljenom vrednošću koeficijenta inharmoničnosti. Ručnim, istovremenim podešavanjem vrednosti osnovne frekvencije f_0 i koeficijenta inharmoničnosti B obezbeđuje se da dizajnirana filtarska banka odgovara spektralnom sadržaju konkretnog signala, u skladu s konceptom prema kome se u svakom kanalu nalazi po jedan parcijal. Zatim se, u drugom koraku, revidira rezultat dobijen manuelnim podešavanjem. Nakon filtriranja signala dizajniranom bankom, za signal iz svakog kanala procenjuje se spektralni maksimum. Na osnovu frekvencija spektralnih maksimuma iz svakog kanala primenom PFD algoritma vrši se procena koeficijenta inharmoničnosti B [88]. U poglavlju 6 detaljno je objašnjen PFD algoritam, koji je izabran zbog jednostavnosti i pogodnosti za automatsko procesiranje signala. U okviru aplikacije, PFD algoritam i procena koeficijenta inharmoničnosti B implementirani su kao dodatni modul koji se pokreće po završetku projektovanja filtarske banke.

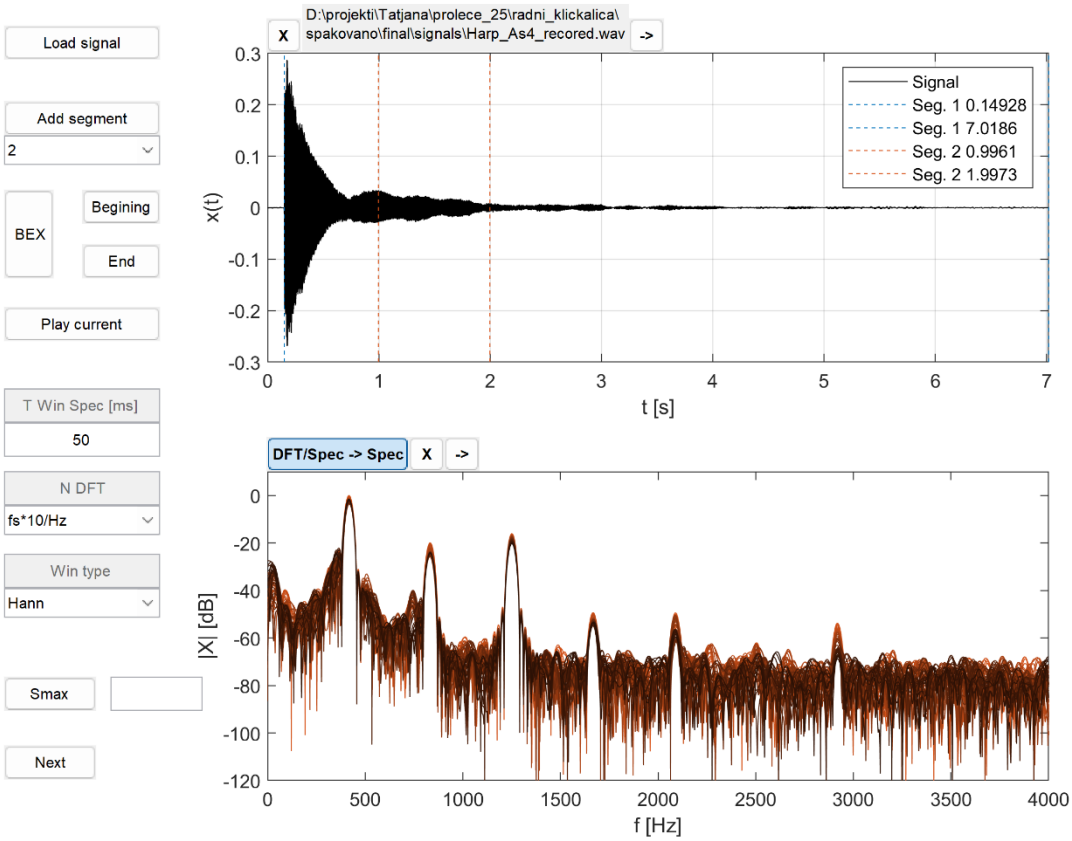


Slika 4.4 Arhitektura MuPI aplikacije

4.2 Arhitektura aplikacije

U ovom potpoglavlju prikazana je arhitektura razvijene aplikacije MuPI (***Mu**sical Signal **P**rocessing with Prominent **I**nharmonicity*). Arhitektura aplikacije prikazana je na slici 4.4 i zasniva se na tri modula, od kojih svaki ima namenski razvijen grafički interfejs. Razmena signala i pratećih podataka između modula odvija se preko privremeno snimljenih datoteka. Aplikacija je razvijena u programskom paketu MATLAB 2023b uz korišćenje funkcija iz biblioteka *Curve Fitting toolbox* i *Signal Processing toolbox*. Prednost modularne organizacije aplikacije je u tome što omogućava naknadno dodavanje novih podsistema, unapređivanje postojećih bez potpune reorganizacije aplikacije, kao i zamenu pojedinih modula. Tri modula koja su realizovana su:

1. MuPI_S – inicijalna predobrada i vizualizacija signala
2. MuPI_B – izračunavanje parametara signala i
3. MuPI_A – obrada signala u podopsezima i sinteza signala



Slika 4.5 Prikaz prvog modula MuPI_S

4.2.1. Modul MuPI_S

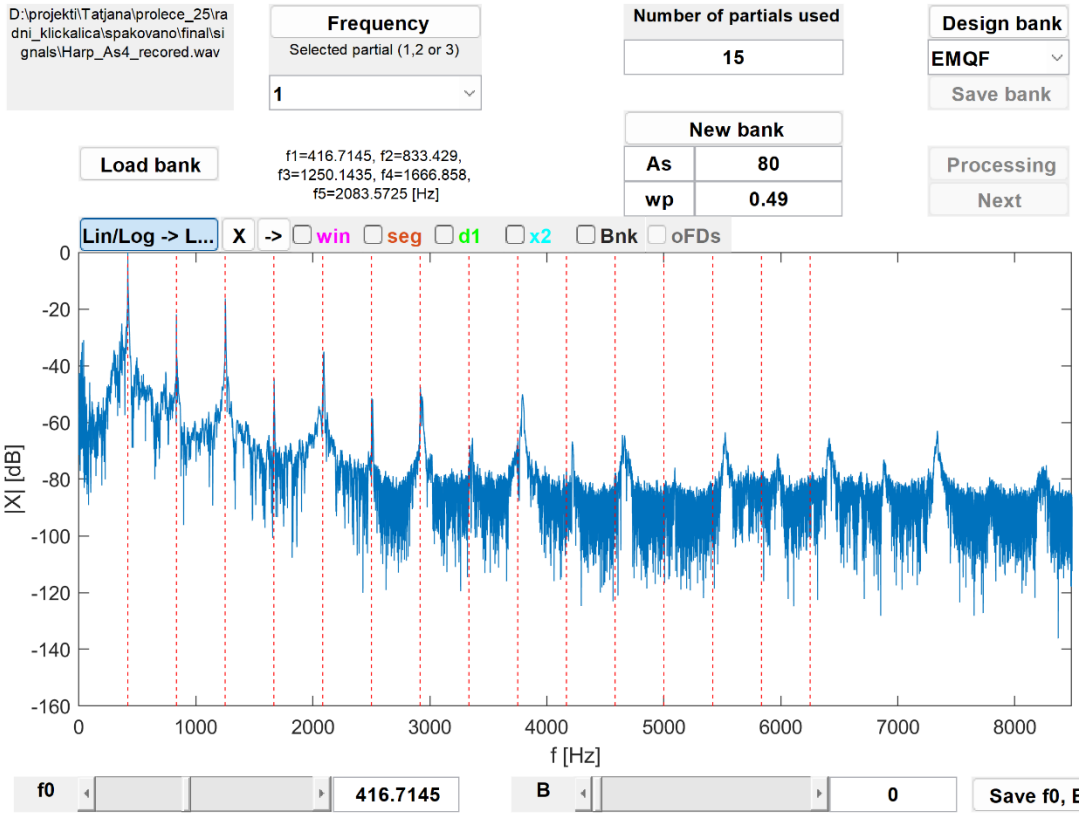
Prvi, polazni modul, MuPI_S namenjen je učitavanju snimljenog signala i izvođenju jednostavnih manipulacija koje se mogu posmatrati kao predobrada signala. U ovom modulu sadržaj signala se ne menja. Moguće je samo izabrati segment od interesa za dalju obradu, čime se signal skraćuje, a neželjeni delovi odbacuju na osnovu vizuelnog prikaza i preslušavanja izabranih segmenata. S obzirom na to da se spektralni sadržaj signala menja kroz vreme, modul MuPI_S omogućava praćenje promena spektralnog sadržaja kroz istovremeno posmatranje različitih segmenata signala. Mogu se analizirati do četiri segmenta sa nezavisnim podešavanjima početnog i krajnjeg trenutka za svaki segment. Dizajn grafičkog interfejsa modula prikazan je na slici 4.5. U gornjoj polovini prozora MuPI_S modula nalaze se kontrole za manipulaciju nad signalom u vremenskom domenu zajedno sa prikazom signala. Na slici je prikazan scenario obrade sa dva izabrana segmenta. Prvi definisani segment tretira se kao „ceo“ signal (početak i kraj označeni su isprekidanom plavom linijom) i koristi se u daljoj analizi kroz čitav lanac obrade signala. Drugi segment (početak i kraj označeni su isprekidanom narandžastom linijom) se takođe prenosi u naredni modul i može se koristiti za verifikaciju značajnosti parcijala. U donjoj polovini prozora MuPI_S modula nalaze se kontrole za manipulaciju nad signalom u frekvencijskom domenu, zajedno sa grafičkim prikazom. Na slici 4.5 prikazan je rezultat STFT analize prvih 50 prozora odabranog dela signala, gde tamnije linije odgovaraju kasnije pozicioniranom prozoru.

U okviru ovog modula definišu se parametri poput dužine prozora (kontrola „T Win Spec“), tipa prozora (kontrola „Win type“) i broja tačaka DFT/STFT (kontrola „N DFT“) koje će se koristiti za dalju analizu. U trenutnoj verziji, implementirana su dva tipa prozorskih funkcija, Hann-ova i Blackman-Harris-ova koje se mogu izabrati podešavanjem kontrole „Win type“. STFT se računa na način objašnjen u potpoglavlju 4.1.1. Korisnik sam zadaje tip prozora, kao i broj tačaka u kojem se izračunava STFT. Parametar R je unapred postavljen i iznosi 0.125. Broj sukcesivnih prozora je ograničen na 50, kao kompromis u cilju ubrzavanja proračuna i izbegavanja formiranja izuzetno

velikih nizova ili matrica. Kao izlaz, MuPI_S u sledeći modul, putem privremeno sačuvane .mat datoteke, prosleđuje odbirke dva odabrana segmenta signala, izabrane parametre prozorske funkcije (tip i dužinu), vrednosti potrebne za DFT analizu po prozoru, kao i putanju do originalnog snimka.

4.2.2. Modul MuPI_B

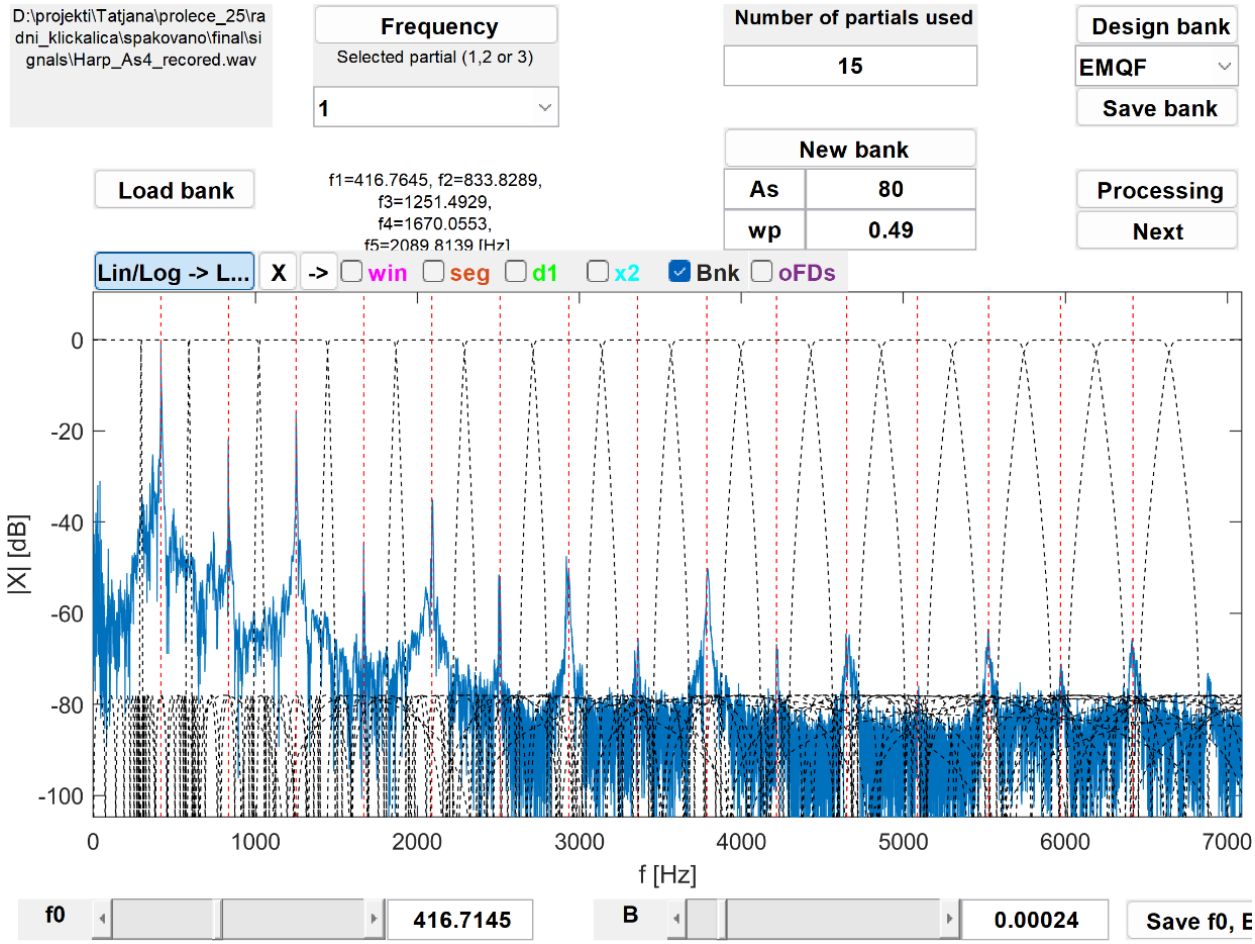
U drugom modulu, MuPI_B, realizuje se projektovanje dvostruko komplementarne višekanalne filtarske banke. Na slici 4.6 prikazan je izgled grafičkog interfejsa drugog modula MuPI_B.



Slika 4.6 Prikaz drugog modula MuPI_B

Po pokretanju drugog modula prikazuje se spektar segmenta iz prethodno izabranog modula MuPI_S. Prvi korak jeste da korisnik ručno podesi osnovnu frekvenciju tona f_0 i koeficijent inharmoničnosti B. Podešavanja vrednosti se može izvršiti pomeranjem klizača ili direktnim unošenjem vrednosti. Prilikom pomeranja klizača pojavljuju se i pomeraju isprekidane crvene pomoćne linije, čiji je zadatak da ukažu na očekivane položaje parcijala za zadate vrednosti f_0 i B. Te vrednosti predstavljaju ulazne parametre za izračunavanje presečnih frekvencija filtara filtarske banke prema jednačini 4.13. Broj kanala filtarske banke koja će biti projektovana određen je prema broju izraženih parcijala N (zadaje se od strane korisnika) uvećanim za 2. Korisnik podešava parametre prototip *half-band* filtra na osnovu kog se, kao što je opisano u 4.1.2. projektuju dvokanalne filtarske banke čijom se kaskadnom vezom realizuje višekanalna banka. Početna vrednost za slabljenje u nepropusnom opsegu je A_s=60 dB, dok je početna vrednost normalizovane granične frekvencije propusnog opsega prototip *half-band* propusnika niskih frekvencija ω_p=0.45π. Tip filtra je takođe proizvoljan, korisnik bira između Batervortovog i EMQF filtra. Zbog ograničenja koja proističu iz numeričke nestabilnosti pri izračunavanju reda i koeficijenta EMQF prototipa i transformisanih filtara, ograničenja (maksimalne vrednosti) parametara su A_s=80 dB i ω_p=0.495π. Za slične ostvarene karakteristike, red Batervortovg filtra je veći u poređenju sa redom EMQF filtra, te su posledično i ograničenja stroža, odnosno maksimalne vrednosti parametara u ovom slučaju su A_s=60 dB i ω_p=0.45π. Nakon što su parametrima dodeljene vrednosti, odgovarajuća filtarska banka se dizajnira pokretanjem kontrola „New bank“ i „Design bank“. Nakon dizajna filtarske banke, moguće je, uporedo sa spektrom signala

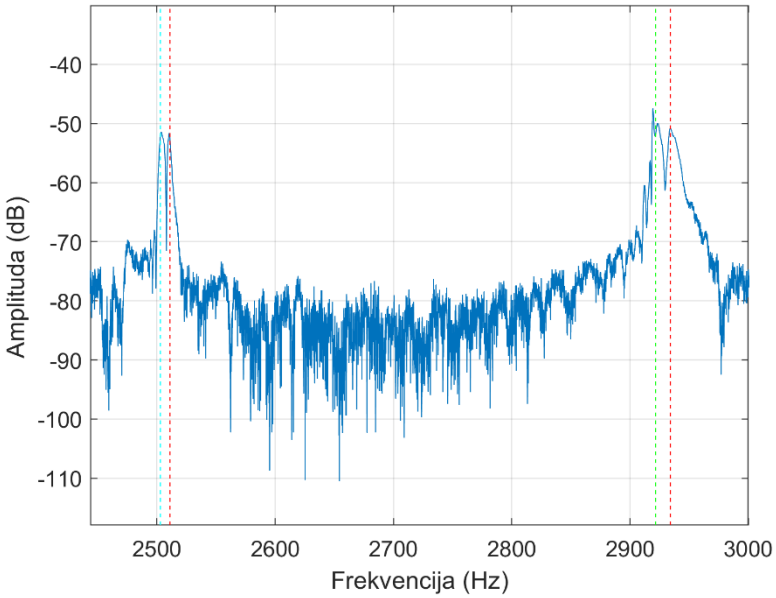
prikazati i karakteristiku kanalnih filtara realizovane filtarske banke, što je prikazano crnim isprekidanim linijama na slici 4.7.



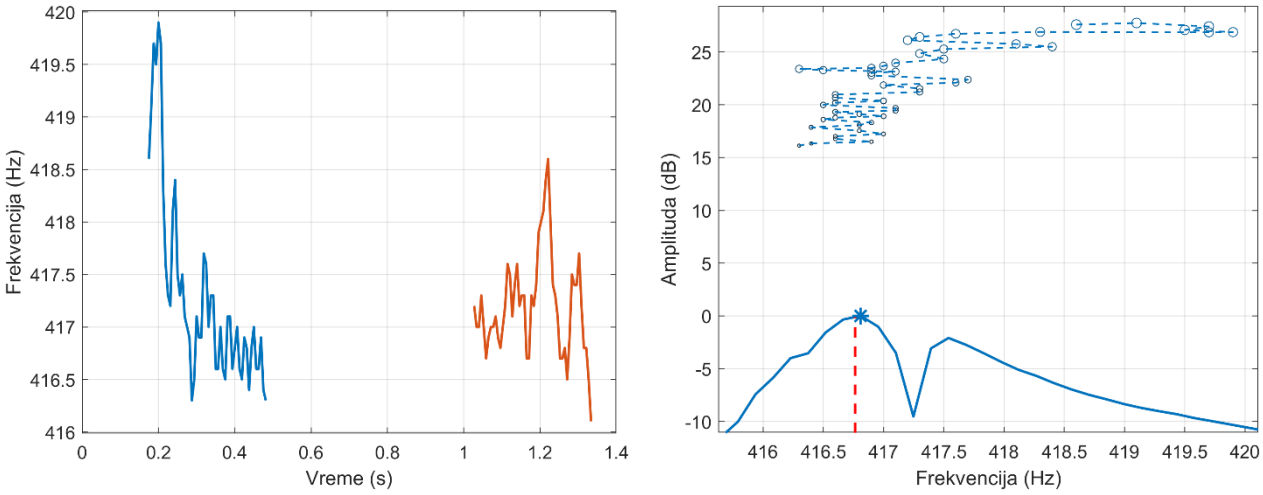
Slika 4.7 Prikaz modula MuPI_B nakon dizajniranja filtarske banke

Iznad dijagrama nalaze se kontrole kojima se, po potrebi, uključuju ili isključuju pojedine komponente prikaza. Kontrola „Lin/log → Lin“ utiče samo na podelu *y* ose. Korišćenjem te kontrole podela *y* ose se može menjati iz linearne u logaritamsku i obratno. Iako je u analizi i obradi audio signala uobičajeno da se koristi logaritamska podela frekvencijske ose, za ovu vrstu analize sa parcijalima u kvazi-harmonskom nizu, procenjeno je da je linearna skala pogodnija. Kontrola „oFDs“ omogućava prikaz pozicija maksimalnih vrednosti spektra dobijenih analizom prozor po prozor za svaki kanal posebno. Ova kontrola postaje aktivna tek nakon obrade signala dizajniranom filtarskom bankom, jer se vrednosti računaju na osnovu filtriranog signala. Dodatno, kontrolama „d1“ i „x2“ moguće je uključiti prikaz očekivanih pozicija fantomskih parcijala u cilju lakše identifikacije porekla artefakta u spektru posmatranog signala. Na slici 4.8 dat je prikaz dela spektra signala na kome se jasno vide detektovani fantomski parcijali. Crvenim isprekidanim linijama obeležene su očekivane pozicije stvarnih parcijala, tirkizna isprekidana linija obeležava parni fantomski parcijal (prikaz dobijen kontrom „x2“), a zelena isprekidana linija obeležava neparni fantomski parcijal (prikaz dobijen kontrolom „d1“). Frekvencije fantomskih parcijala izračunavaju se na osnovu sadržaja spektra i položaja parcijala nižeg reda, na način prethodno objašnjen u poglavlju 2.2.3. Takođe, nakon dizajna filtarske banke moguće je, u okviru modula MuPI_B, pokrenuti još dva tipa analize signala, praćenje trenutne frekvencije parcijala u vremenu i praćenje promene koeficijenta *B* u vremenu. Navedeni postupci analize iniciraju se kontrolom „Processing“ a rezultuju dodatnim graficima (nezavisnim od osnovnog prozora aplikacije) sa rezultatima sprovedenih analiza. Prvi grafik prikazuje trenutne frekvencije dobijene procesiranjem signala iz svakog kanala metodom prozor po prozor za svaki odabrani segment signala (definisan u prethodnom modulu MuPI_S). Prikaz trenutnih frekvencija služi za verifikaciju varijacije, male promene frekvencije koja se zove i frekvencijsko

„klizanje“ (*frequency glide*). Kao ilustracija, na slici 4.9 dat je prikaz toka osnovne frekvencije kroz vreme za dva segmenta.



Slika 4.8 Uvećani prikaz spektra iz grafičkog interfejsa MuPI_B sa označenim fantomskim parcijalima (tirkizna i zelena isprekidana linija) i stvarnim inharmoničnim parcijalima tona (crvena isprekidana linija)

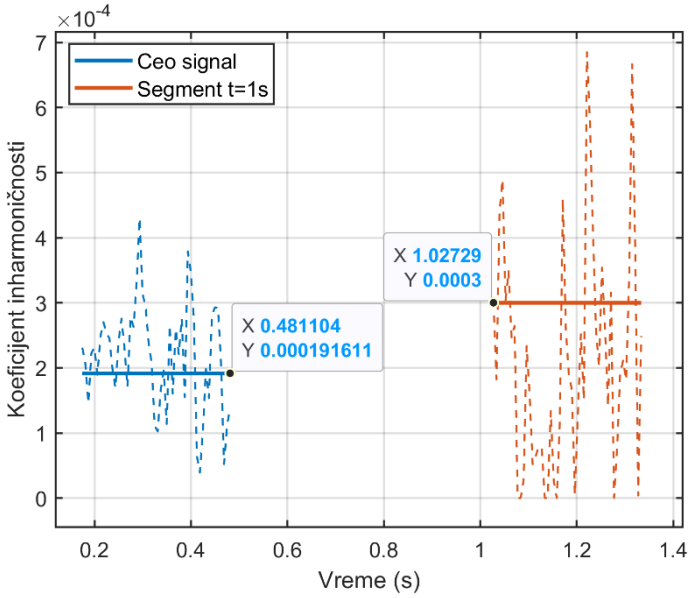


a) b)

Slika 4.9 Prikaz frekvencijskog „klizanja“

Na slici 4.9 a) plavom bojom označena je varijacija osnovne frekvencije tona posmatrajući ceo signal prozor po prozor, dok je narandžastom bojom označena varijacija frekvencija tona posmatrajući prethodno izabrani segment signala prozor po prozor (odnosi se na segment koji počinje u t=1 s). Na slici 4.9 b) prikazani su parovi koji odgovaraju frekvencijama maksimuma i odgovarajućim maksimalnim amplitudama. Zvezdica označava parove dobijene na osnovu celog signala, isprekidana crvena pomoćna linija označava očekivanu frekvenciju parcijala, a kružići su maksimumi određeni po prozorima (jedan kružić odgovara jednom prozoru). Tamniji markeri odgovaraju kasnije pozicioniranim prozorima.

Drugi dodatni grafik odgovara implementiranom algoritmu analize i prikazuje vrednosti koeficijenta inharmoničnosti B kada su one računate po prozorima za svaki odabrani segment, kao i za ceo signal. Na slici 4.10 su predstavljeni rezultati dobijeni na osnovu PFD algoritma gde je račun ponovljen za 50 prozora, za definisan segment (isprekidana narandžasta linije) i za ceo signal (isprekidana plave linija), pri čemu pune linije predstavljaju srednje vrednosti.



Slika 4.10 Vrednosti koeficijenta inharmoničnosti dobijene na osnovu PFD algoritma posmatrajući 50 prozora za dva različita segmenta signala

Procene koeficijenta *B*, bilo da su procenjene na osnovu segmenta ili celog signala, razlikuju se od vrednosti koju je korisnik ručno podesio. Na slici 4.7 za posmatrani slučaj prikazano je da je korisnik procenio B=2.4·10^{-4}. Kada se procena vrši nad celim signalom i posmatra prvih 50 prozora(isprekidana plava linija), varijacije vrednosti *B* od prozora do prozora posledica su frekvencijskog „klizanja“, odnosno promene spektralnog sadržaja unutar pojedinačnih prozora. Kada se procena *B* vrši nad segmentom (narandžasta isprekidana linija), varijacije proističu iz vremenske pozicije segmentiranog dela u odnosu na ceo ton. Kako segment počinje od t=1s (faza smirivanja tona), očekivano je da su pojedine spektralne komponente oslabile ili nestale. Kako se spektralni maksimumi na osnovu kojih se procenjuje *B* određuju automatski, bez obzira na to da li je u datom prozoru prominentna sinusoidna komponenta zaista prisutna, procena koeficijenta *B* biva lošija. Otuda potiče izrađenija fluktuacija estimacije *B* prikazana narandžastom isprekidanom linijom. Estimirane vrednosti *B* sa slike 4.10 mogu poslužiti i za verifikaciju ručno određene vrednosti koeficijenta inharmoničnosti. U datom primeru, pri proceni prozor po prozor nad celim signalom srednja vrednost iznosi 1.91·10^{-4}(plava linija), dok pri proceni nad segmentom iznosi 3·10^{-4} (narandžasta linija). Kako se ručno procenjena vrednost 2.4·10^{-4} nalazi između ove dve vrednosti, možemo smatrati da je ona dovoljno dobro podešena za brze analize. Odstupanje van opsega definisanog plavom i narandžastom linijom ukazivao bi na neadekvatno ručno podešen koeficijent *B*. Takođe, u okviru modula MuPI_B računa se i parametar M2M, koji predstavlja odnos između maksimalne i srednje vrednosti u relevantnom delu spektra. Ovaj parametar se ne prikazuje ali se prenosi u naredni podmodul i koristi kao gruba mera prominentnosti parcijala: ukoliko je odnos mali, parcijal nije prisutan ili je značajno potisnut, te je frekvencija detektovanog maksimuma zapravo slučajna unutar propusnog opsega kanala.

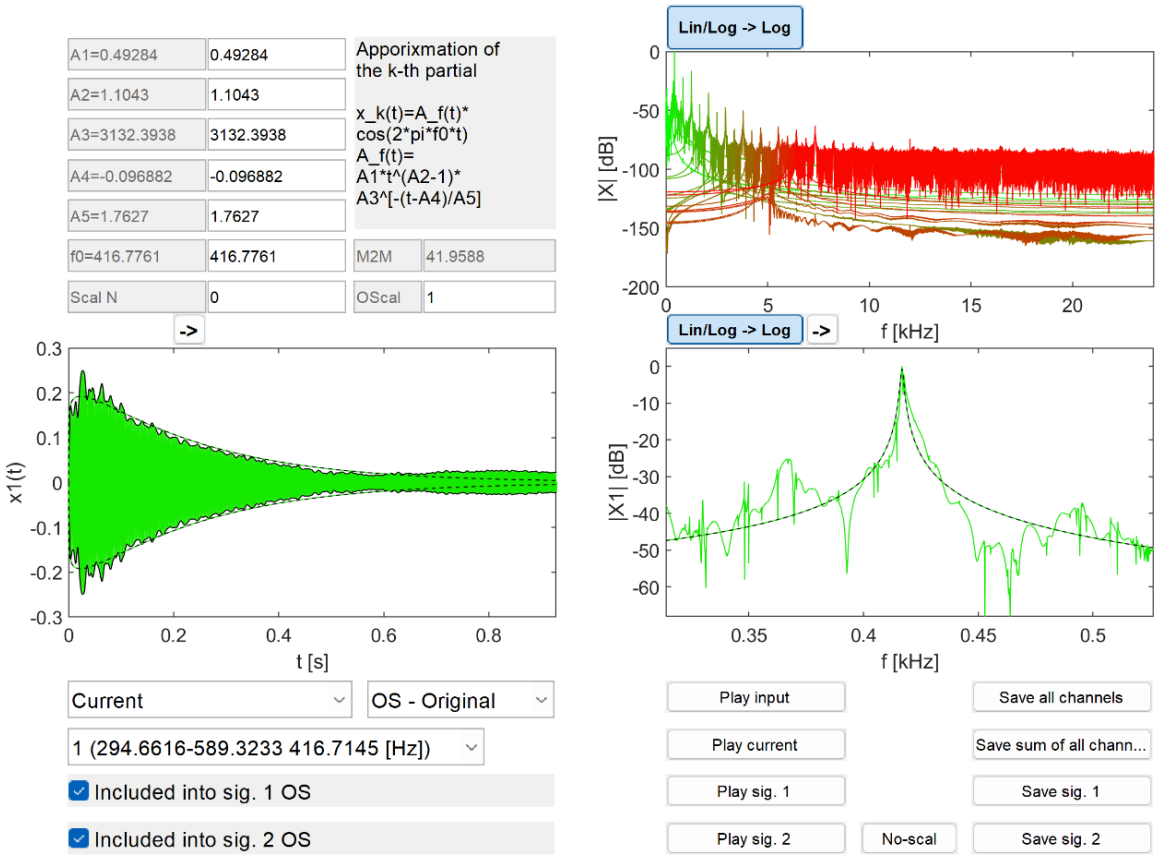
Na kraju, MuPI_B u sledeći modul, putem privremeno sačuvane *.mat datoteke, prosleđuje signale kanala, parametre dizajnirane banke, frekvenciju odabiranja f_s, procene osnovne frekvencije f_0 i koeficijenta inharmoničnosti *B*, niz M2M vrednosti, kao i putanju do snimljenog signala. Navedeni skup izlaznih podataka obezbeđuje konzistentne ulaze za poslednji modul aplikacije MuPI_A.

4.2.3. Modul MuPI_A

Treći, za sada završni modul, MuPI_A, osmišljen je kao alat za jednostavnu manipulaciju signalima potkanala (Slika 4.11). Pri inicijalizaciji modula vrši se aproksimacija vremenskih obvojnica svih kanala i procenjuju se parametri A_{n1}–A_{n5} (parametri su detaljno objašnjeni u potpoglavlju 4.1.3). Korisnik zatim može da fino podešava sve parametre na osnovu pregleda rezultata u vremenskom i

frekvencijskom domenu, kako za originalni sadržaj kanala, tako i za izmenjene verzije, uz dodatnu mogućnost preslušavanja originalnog i modifikovanog signala.

Na slici 4.11 prikazan je prvi kanal koji odgovara prvom parcijalu analiziranog tona. Prikazani su vremenski i frekvencijski sadržaj signala, zajedno sa procenjenom i aproksimiranom vremenskom obvojnicom parcijala. Grafik pozicioniran u levom donjem uglu prikazuje parcijal u vremenskom domenu (prikazan zelenom bojom), zajedno sa procenjenom obvojnicom (prikazanom punom crnom linijom) i aproksimiranom obvojnicom (isprekidanom crnom linijom). U donjem desnom uglu slike 4.11 nalazi se prikaz spektra izdvojenog kanala (zelenom bojom), dok je spektar signala sa aproksimiranom obvojnicom prikazan isprekidanom crnom linijom.



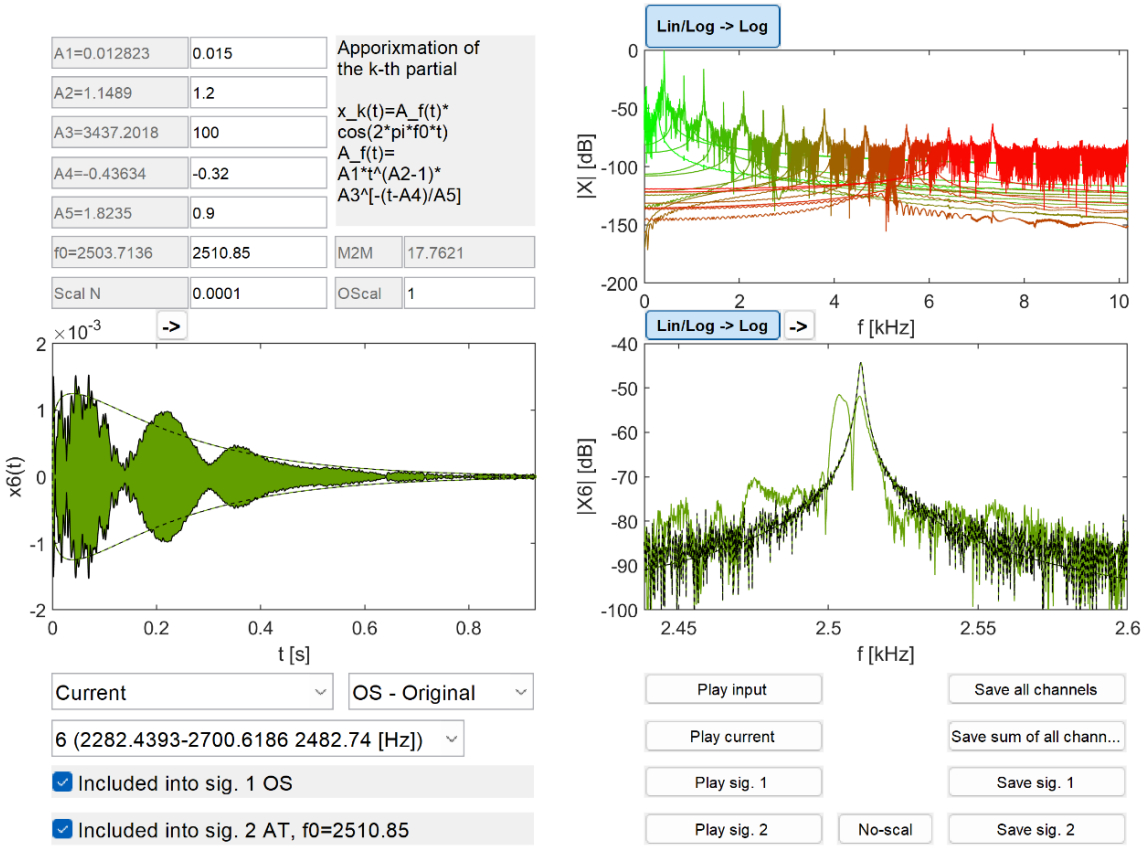
Slika 4.11 Prikaz grafičkog interfejsa modula MuPI_A

U ovom modulu podržano je nekoliko opcija za modifikaciju signala. Moguće je izvršiti amplitudsko skaliranje kanala, zajedno sa njegovim potpunim isključivanjem. Dodatno, moguće je izvršiti zamenu izdvojenog kanala sintetisanim signalom prema analitičkom obliku:

$$A_n^{fit}[k]\cos(\frac{2\pi}{f_s}f_n k+\varphi_n)+s_n\cdot filt_noise_n[k], \qquad 4.16$$

gde je $A_n[k]$ obvojnica dobijena aproksimacijom izdvojene obvojnice signala kanala (i eventualnim dodatnim podešavanjima parametara), f_n je frekvencija parcijala procenjena na osnovu položaja maksimuma u DFT nizu signala datog kanala, $filt_noise[k]$ su odbirci filtriranog Gausovog šuma, a s_n je skalirajući faktor. Faktor s_n je inicijalno podešen na vrednost 0, što odgovara potpunom izostavljanju komponente šuma. Filtrirani šum je signal filtriran istom projektovanom bankom pri čemu je ulazni signal u banku slučajan beli Gausov šum. Alternativno, postoji mogućnost zamene postojećeg kanala samo filtriranim Gausovim šumom prema drugom sabirku u izrazu 4.16.

Kao ilustracija jednostavne modifikacije signala na nivou jednog kanala (jednog parcijala), prikazana je aproksimacija obvojnice i zamena sadržaja inicijalnog parcijala, parcijalom sa izmenjenom obvojnicom. Na slici 4.12 prikazan je izgled grafičkog interfejsa za odabrani parcijal.



Slika 4.12 Prikaz grafičkog interfejsa modula MuPI_A sa akcentom na prikaz 6. parcijala analiziranog tona

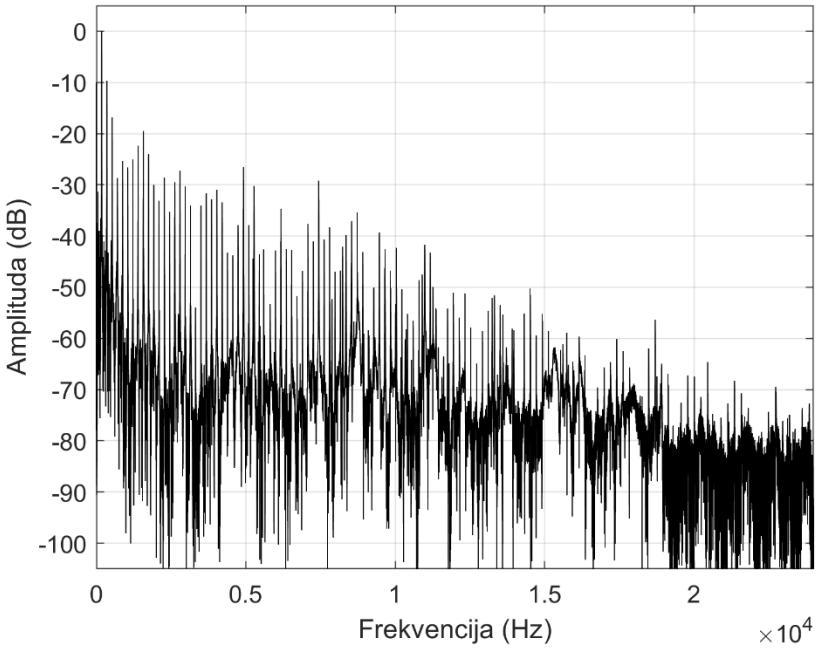
Izabran je 6. parcijal jer u odgovarajućem frekvencijskom opsegu spektar sadrži dve frekvencijski vrlo bliske komponente, pri čemu niža od dve frekvencije odgovara fantomskom parcijalu. Te dve komponente, bliske u spektru, formiraju karakterističan oblik vremenske obvojnice parcijala, koja je prikazana punom crnom linijom na slici 4.12. Aproksimirana obvojnica prikazana je isprekidanom crnom linijom. U donjem desnom uglu grafika sagledavanjem spektra signala, vidi se da, ako se parcijal zameni sa sintetisanim, više ne postoje dva frekvencijski bliska maksimuma u spektru (zelena boja), već jedan koji odgovara stvarnom parcijalu tona (isprekidana crna linija). Ovakvim postupkom eliminisan je fantomski parcijal, odnosno sintetisan je 6.parcijal bez prisustva fantomskog parcijala, koji je postojao u originalnom signalu.

U modulu MuPI_A originalni ulazni signal može biti rekonstruisan sabiranjem svih kanala, sa malom neizbežnom greškom usled neidealnog filtra nulte faze. U zbir se mogu uključiti i modifikovani umesto originalnih kanala, čime se dobija celokupan signal sa kontrolisano izmenjenim svojstvima. Ovakva uprošćena sinteza, zasnovana na rekombinaciji kanala i modifikacijama obvojnica pojedinih parcijala, pogodna je za preliminarnu procenu uticaja pojedinih parametara ili komponenti na perceptivni kvalitet signala.

4.3 Analiza predloženog koncepta

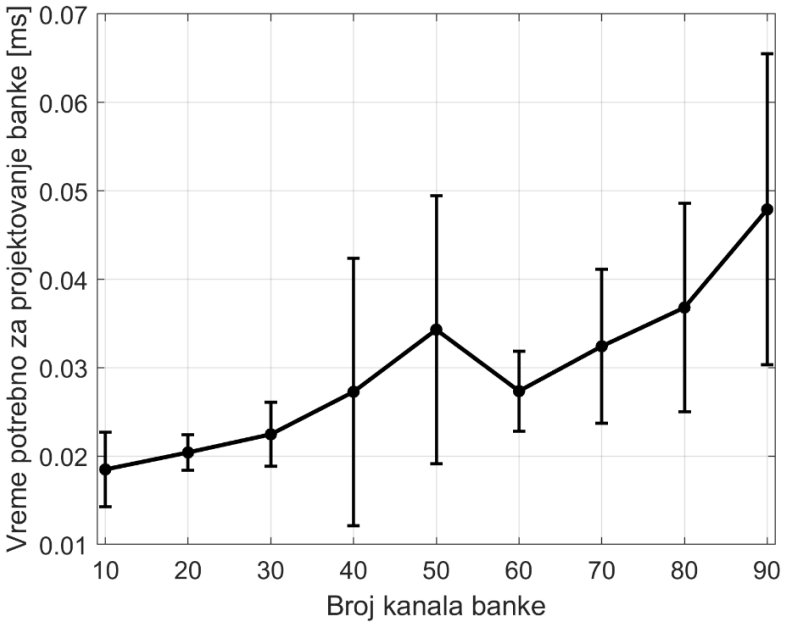
Osnovni i procesno najzahtevniji korak predloženog koncepta i realizovane aplikacije je dizajn filtarske banke i filtriranje signala realizovanom bankom. Iako je aplikacija namenjena obradi prethodno snimljenih signala i ne predviđa rad u realnom vremenu, očekuje se relativno brz odziv, jer se signal obrađuje interaktivno kroz više faza. U cilju ispitivanja robusnosti predloženog dizajna

filterske banke i njegove vremenske složenosti (tj. vremena potrebnog za dizajn i obradu), sproveden je eksperiment na snimku tona čembala sa „bogatim“ spektrom i mnoštvom prominentnih parcijala (slika 4.13). U ovom eksperimentu demonstrira se projektovanje filterske banke sa velikim brojem kanala.



Slika 4.13 Spektar snimljenog tona čembala sa velikim brojem izraženih parcijala (preko 70)

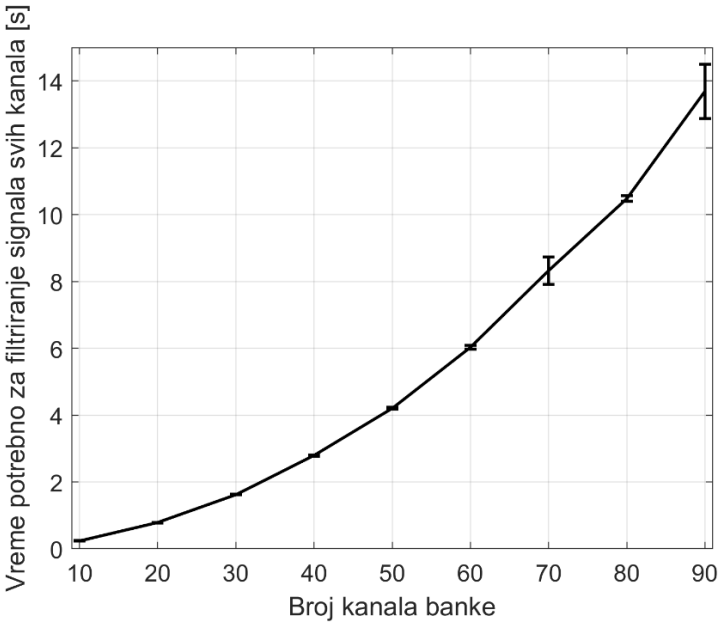
Iako je koeficijent inharmoničnosti mali ($B \approx 1.8 \times 10^{-5}$), zbog velikog broja kanala položaji viših parcijala znatno odstupaju od harmonijskog niza, pa je bilo neophodno projektovati banku sa velikim brojem kanala. iljani broj kanala bio je 90. Dizajn je ponavljan za traženi broj prominentnih parcijala od 10 do 90 (korak 10), za isti prototip filtar. Mereno je vreme dizajna banke i vreme filtriranja potrebno za dekompoziciju ulaznog signala na sve kanale. Za svaku tačku eksperiment je ponovljen deset puta i izračunate su srednja vrednost i standardna devijacija. Treba naglasiti da je očekivana računarska kompleksnost konkretnog dizajna „po pokušaju“ ista, ali s obzirom na to da je obrada signala implementirana u MATLAB okruženju, na računaru opšte namene, male varijacije vremena su neizbežne u standardnom režimu rada.



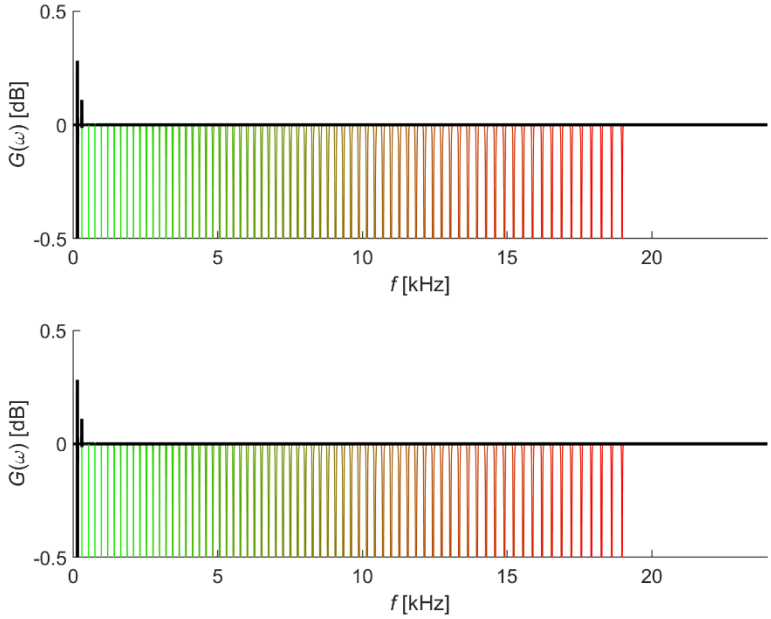
Slika 4.14 Vreme izvršavanja potrebno za dizajn filtarske banke (zavisnost od broja kanala banke)

Na slici 4.14 date su srednje vrednosti i standardne devijacije vremena potrebnog za dizajn. Dijagram potvrđuje da je dizajn efikasan i brz, a relativno veća standardna devijacija očekivana je zbog vrlo kratkog vremena obrade. Kao što je očekivano, vreme potrebno za dizajn banke zavisi od broja kanala zato što se u stvari za svaki dodatni kanal projektuje jedna dodatna dvokanalna filtarska banka.

Na slici 4.15 prikazani su odgovarajući rezultati za obradu kompletnog signala kroz celu banku (dužina signala 2 s). Vreme obrade raste sa brojem kanala i zavisi od dužine ulaznog signala, pri čemu, zbog etapne implementacije banke u formi stabla, zavisnost nije strogo linearna. U aktuelnoj verziji modula MuPI_B filtriranje je realizovano MATLAB funkcijom filter, pri čemu je svaki filtar predstavljen paralelnom vezom dva *all-pass* filtra. Svaki *all-pass* je implementiran kao kaskadna veza sekcija drugog reda. Rezultat obrade je matrica dimenzija $K\times(N+2)$, gde je K dužina signala (u odbircima), a N broj prominentnih parcijala zadat od strane korisnika.

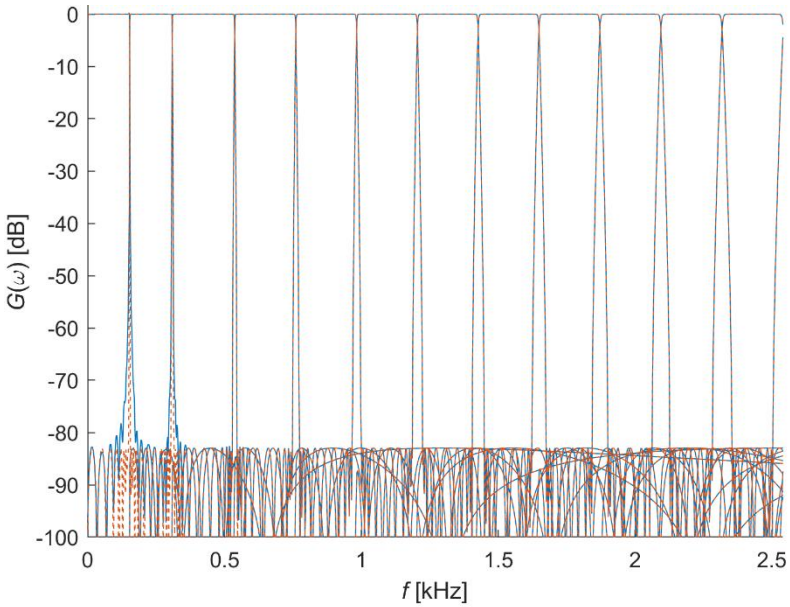


Slika 4.15 Vreme izvršavanja implementacije filtarske banke (zavisnost od broja kanala banke). Ulazni signal je izabrani segment snimljenog signala, a izlaz je iz signala po jedan za svaki kanal.



Slika 4.16 Provera komplementarnosti, na gornjoj slici *all-pass* komplementarnost, a na donjoj slici komplementarnost po snazi.

Pored performansi koje govore o vremenu izvršavanja dizajna filtarske banke, za kvalitet rekonstrukcije signala nakon dekompozicije presudnu ulogu ima izbor dvostruko komplementarne banke kao i dodati blok za faznu korekciju. Na slici 4.16 prikazani su grafici koji verifikuju dvostruku komplementarnost. Na gornjoj slici je, zajedno sa karakteristikom pojačanja svih kanala banke od 72 kanala, crnom linijom prikazana karakteristika dobijena sabiranjem svih frekvencijskih odziva. Na donjoj slici je, zajedno sa karakteristikom pojačanja svih kanala banke, crnom linijom prikazana karakteristika koja verifikuje komplementarnost po snazi. Na obe slike se može videti da su linije koje su indikacija komplementarnosti sa vrlo malim odstupanjima u odnosu na 0 dB. Mala odstupanja su posledica nagomilavanja numeričkih grešaka u procesu projektovanja prototip filtra, zatim projektovanja filtarskih parova koji odgovaraju svakoj etapi kompletne banke kao i u samom procesiranju signala na osnovu kog je karakteristika snimljena.



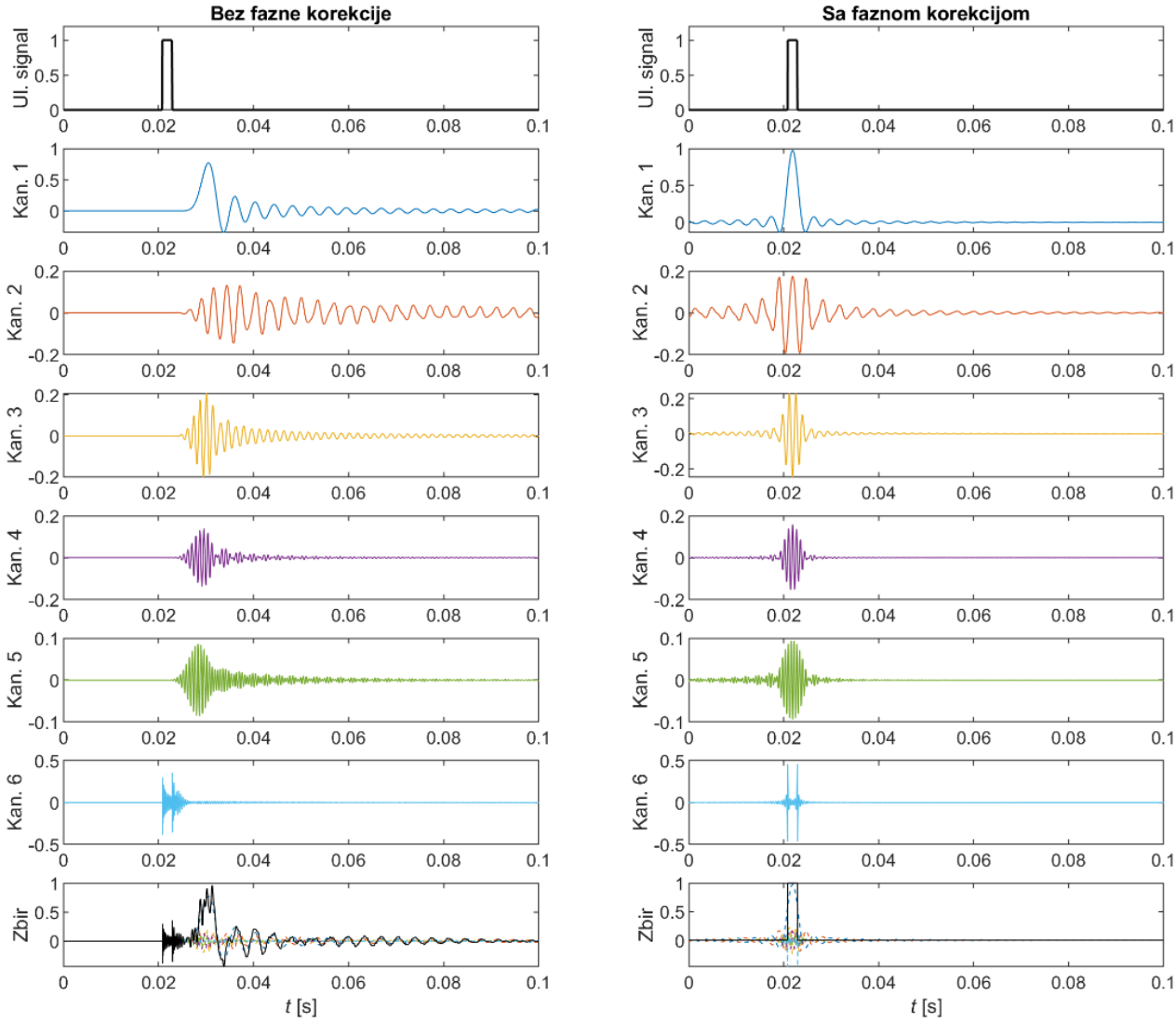
Slika 4.17 Karakteristike slabljenja bez i sa blokom za faznu korekciju.

U mnogim aplikacijama vezanim za audio signale, podrazumeva se da uticaj nelinearne fazne karakteristike nije od značaja [89]. U tom smislu, za obradu audio signala se uspešno koriste i banke kao na šemi sa slike 4.1 samo bez blokova za faznu korekciju. Amplitudske karakteristike banke bez blokova za faznu korekciju su identične karakteristikama sa faznom korekcijom, kao što je prikazano na slici 4.17. Na slici su date karakteristike nekoliko kanala banke čija je ukupna karakteristika prikazana na slici 4.16. Plavom punom linijom prikazane su karakteristike pre bloka za faznu korekciju, a narandžastom isprekidanom linijom nakon bloka za faznu korekciju. Neznatna odstupanja su posledica nagomilavanja numeričkih grešaka, kao što je objašnjeno i uz sliku 4.16.

U preliminarnoj fazi istraživanja u okviru ove doktorske disertacije, kada je usvojen koncept obrade signala u potkanalima, empirijski, početnim subjektivnim testovima se pokazalo da nelinearnost faze može da dovede do problema pri rekombinaciji delimično modifikovanih signala iz potkanala. Da bi se ti problemi izbegli, modifikovana je banka dodavanjem blokova za faznu korekciju, kako je objašnjeno u delu 4.1.2. Kao što se sa slike 4.17 vidi, time nisu narušene amplitudske karakteristike kanalnih filtara, a slika 4.16 potvrđuje da je banka sačuvala osobinu dvostruke komplementarnosti.

Značaj fazne korekcije ilustrovan je na slici 4.18. Na slici je na primeru banke sa manjim brojem kanala (ukupno 6), prikazana dekompozicija na potkanalne signale i rekonstrukcija sabiranjem tih potkanala. Kao ulazni signal korišćen je pravougaoni impuls, odnosno signal strmih ivica, da bi efekat bio jasno vidljiv. Kao što se sa slike vidi, bez fazne korekcije signal se „razmazao“ dok je sa faznom korekcijom pravilno rekonstruisan. Primerom je ilustrovano da fazna korekcija doprinosi boljem

vremenskom poravnanju među potkanalima, što je za koncept obrade signala inharmoničnih tonova koji je razvijen u okviru ove doktorske disertacije i prikazan u ovom poglavlju od velikog značaja.

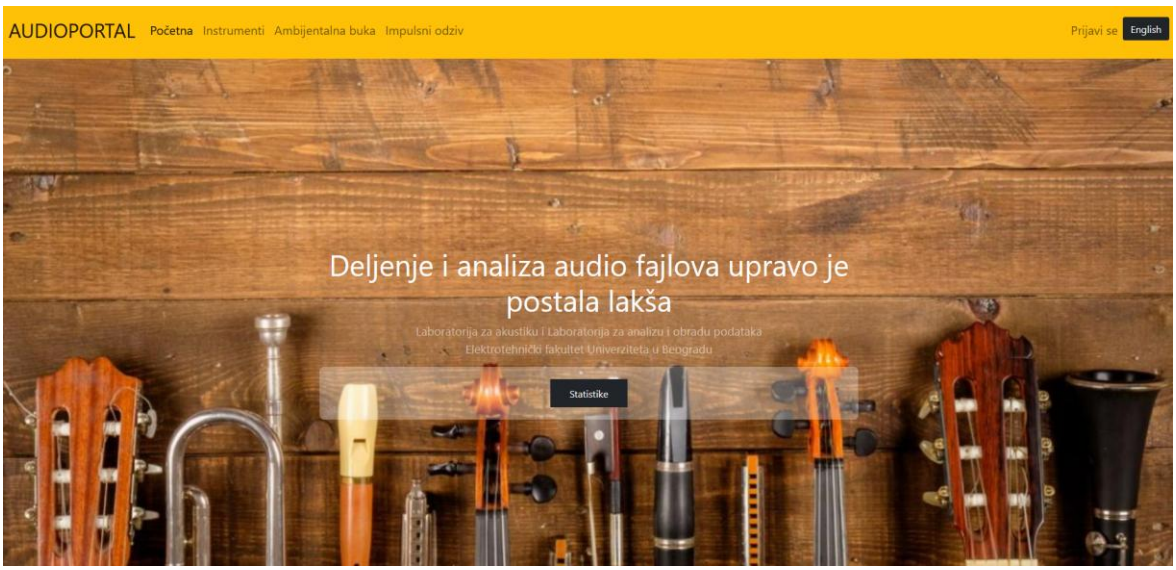


Slika 4.18 Konceptualni prikaz značaja fazne korekcije na primeru četvrtke

5 Snimanje tonova muzičkih instrumenata i repozitorijum za skladištenje snimaka

Za verifikaciju tačnosti i robusnosti algoritama za određivanje koeficijenta inharmoničnosti, kao i za potrebe subjektivnih testiranja, bilo je neophodno snimiti veliki broj tonova muzičkih instrumenata. Snimljeni su tonovi žičanih muzičkih instrumenata koji su predmet ove doktorske disertacije: klavir, čembalo i harfa. Instrumenti su snimani u prostorijama Fakulteta muzičke umetnosti Univerziteta umetnosti u Beogradu. Snimanja su sprovedena u realnim uslovima, odnosno u prostorijama predviđenim za vežbanje instrumenata. Za potrebe snimanja tonova, instrumente su svirali profesori Fakulteta. Tonovi su snimani jedan po jedan, s tim što je svaki ton sniman onoliko dugo koliko je potrebno da zvuk muzičkog instrumenta u potpunosti nestane. Snimljeno je preko 400 tonova navedenih muzičkih instrumenata, od kojih je nekoliko stotina odabrano za prikaz rezultata u ovoj disertaciji. Veliki broj tonova zahtevao je dobru organizaciju i sistematizaciju zbog čega se javila potreba za izradom repozitorijuma za skladištenje audio signala.

Repozitorijum za skladištenje audio datoteka ne predstavlja samo „mesto gde se čuvaju audio *file*-ovi“. U kontekstu ove doktorske disertacije, repozitorijum je organizovan kao skup informacija o snimljenim zvukovima. Svaki zapis u repozitorijumu pored audio *file*-a sadrži i informacije: kada i gde je snimak nastao (lokacija, prostorija), pomoću koje opreme (instrument, mikrofon) i koji su korišćeni parametri za snimanje signala (trajanje, frekvenciju odabiranja, format). Navedene dodatne informacije čine razliku između baze *file*-ova i repozitorijuma kojim se može upravljati. Audio portal koji je opisan u ovom poglavlju predstavlja rezultat saradnje Laboratorije za Akustiku i Laboratorije za analizu i obradu podataka Elektrotehničkog fakulteta [90]. Audio portal, koji se sastoji od nekoliko celina, postavljen je na serveru Elektrotehničkog fakulteta i otvoren je za registrovane korisnike. Registracija na portalu i njegovo korišćenje je besplatno. Portalu se može pristupiti preko sledećeg linka: http://prod-data-app.etf.bg.ac.rs. Na slici 5.1 prikazan je izgled početne stranice realizovanog audio portala. U ovom poglavlju prikazana je arhitektura i organizacija portala namenjenog za skladištenje audio *file*-ova koji su korišćeni u ovoj disertaciji.

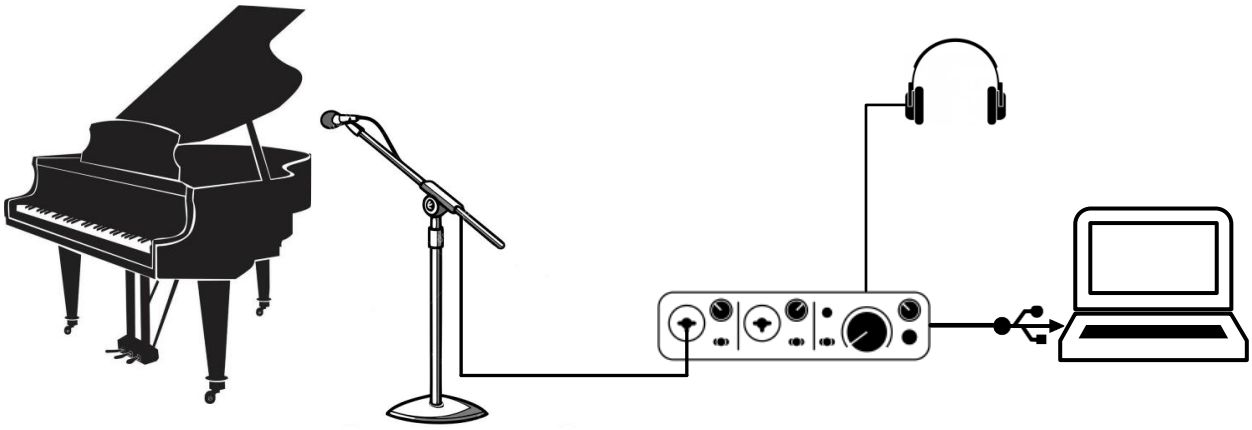


Slika 5.1 Izgled početne stranice audio portala za skladištenje audio datoteka

5.1 Snimanje tonova muzičkih instrumenata

Snimanje tonova muzičkih instrumenata izvršeno je pomoću mikrofona koji se nalazio u blizini instrumenta. Signal sa mikrofona digitalizovan je audio interfejsom, pomoću koga je vršena i polarizacija mikrofona i pojačavanje mikrofonskog signala. Digitalizovani audio signal sniman je

pomoću računara u nekomprimovani audio *file* (.wav format). Na slici 5.2 prikazana je principijelna šema povezivanja uređaja za snimanje tonova muzičkih instrumenata za potrebe ove disertacije.



Slika 5.2 Principijelna šema za snimanje tonova muzičkih instrumenata

Korišćen je ½" merni mikrofon NTi M2230 sa integrisanim pretpojačavačem MA220 [91]. Izabran je merni mikrofon jer je njegova amplitudska karakteristika ravna u frekvencijskim opsegu od interesa i neće menjati spektar snimljenog tona. Za akviziciju signala korišćen je audio interfejs Yamaha Steinberg UR22 [92]. Frekvencija odabiranja iznosila je 48 kHz a broj bita za diskretizaciju signala bio je 24. Sva tri instrumenta snimana su istim uređajima, uz navedene parametre snimanja.

Slika 5.3 Eksperimentalna postavka za snimanje koncernog klavira

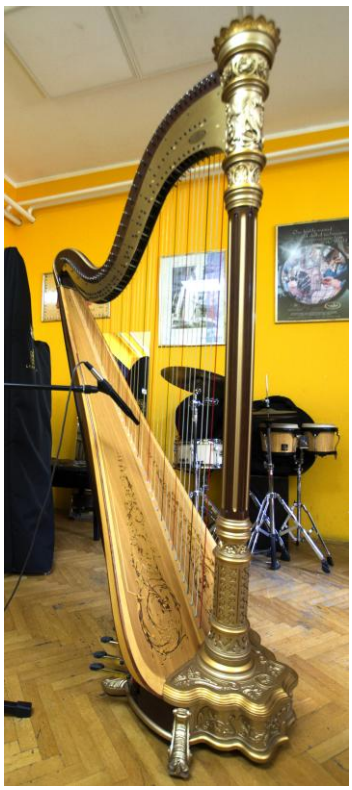
Snimci klavira su realizovani na koncertnom klavirom „Yamaha C7“ [93]. Tonovi su snimljeni u celom opsegu klavira, odnosno svih 88 tonova. Svaki ton je proizveden srednjom jačinom pritiska na dirku i ostavljanjem da se prirodno smiri, bez ikakvog prigušenja ili produžavanja pomoću pedala. Snimci su napravljeni na Fakultetu muzičke umetnosti u Beogradu, u prostoriji namenjenoj za nastavu i vežbanje, koja nije akustički obrađena. Vreme reverberacije prostorije iznosilo je 1.2 sekundi a nivo ambijentalne buke 33 dB(A). Ovi uslovi nisu značajno uticali na kvalitet snimaka jer je mikrofon bio

postavljen u bliskom polju klavira sa otvorenim poklopcem, na 40 cm od žica klavira. Postavka snimanja prikazana je na slici 5.3.

Snimci čembala su realizovani na ručno rađenoj replici franko-flamanskog čembala. Čembalo je napravio Mario Bjelanović. Tonovi su snimljeni u celom opsegu čembala, ukupno 61 ton, u svih pet registara. Svaki ton je proizveden pritiskom na dirku i ostavljanjem da se prirodno smiri, bez ikakvog prigušenja ili produžavanja pomoću pedala. Snimci su napravljeni na Fakultetu muzičke umetnosti u Beogradu, u prostoriji namenjenoj za nastavu i vežbanje, koja nije akustički obrađena. Vreme reverberacije prostorije iznosilo je 0.8 sekundi a nivo ambijentalne buke 30 dB(A). Ovi uslovi nisu značajno uticali na kvalitet snimaka jer je mikrofon bio postavljen u bliskom polju čembala sa otvorenim poklopcem, na 30 cm od žica čembala. Postavka snimanja prikazana je na slici 5.4.

Slika 5.4 Eksperimentalna postavka za snimanje čembala

Snimci harfe su realizovani na koncertnoj harfi „Lyon&Healy Style 23 Bronze“ [94]. Tonovi su snimljeni u celom opsegu harfe, pokrivajući svih 47 žica i sva tri položaja pedala. Svaki ton je proizveden trzanjem žice u njenoj sredini i ostavljanjem da se prirodno smiri, bez ikakvog spoljašnjeg prigušenja. Za potrebe eksperimenta harfu je svirala profesorka harfe sa Fakulteta muzičke umetnosti u Beogradu, koja je takođe aktivna izvođačka umetnica. Njeno stručno znanje je obezbedilo ujednačen intenzitet trzanja i minimalne varijacije u tehnici, doprinoseći konzistentnosti skupa podataka. Snimci su napravljeni na Fakultetu muzičke umetnosti u Beogradu, u prostoriji prvenstveno namenjenoj za nastavu i vežbanje, koja nije akustički obrađena. Vreme reverberacije prostorije iznosilo je 0.5 sekundi a nivo ambijentalne buke 35 dB(A). Ovi uslovi nisu značajno uticali na kvalitet snimaka, jer je mikrofon bio postavljen u bliskom polju izvora zvuka, čime je minimiziran uticaj prostorije. Postavka snimanja prikazana je na slici 5.5.



Slika 5.5 Eksperimentalna postavka za snimanje koncerne harfe

5.2 Koncept portala sa otvorenim podacima

Portali sa otvorenim podacima su osmišljeni tako da olakšaju pronalaženje određenih informacija, kao što katalozi u bibliotekama sadrže skup dodatnih podataka o podacima. Dodatne informacije se odnose na numeričke podatake, a ne na tekstualne dokumente. Korišćenjem određenih pretraživanja ovi podaci olakšavaju pronalaženje podataka koji su od interesa korisniku. Sve više kompanija i javnih uprava otvara delimično ili u potpunosti svoje podatke za širi krug korisnika. Na internetu se može pronaći veliki broj portala sa otvorenim podacima koji nude raznovrsne kategorije podataka za besplatno preuzimanje. Primeri takvih portala prikazani su u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Primeri portala različitih organizacija sa otvorenim podacima

Naziv	***World Bank Open Data***	**WHO (*World Health Organization*)**	***European Union Open Data Portal***	***UCI Machine Learning Repository***
Organizacija	Svetska banka	Svetska zdravstvena organizacija	Evropska Unija	Univerzitet u Kaliforniji, *Irvine*
Vrsta podataka	Statistike vremenskih serija, geoprostorni podaci	Zdravstvene statistike	Geografski, finansijski podaci, podaci o životnoj sredini	Podaci o mašinskom učenju
Tip portala	Događaji u državama	Podaci o zdravlju	Podaci značajni za EU	Podaci u okviru fakulteta
Broj podataka	3 skupova podataka	100 različitih kategorija	11700 skupova podataka	463 skupova podataka
Godina osnivanja	/	/	2012	2007
Link	data.worldbank.org/	www.who.int/data/gho/	data.europa.eu/euodp/en/data/	archive.ics.uci.edu/ml/index.php

Jedan značajan portal sa otvorenim podacima za ovu doktorsku disertaciju je *Freesound* portal [95]. *Freesound* predstavlja portal sa javnom bazom audio *file*-ova. Taj portal je bio uzorni primer prilikom

osmišljavanja i realizacije audio portala prikazanog u ovom poglavlju. U narednoj tabeli su prikazane razlike između *Freesound* portala i dizajniranog portala. Iz Tabele 5.2. se može uočiti da postoji veliki broj funkcionalnosti koje su zajedničke, ali postoje i neke dodatne funkcionalnosti novog portala.

Tabela 5.2. Prikaz funkcionalnosti *Freesound* portala i razvijenog portala

	Novi (dizajnirani) portal	***Freesound***
Labele	Ograničen broj (unapred poznate)	Neograničen broj (unosi sam korisnik)
Preuzimanje *file*-ova	Može se preuzeti više file-ova istovremeno	Pojedinačno preuzimanje file-ova
Objavljivanje *file*-ova	Bira se kategorija prilikom objavljivanja	Nema izbora kategorije
Ocenjivanje *file*-ova	/	Postoji
Prijavljivanje i registracija korisnika	Postoji	Postoji
Statistike	Dostupne svim korisnicima	/
Lokacije mesta nastanka *file*-ova	Postoje podaci za svaki *file*	/

5.3 Korisnički zahtevi za realizaciju sistema

Repozitorijum za audio *file*-e je osmišljen tako da omogući korisniku da pretražuje velike baze audio *file*-ova i preuzima one koji su mu potrebni. Postoje tri kategorije *file*-ova, koje su nastale iz potreba za skladištenjem velikog broja audio snimaka Laboratorije za Akustiku:

- tonovi instrumenata,
- impulsni odzivi prostorija i
- snimci ambijentalne buke.

U narednoj tabeli date su sve labele za svaku kategoriju jer svaka kategorija *file*-ova ima svoje specifične labele koje ih opisuju. U ovoj doktorskoj disertaciji od značaja je kategorija Instrumenti.

Tabela 5.3. Definisane labele za sve kategorije u repozitorijumu

Instrumenti	**Impulsni odzivi**	**Ambijentalna buka**
Tip	Mesto snimanja	Mesto snimanja
Marka	Koordinate lokacije	Koordinate lokacije
Sazvučje	Tip mikrofona	Izvor buke
Ton	Tip zvučnika	Vreme snimanja
Tip akorda	Pobudni signal	Trajanje snimanja
Oktava	Frekvencija odabiranja	Frekvencija odabiranja
Tehnika		
Pisak		
Mesto snimanja		
Koordinate lokacije		
Tip mikrofona		
Frekvencija odabiranja		

Za realizaciju ovakvog sistema potrebno je razviti i *web* stranicu gde korisnik može pristupiti bazi podataka, pretraživati, preuzimati *file*-ove i saznati nešto više o njima. U zahtev takođe spada da

korisnik sam može da dodaje neke audio *file*-ove kao i da ih naknadno menja. Sistem je realizovan kroz dva mikroservisa koji zajedno čine jednu celinu:

- Korisnički mikroservis
- Audio mikroservis

Mikroservisi su realizovani prema istom šablonu, da bi rad na njima bio što sličniji. Komunikacija između servisa realizovana je preko *REST API* ugovora. Za skladištenje podataka koristi se *MySQL Workbench* baza podataka.

5.4 Arhitektura sistema i organizacija privilegija korisnika

U razvoju aplikacija u praksi se koriste [96]:

- Monolitna ili
- Mikroprocesorska arhitektura

Monolitna struktura predstavlja celinu u kojoj se nalazi sva logika i jednostavna je za razvoj. Zbog toga je ova arhitektura tradicionalno bila najčešće korišćena, ali je imala nekoliko mana, koje su sa ubrzanim razvojem interneta postale očigledne. Najveća mana je neskalabilnost. Monolitne aplikacije mogu jedino da se skaliraju vertikalno tako što se poveća procesorska moć i količina memorije ili tako što se povećava broja kopija sistema unutar servera koji raspoređuje opterećenja [96]. Još jedan problem predstavlja izdavanje nove verzije aplikacije jer se mora zaustaviti rad cele platforme, bar na neko kratko vreme.

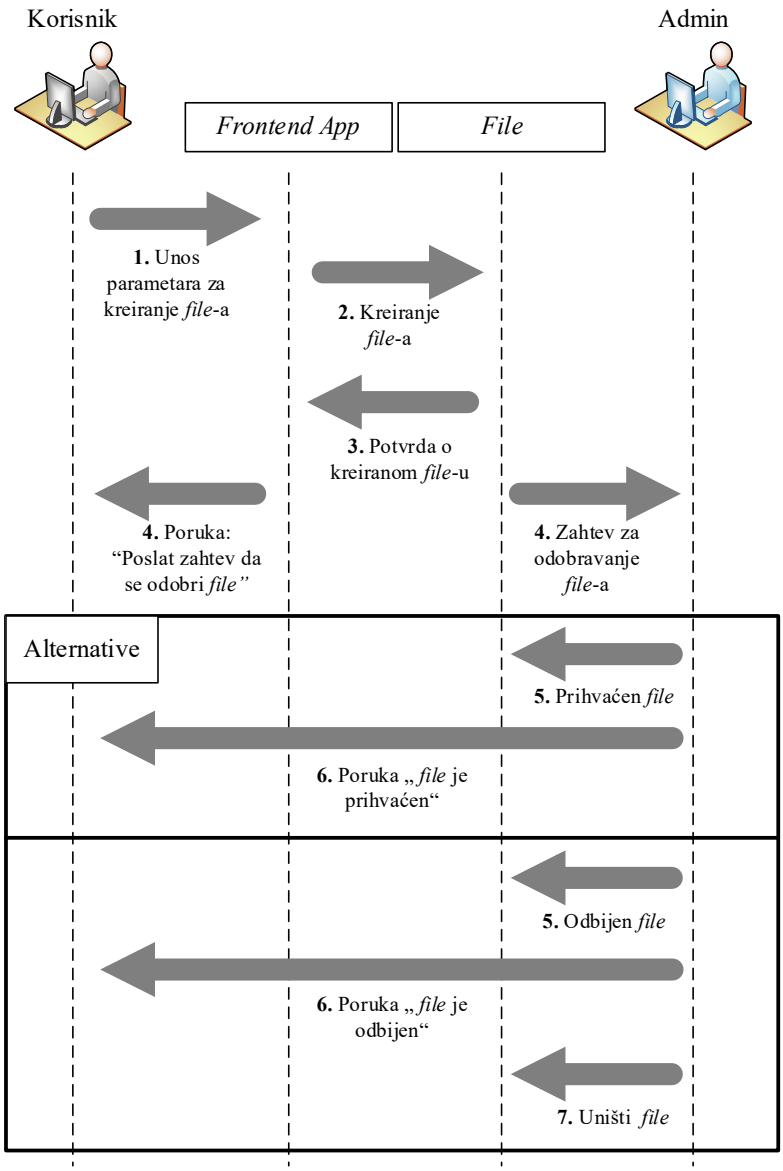
Kao rešenje za navedene probleme koristi se mikroservisna arhitektura. Mikroprocesorska arhitektura se zasniva na slaboj povezanosti, odnosno na ideji da mikroservisi funkcionišu sa minimalno znanja o drugim mikroservisima. Osnovna ideja je da se sistem bazira na velikom broju malih i nezavisnih servisa koji komuniciraju pomoću nekog protokola (HTTP/HTTPS). Problem skalabilnosti rešen je tako što svaki mikroservis može da radi na zasebnom serveru sa zasebnom bazom podataka, što omogućava horizontalnu skalabilnost [96]. Proces izdavanja nove verzije je olakšan time što se izdaje samo jedna komponenta, pa u najgorem slučaju samo jedan deo platforme neće biti dostupan korisnicima. Mane ove arhitekture su to što se zbog postojanja većeg broja servisa mora omogućiti bezbedna međuservisna komunikacija i što se zahteva više operativne memorije. Zbog svojih prednosti za potrebe izrade repozitorijuma za audio *file*-ove u ovoj disertaciji korišćena je mikroprocesorska arhitektura.

Implementacija korisnika neke aplikacije se odnosi na autorizaciju korisnika, što podrazumeva regulisanje njegovog pristupa delovima aplikacije. U realizovanom sistemu postoje tri tipa korisnika:

- neregistrovani korisnik (gost),
- registrovan korisnik i
- administrator.

Za registraciju korisnika potrebno je da svaki korisnik unese svoje korisničko ime, ime i prezime, svoju *email* adresu i svoju lozinku. Nakon toga njegov nalog je kreiran i sačuvan u bazi korisnika. Za pristup sistemu potrebno je uneti *email* adresu i lozinku korisnika.

Gost je korisnik bez privilegija i može samo da pretražuje *file*-ove. Pretraga se vrši po jednom ili više parametara, a parametri su labele koje su definisane u Tabeli 5.3. Pretraga može biti sa delimičnim poklapanjem, odnosno ne mora sadržati ceo naziv da bi se pronašao *file*. Rezultati pretrage prikazuju se u tabli, u kojoj su za svaki *file* prikazane sve labele, ime fajla i korisnik koji je dodao taj *file*. Svaki od *file*-ova može da se reprodukuje, kao i da se na mapi prikaže lokacija gde je snimljen.



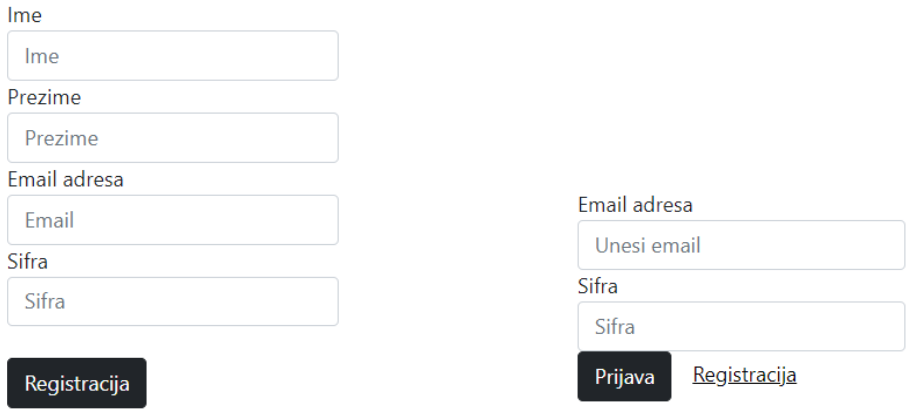
Slika 5.6 Dijagram procesa odobravanja *file*-ova od strane administratora

Svaki registrovani korisnik ima pridruženi profil u sistemu, čija stranica se prikazuje samo korisniku. Profil se sastoji od pregleda audio *file*-ova koje je sam dodao. Za razliku od gosta registrovani korisnici mogu da brišu i menjaju *file*-ove. Brisanjem *file*-ovi se brišu iz baze podataka i nisu više vidljivi ostalim korisnicima. Prilikom izmena vezanih za *file*-ove omogućeno je da se menjaju sve labele koje stoje uz dati *file*, kao i zamena samog audio sadržaja. Registrovani korisnik može da preuzima *file*-ove, pojedinačno ili više njih odjednom. Takođe, registrovani korisnik može da dodaje nove *file*-ove. Prilikom dodavanja *file*-a potrebno je uneti sve potrebne podatake koji su definisani za određenu kategoriju *file*-a. Uneti *file* mora odobriti administrator. Na slici 5.6. prikazan je principijelni dijagram procesa odobravanja *file*-ova korisnika od strane administratora. Neodobreni *file*-ovi se ne prikazuju u rezultatima pretrage, niti postoji bilo kakva interakcija sa njima.

Administrator je korisnik sa najvišim privilegijama u sistemu. On može da odobrava zahteve za novim *file*-ovima. Prilikom odobravanja *file*-a administrator automatski šalje poruku korisniku koji je poslao zahtev na njegovu *email* adresu. Kao i ostali korisnici i administrator može da pretražuje *file*-ove, kao i da izvrši pregled svog profila. Omogućeno mu je i da ima pregled svih korisnika u sistemu i po potrebi može da ih izbriše iz sistema. Takođe, administrator ima i pristup svim *file*-ovima koji postoje u sistemu.

5.5 Opis realizovanog portala za audio snimke

Registrovanje korisnika realizovano je kroz *web* stranicu na kojoj se zahteva da korisnik unese ime, prezime, *email* adresu i lozinku. Pritiskom na dugme *Registracija* šalje se poziv u sistem koji se preusmerava na mikroservis korisnika. Izgled forme za registraciju prikazan je na slici 5.7a). Nakon toga korisnik će ostati na istoj stranici i dobiti poruku da li se uspešno registrovao.



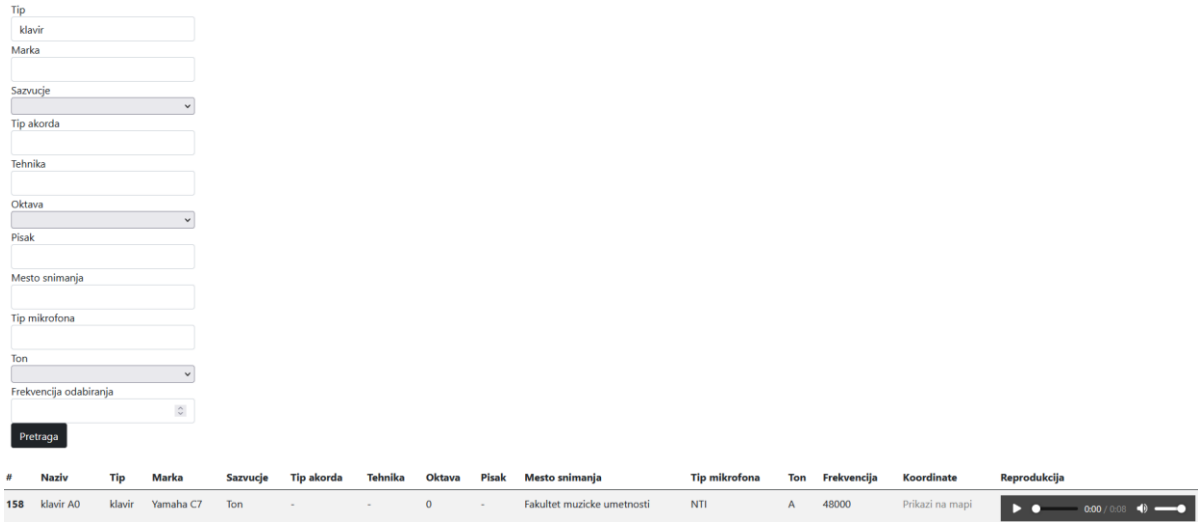
a) b)

Slika 5.7 Izgled: a) forme za registraciju korisnika i b) forme za prijavu na portal

Ukoliko korisnik ima nalog on može sa svojom adresom e-pošte i lozinkom da izvrši prijavljivanje na sistem. Prijava se vrši tako što se zahtev prosledi na korisnički servis i ukoliko korisnik postoji u bazi uspešno se izvrši prijavljivanje i korisnik se prebaci na početnu stanicu. Izgled forme za prijavu prikazan je na slici 5.7b). Izgled glavne stranice prikazan je na slici 5.1. Glavna stranica ima isti izgled za sve tipove korisnika. U slučaju neregistrovanog korisnika(gosta), glavna stranica ima navigacionu traku prikazanu na slici 5.8. On može birati između opcija instrument, ambijentalna buka i impulsni odziv.

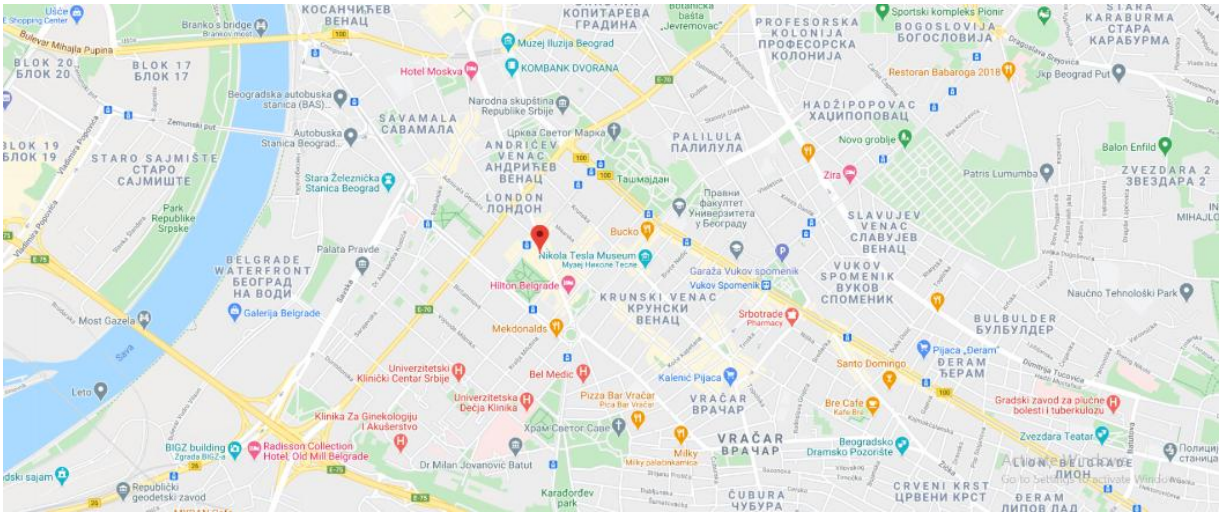
Slika 5.8. Navigaciona traka gosta

Ako gost odabere opciju Instrumenti biće preusmeren na stranicu na kojoj se vrši pretraga snimaka instrumenata po raznim parametrima (slika 5.9.)

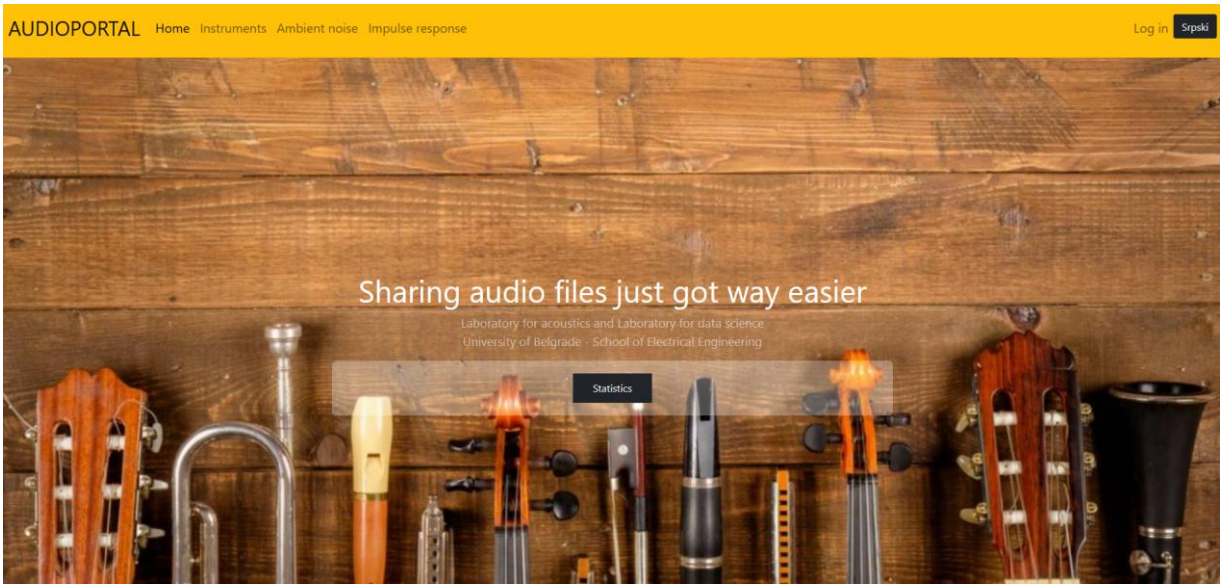


Slika 5.9. *Web* stranica za pretragu instrumenata

Na slici 5.9 se može videti da su izabrani neki od parametara i da je pritiskom na dugme *Pretraga* dobijen rezultat u vidu tabele ispod forme za unošenje parametara pretrage. Sa slike se može uočiti i opcija *Prikaži na mapi* koja preusmerava neregistrovanog korisnika na novu stranu na kojoj će biti prikazana lokacija na mapi gde je dati audio *file* snimljen (slika 5.10.). U poslednjoj koloni se nalazi deo koji služi za reprodukciju. On podržava pokretanje i zaustavljanje snimka kao i povećavanje i smanjivanje nivoa glasnosti.



Slika 5.10. Stranica koja prikazuje lokaciju mesta audio *file*-a na mapi



Slika 5.11. Izgled glavne stranice portala na engleskom jeziku

Pritiskom na dugme *English* na navigacionoj traci funkcionalnosti portala se prikazuju na engleskom jeziku, kao što je prikazano na slici 5.11. Na slici se sada može uočiti dugme *Srpski* koje će vratiti funkcionalnosti na srpski jezik. Glavna stranica registrovanog korisnika ima navigacionu traku prikazanu na slici 5.12.

Slika 5.12. Navigaciona traka za registrovanog korisnika

Kada korisnik izabere opciju *Profil* prikazuje mu se njegov profil na posebnoj stranici(slika 5.13).

Ambijentalna buka:

#	Naziv	Mesto snimanja	Izvor buke	Vreme snimanja	Trajanje snimanja	Frekvencija	Brisanje	Promene	Koordinate	Reprodukcija	Preuzimanje

Dodaj novi ambijent

Impulsni odziv:

#	Naziv	Mesto snimanja	Tip mikrofona	Tip zvucnika	Pobudni signal	Frekvencija	Brisanje	Promene	Koordinate	Reprodukcija	Preuzimanje

Dodaj novi

Instrumenti:

#	Naziv	Tip	Marka	Sazvucje	Tip akorda	Tehnika	Oktava	Pisak	Mesto snimanja	Tip mikrofona	Ton	Frekvencija	Brisanje	Promene	Koordinate	Reprodukcija	Preuzimanje
46	otvorena zica Fes2	Harfa	Lyon&HealyStyle23BronzeConcert	Ton	-	-	2	-	Fakultet muzicke umetnosti	NTI	E	48000	Izbrisi	Izmeni	Prikazi na mapi	0:00 / 0:05	Preuzmi
38	otvorena zica Es1	Harfa	Lyon&HealyStyle23BronzeConcert	Ton	-	-	1	-	Fakultet muzicke umetnosti	NTI	D#	48000	Izbrisi	Izmeni	Prikazi na mapi	0:00 / 0:07	Preuzmi
39	otvorena zica Fes1	Harfa	Lyon&HealyStyle23BronzeConcert	Ton	-	-	1	-	Fakultet muzicke umetnosti	NTI	E	48000	Izbrisi	Izmeni	Prikazi na mapi	0:00 / 0:04	Preuzmi

First Previous 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Next Last

PreuzmiSveSaOveStranice

Dodaj novi

Slika 5.13. Profil korisnika koji je prijavljen na portalu. Prikazan je spisak *file*-ova koje je on postavio na portal

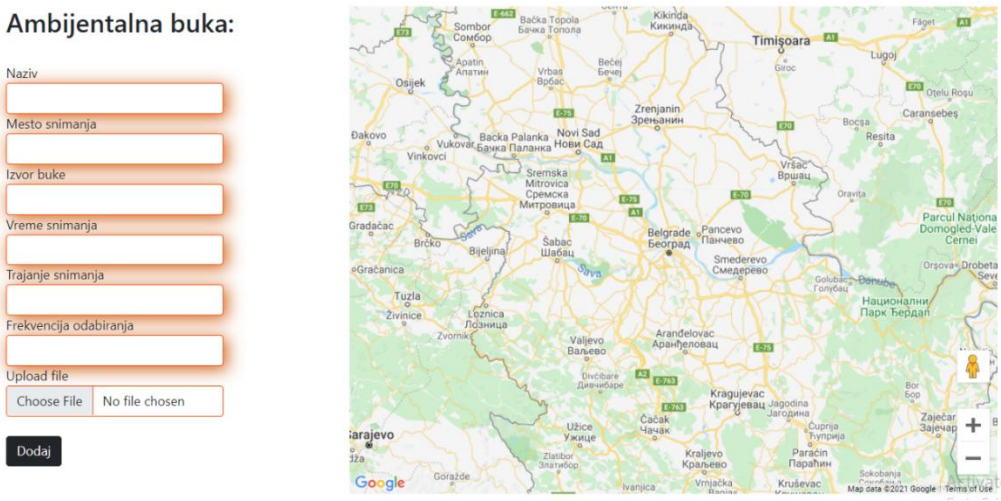
Naziv
otvorena zica Fes2
Tip
Harfa
Marka
Lyon&HealyStyle23BronzeConcert
Sazvucje
Ton
Tip akorda
null
Tehnika
null
Oktava
2
Pisak
null
Mesto snimanja
Fakultet muzicke umetnosti
Tip mikrofona
NTI
Ton
E
Frekvencija odabiranja
48000
Upload file
Browse... No file selected.

Sacuvaj

Slika 5.14. Forma za izmenu *file*-a koje može da izvrši registrovani korisnik ili administrator

Na profilu korisnika će se prikazati svi audio *file*-ovi koje je on dodavao. Kao što se vidi sa slike 5.14. *file*-ovi su podeljeni u tri glavne kategorije (ambijentalna buka, impulsni odziv, instrument) radi bolje preglednosti. Za svaki *file* postoji opcija brisanja, izmene datog *file*-a, kao i prikaz lokacije snimanja *file*-a na mapi, reprodukcija audio zapisa i preuzimanja datog *file*-a. Kada se izabere opcija izmene *file*-a prikazaće se već popunjena forma sa trenutnim labelama datog fajla. Može se izmeniti bilo šta u formi i pritiskom na *Sačuvaj* sačuvaće se sve izmene u bazi.

Za svaku kategoriju postoje i opcije *Dodaj novi* pomoću kojih se odlazi na posebnu stranicu za dodavanje novog *file*-a (Slika 5.15.). Korisnik mora da unese sve labele za dati *file* (polja obeležena crvenom bojom su obavezna), kao i da doda *file* i izabere na mapi lokaciju na kojoj je snimljen dati *file*. Pritiskom na dugme *Dodaj*, *file* sa zadatim parametrima će biti sačuvan u repozitorijumu.

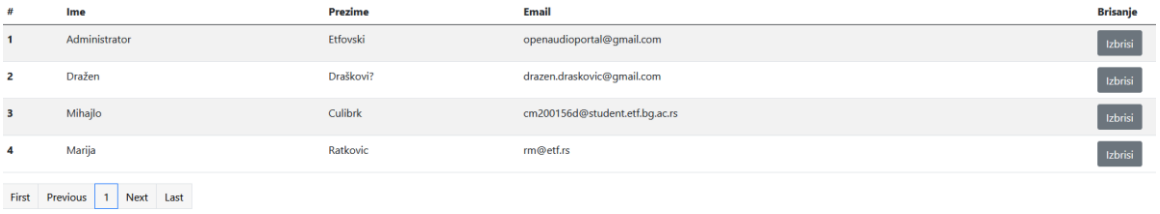


Slika 5.15. Forma za dodavanje *file*-a na portal

Glavna stranica administratora ima navigacionu traku kao na slici 5.16. Ono što je razlikuje od navigacione trake registrovanog korisnika je to da administrator može da izabere opciju pregled svih korisnika, pregled *file*-ova i odobravanje *file*-ova.

Slika 5.16. Izgled navigacione trake za administratora portala

Kada se izabere opcija *Pregled korisnika*, administrator se preusmerava na novu stranicu na kojoj su prikazani svi korisnici portala, uz mogućnost njihovog brisanja (slika 5.17).

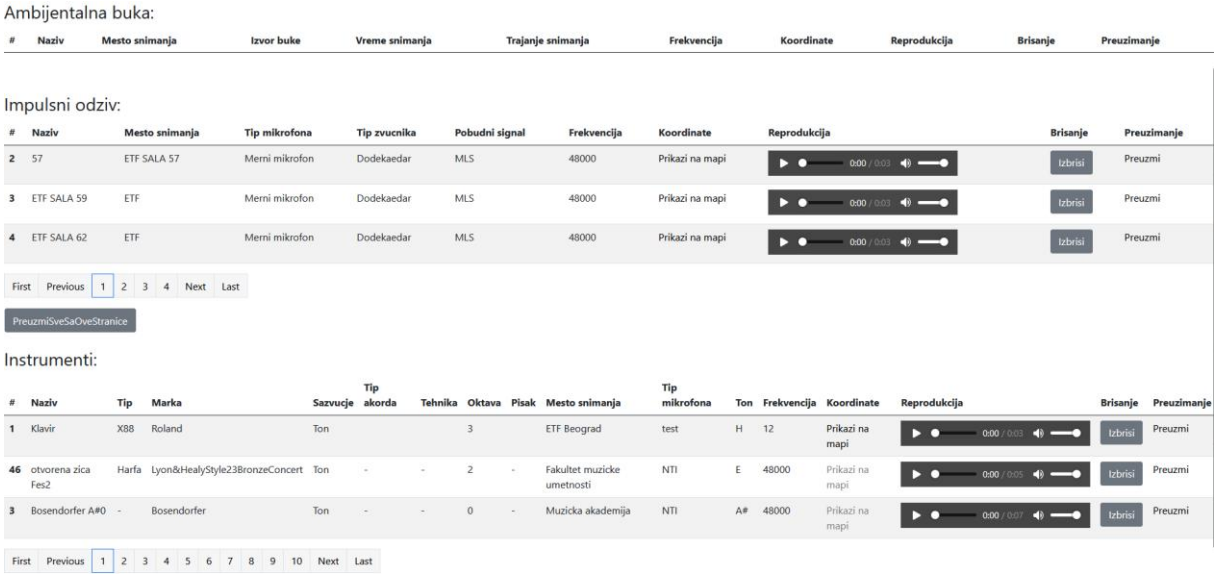


#	Ime	Prezime	Email	Brisanje
1	Administrator	Etfovski	openaudioportal@gmail.com	Izbrisi
2	Dražen	Draškovi?	drazen.draskovic@gmail.com	Izbrisi
3	Mihajlo	Culibrk	cm200156d@student.etf.bg.ac.rs	Izbrisi
4	Marija	Ratkovic	rm@etf.rs	Izbrisi

First Previous 1 Next Last

Slika 5.17. Pregled svih korisnika u sistemu

Ukoliko se izabere opcija *Pregled fajlova* otvoriće se stranica na kojoj su prikazani svi audio *file*-ovi u sistemu, podeljeni prema kategorijama (Slika 5.18.).



Ambijentalna buka:

#	Naziv	Mesto snimanja	Izvor buke	Vreme snimanja	Trajanje snimanja	Frekvencija	Koordinate	Reprodukcija	Brisanje	Preuzimanje

Impulsni odziv:

#	Naziv	Mesto snimanja	Tip mikrofona	Tip zvucnika	Pobudni signal	Frekvencija	Koordinate	Reprodukcija	Brisanje	Preuzimanje
2	57	ETF SALA 57	Merni mikrofon	Dodekaedar	MLS	48000	Prikazi na mapi	0:00 / 0:03	Izbrisi	Preuzmi
3	ETF SALA 59	ETF	Merni mikrofon	Dodekaedar	MLS	48000	Prikazi na mapi	0:00 / 0:03	Izbrisi	Preuzmi
4	ETF SALA 62	ETF	Merni mikrofon	Dodekaedar	MLS	48000	Prikazi na mapi	0:00 / 0:03	Izbrisi	Preuzmi

First Previous 1 2 3 4 Next Last

PreuzmiSveSaOveStranice

Instrumenti:

#	Naziv	Tip	Marka	Sazvucje	Tip akorda	Tehnika	Oktava	Pisak	Mesto snimanja	Tip mikrofona	Ton	Frekvencija	Koordinate	Reprodukcija	Brisanje	Preuzimanje
1	Klavir	X88	Roland	Ton			3		ETF Beograd	test	H	12	Prikazi na mapi	0:00 / 0:03	Izbrisi	Preuzmi
46	otvorena zica Fes2	Harfa	Lyon&HealyStyle23BronzeConcert	Ton	-	-	2	-	Fakultet muzicke umetnosti	NTI	E	48000	Prikazi na mapi	0:00 / 0:05	Izbrisi	Preuzmi
3	Bosendorfer A#0	-	Bosendorfer	Ton	-	-	0	-	Muzicka akademija	NTI	A#	48000	Prikazi na mapi	0:00 / 0:07	Izbrisi	Preuzmi

First Previous 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Next Last

Slika 5.18. Pregled svih *file*-ova u sistemu

6 Kroz prizmu koeficijenta inharmoničnosti: objektivna karakterizacija klavira, čembala i harfe

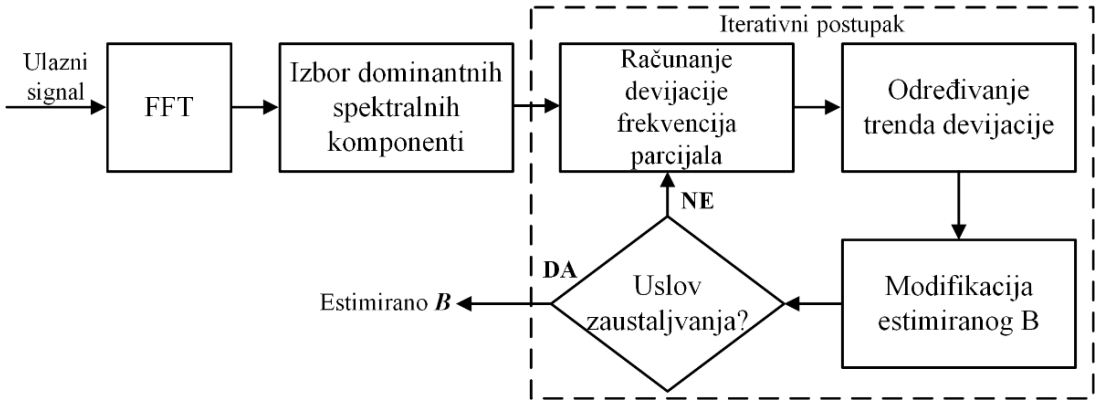
U ovom poglavlju razmatra se objektivna karakterizacija tonova klavira, čembala i harfe na osnovu estimacije koeficijenta inharmoničnosti *B*. Najpre se prikazuju rezultati dobijeni primenom PFD algoritma i opisuje njegova implementacija. U okviru poglavlja, pokazuje se da PFD daje stabilne procene *B* za klavir i čembalo, dok se kod harfe javljaju značajna odstupanja usled prisustva fantomskih parcijala. Radi otklanjanja grešaka u estimaciji *B*, predložen je modifikovani PFD (mPFD) algoritam, čija je implementacija detaljno opisana. U fazi predobrade, mPFD proverava poreklo detektovanih pikova (inharmonični/fantomski parcijal) i identifikovane fantomske komponente isključuje iz procesa estimacije. Za realne snimke sva tri instrumenta upoređene su procene *B* dobijene mPFD i PFD postupcima. Validacija mPFD algoritma sprovedena je na dva nivoa: (1) na kontrolisanom skupu sintetizovanih signala, u kojima se variraju pozicija i broj fantomskih parcijala kao i koeficijent *B* i (2) poređenjem estimiranih vrednosti *B* sa vrednostima izračunatim na osnovu fizičkih parametara žice. Oba pristupa potvrđuju opravdanost i ispravnost predložene modifikacije. Deo rezultata prikazanih u ovom poglavlju koji se odnosi na estimaciju *B* tonova harfe i razvoj mPFD algoritma objavljen je u radu [97], proisteklom iz istraživanja u okviru ove disertacije.

6.1 PFD algoritam

PFD algoritam omogućava automatizovanu procenu koeficijenta inharmoničnosti *B*, odlikujući se niskom složenošću i visokom robusnošću na spektralne varijacije karakteristične za tonove muzičkih instrumenata. Postupak se zasniva na poređenju frekvencija parcijala, procenjenih iz spektra analiziranog tona, sa frekvencijama dobijenim na osnovu analitičkog modela spektra inharmoničnog tona [5], [6], [11]. U modelu se zadaje početna vrednost koeficijenta inharmoničnosti *B*. Algoritam počiva na analitičkom modelu koji predstavlja vezu između frekvencije *k*-tog parcijala f_k analiziranog tona i osnovne frekvencije žice koja osciluje:

$$f_k = kf_0\sqrt{1+Bk^2}, \qquad 6.1$$

gde *k* označava redni broj parcijala, f_0 osnovnu frekvenciju žice, a *B* koeficijent inharmoničnosti.



Slika 6.1 Blok šema PFD algoritma [88]

Na slici 6.1 prikazana je blok šema PFD algoritma za procenu koeficijenta inharmoničnosti. Kao ulazni podaci algoritma koriste se odbirci audio signala koji predstavlja ton analiziranog instrumenta. Zatim se vrši izračunavanje spektra celog signala analiziranog tona primenom FFT-a (*Fast Fourier Transform*). U radu u kome je predložen PFD algoritam, FFT se računa u 2^{16} tačaka [88]. Međutim ta frekvencijska rezolucija nije uvek dovoljna da bi se u spektru jasno razdvojile komponente koje potiču od transverzalnih oscilacija žice i komponente koje potiču od sprege između transverzalnih i longitudinalnih oscilacija. Zato je u analizi koja je sprovedena u disertaciji pri implementaciji PFD

algoritma korišćena FFT analiza u 2^{20} tačaka, čime je poboljšana frekvencijska rezolucija. Nakon računanja spektra sledi deo koji je odgovoran za izdvajanje spektralnih pikova u cilju smanjivanja količine podataka za dalji proračun. Spektar se deli na frekvencijske podopsege u kojima se očekuje pojava određenih parcijala analiziranog tona. U svakom podopsegu bira se 10 lokalnih maksimuma najvećih amplituda [88]. Širina svakog podopsega jednaka je $5f_1$, gde f_1 predstavlja frekvenciju drugog parcijala (prvog sledećeg nakon osnovne frekvencije tona f_0) [88]. Nakon izbora 10 lokalnih maksimuma iz svakog podopsega, dobija se rezultujući niz frekvencija koji se koristi kao ulazni podatak za iterativni postupak PFD algoritma, koji je na blok šemi (slika 6.1) označen isprekidanim linijama. Iterativna petlja se sastoji iz tri dela. U prvom delu računa se devijacija frekvencija parcijala. Devijacija se definiše kao razlika između niza frekvencija procenjenih iz spektra f_k i niza frekvencija $\hat{f}_k$ dobijenih na osnovu jednačine 6.1. Broj parcijala k koji se koristi za određivanje devijacije je fiksan, nezavisan od frekvencije analiziranog tona i postavljen je na 50. S obzirom da je algoritam osmišljen po gabaritima spektra tonova klavira, vrednost od 50 harmonika je opravdana. Međutim, broj analiziranih parcijala biće revidiran u nastavku i prilagođen kako čembalu i harfi, tako i klaviru u zavisnosti od osnovne frekvencije. Na početku bloka odgovornog za računanje devijacije parcijala potrebno je dodeliti početnu vrednost koeficijentu inharmoničnosti $B=10^{-4}$ kako bi se na osnovu jednačine 6.1 dobio niz frekvencija $\hat{f}_k$. Zatim se unutar definisanog intervala $\left[\hat{f}_k - \Delta f, \hat{f}_k + \Delta f\right]$ vrši odabir frekvencija f_k koje odgovaraju komponentama najvećih amplituda. Parametar Δf definisan je kao $\Delta f=0.4f_0$ [88]. Konačno devijacija frekvencija parcijala se računa kao $D_k = \hat{f}_k - f_k$.

Drugi deo iteracione etape jeste određivanje trenda devijacije D_k. Trend devijacije ukazuje na to da li treba početnu vrednost koeficijenta inharmoničnosti B smanjiti ili povećati. Trend se računa kao:

$$sign\left(\sum_{k=2}^{K_{max}} sign\left(D_{k+1} - D_k\right)\right), \qquad 6.2$$

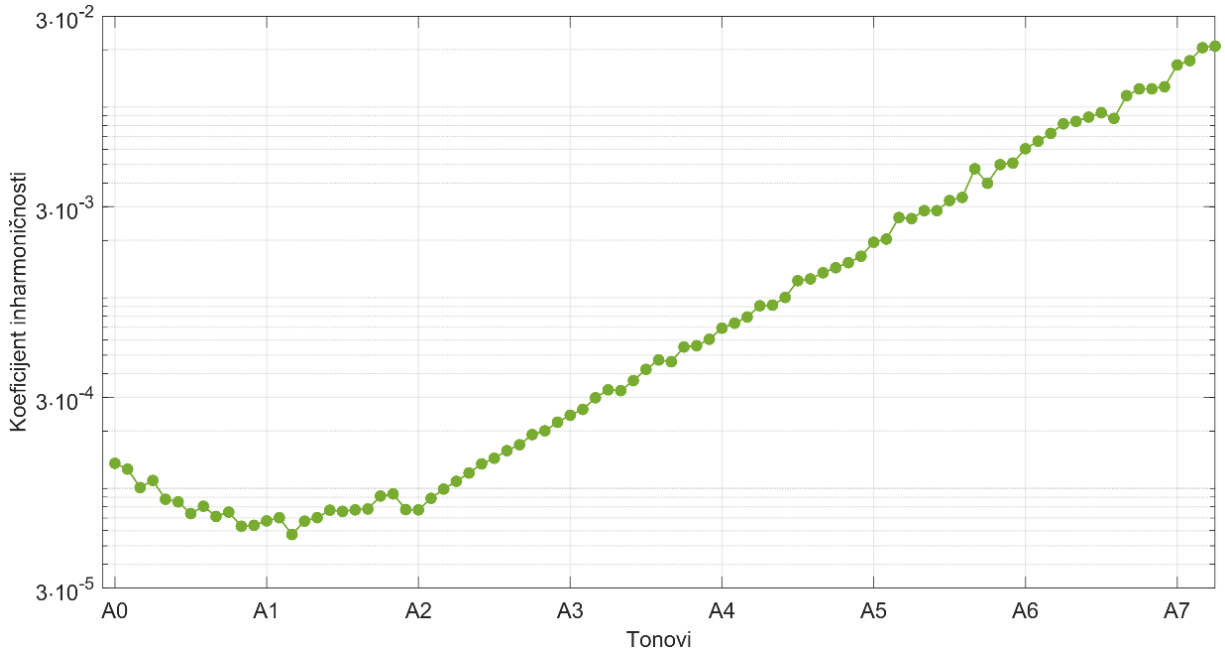
gde K_{max} označava ukupan broj frekvencija parcijala. Rezultat trenda predstavlja znak, koji može biti pozitivan ili negativan. U trećem delu iteracione petlje, vrši se modifikacija vrednosti koeficijenta inharmoničnosti na osnovu prethodno izračunatog trenda. Modifikacija se sprovodi tako što se početna vrednost B množi faktorom 10^{δ}, gde je parametru δ inicijalno dodeljena vrednost 1. Ukoliko je znak trenda pozitivan, pozitivan znak se dodeljuje i parametru δ i obrnuto. U slučaju kada dva uzastopna trenda imaju različite znakove, parametar δ se deli sa 2. Množenja koeficijenta inharmoničnosti B sa faktorom 10^{δ} se sprovodi kako bi se vrednost B povećala ili smanjila sve dok kriva devijacije frekvencije parcijala D_k ne postane što zaglađenija. Zaglađena D_k kriva (poželjno ravna linija) se smatra znakom konvergencije algoritma. Prekid iterativne petlje se može sprovesti uz pomoć dva kriterijuma: prvi je nakon 40 iteracija, a drugi kriterijum je nakon ispunjavanja $|\delta|<10^{-4}$. Oba kriterijuma vode ka istom konačnom ishodištu, odnosno istoj vrednosti procenjenog koeficijenta inharmoničnosti B analiziranog tona.

6.2 Rezultati PFD algoritma: klavir, čembalo i harfa

6.2.1. Klavir

Na slici 6.2 prikazane su vrednosti koeficijenta inharmoničnosti B za tonove klavira u celom opsegu od A0 do C8. Tonovi su poređani hromatski, što znači da je razmak između njih polustepen (100 centi). Vrednosti koeficijenta inharmoničnosti B procenjene su na osnovu PFD algoritma, gde su tonovi predstavljali snimljene tonove odsvirane na Yamaha C7 grand koncertnom klaviru. Procenjene vrednosti koeficijenta inharmoničnosti B kreću se u opsegu od $5.5\cdot10^{-5}$ do $2.1\cdot10^{-2}$. Oblik krive duž celog opsega saglasan je sa nalazima iz literature [6], [88], što je i očekivano s obzirom da je algoritam prevashodno napravljen za procenu koeficijenta inharmoničnosti klavira. Na nižim frekvencijama od tona A0 do tona A2 promena je ujednačenija, dok od tona A2 sve do C8 kriva ima monoton rast. Kod nižih frekvencija očekivano su vrednosti koeficijenta inharmoničnosti B manje,

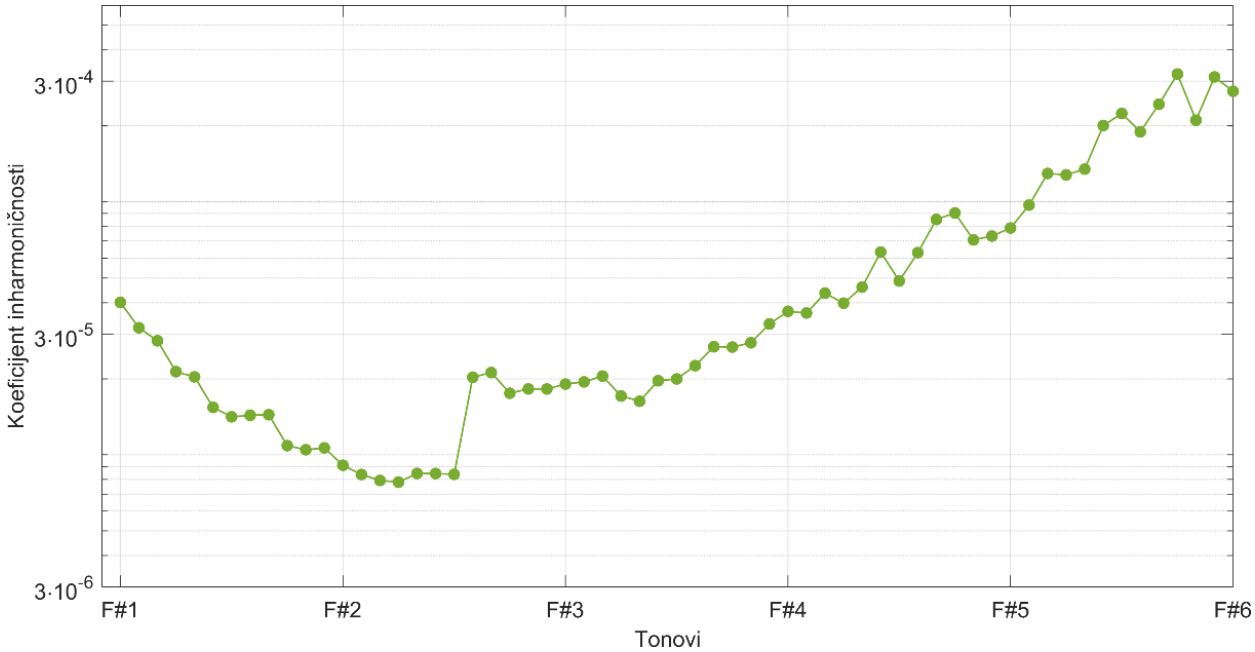
jer je u tom frekvencijskom opsegu tenzija žica velika (≈1720-750 N), te ona kao dominantan faktor smanjuje vrednost *B*. Budući da su tenzija i koeficijent inharmoničnosti *B* u obrnutoj srazmeri. Za razliku od toga na višim frekvencijama od A2 do C8, raspon tenzija kojom su žice zategnute je uži (≈750-600 N), te uočeni monotoni porast *B* pretežno odražava uticaj geometrijskih parametara žica, pre svega njihove efektivne dužine i prečnika.



Slika 6.2 Koeficijent inharmoničnosti *B* klavira u opsegu od A0 do C8

6.2.2. Čembalo

Na slici 6.3 prikazane su vrednosti koeficijenta inharmoničnosti *B* za tonove čembala u opsegu od Fis1 do Fis6. Kao i u slučaju klavira tonovi su poređani hromatski. Vrednosti koeficijenta inharmoničnosti *B* procenjene su na osnovu PFD algoritma, gde su tonovi predstavljali snimljene tonove odsvirane na replici franko-flamanskog čembala iz 18. veka. Procenjene vrednosti koeficijenta inharmoničnosti *B* kreću se u opsegu od $8.6 \cdot 10^{-6}$ do $3.4 \cdot 10^{-4}$ i značajno su niže u odnosu na klavir.

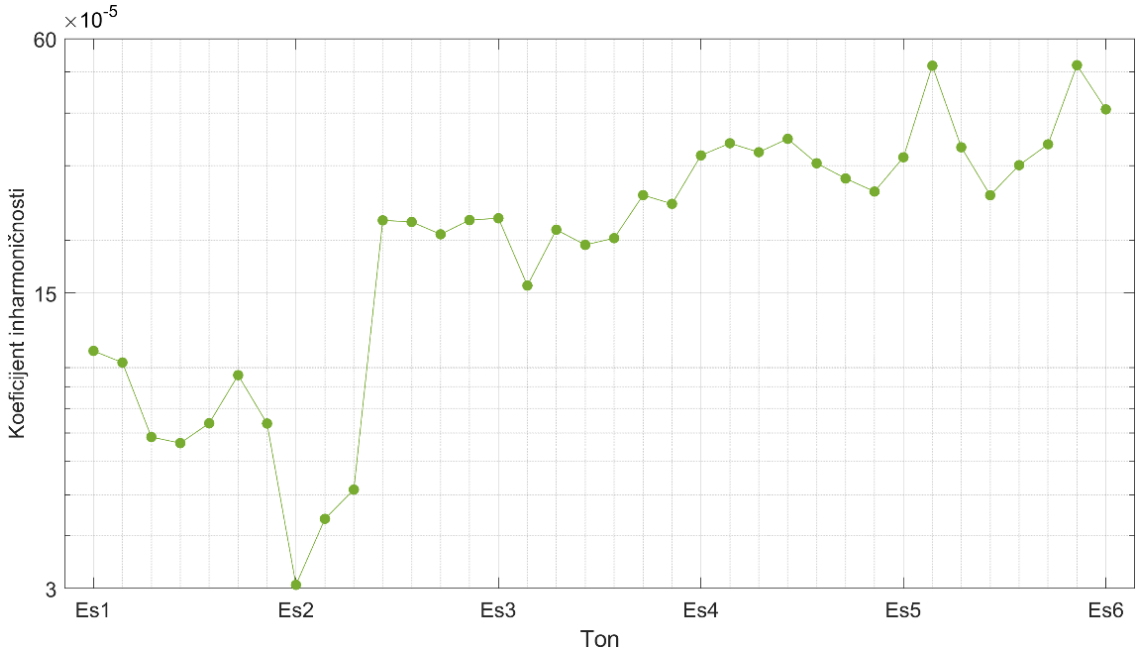


Slika 6.3 Koeficijent inharmoničnosti *B* čembala u opsegu od F#1 do F#6

Pored samih vrednosti i oblik krive koeficijenta inharmoničnosti je drugačiji. Može se primetiti kako od tona C3 (20. tačka po redu) postoji skok za red veličine u vrednostima koeficijenta inharmoničnosti, sa 10^{-6} *B* dobija vrednost gde je eksponent 10^{-5}. Nakon toga od C3 do Fis6 uočava se monotoni rast. Međutim, za razliku od krive inharmoničnosti kod klavira gde je trend krive bio monoton, kod čembala to nije slučaj za ceo frekvencijski opseg od interesa. Počev od tona C5 (poslednjih 20 tačaka) kriva koeficijenta *B* odstupa od očekivanog monotonog trenda. Takav izgled krive upućuje na problem u proceni koeficijenta *B*.

6.2.3. Harfa

Na slici 6.4 prikazane su vrednosti koeficijenta inharmoničnosti *B* za tonove harfe u opsegu od Es1 do Es6. Za razliku od klavira i čembala kod kojih je moguće odsvirati hromatsku lestvicu u slučaju harfe to nije moguće. Zbog toga je, da bi se dobila hromatska lestvica, bilo neophodno kombinovati tonove odsvirane uz pomoć prve i druge pedale. Vrednosti koeficijenta inharmoničnosti *B* procenjene su na osnovu PFD algoritma, gde su tonovi predstavljali snimljene tonove odsvirane na Lyon&Healy Style 23 Bronze koncertnoj harfi. Vrednosti *B* kreću se u opsegu od $3 \cdot 10^{-5}$ do $5.2 \cdot 10^{-4}$ i nalaze se između procenjenih vrednosti klavira i čembala.



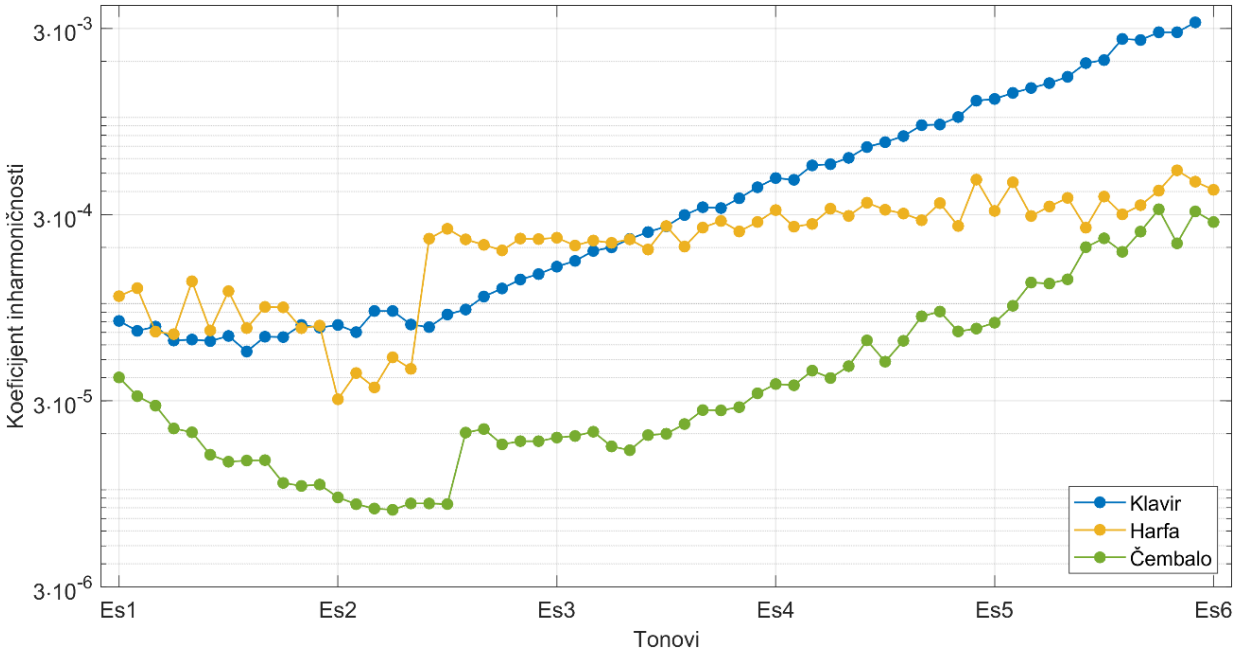
Slika 6.4 Koeficijent inharmoničnosti *B* harfe u opsegu od Es1 do Es6

U poređenju sa krivama koeficijenta inharmoničnosti klavira i čembala, kriva inharmoničnosti harfe pokazuje veća odstupanja od monotonog trenda, i to ne lokalno, već u čitavom opsegu: na niskim, srednjim i visokim frekvencijama. Analizom pojedinačnih spektara harfe, kao i prema nalazima iz literature, potvrđeno je izraženo prisustvo fantomskih parcijala. Kako PFD u svakom frekvencijskom podopsegu bira komponentu maksimalne amplitude, prisustvo fantomskog parcijala može dovesti do toga da se, umesto inharmoničnog transverzalnog parcijala, u dalju proceduru odabere fantomska komponenta. To neposredno rezultuje pristrasnom (pogrešnom) procenom koeficijenta inharmoničnosti *B*.

6.2.4. Zaključak

Rezultati procenjenog koeficijenta inharmoničnosti pomoću PFD algoritma pokazuju očekivan obrazac ponašanja. Kod klavira dobijena je monotona kriva zavisnosti koeficijenta inharmoničnosti od frekvencije tona, uz najveće vrednosti koeficijenta *B*. Kod čembala su vrednosti *B* za red veličine niže u odnosu na klavir i trend krive je pretežno monoton, sa manjim odstupanjima na višim frekvencijama. Nasuprot tome, kod harfe se javljaju izražena lokalna iskakanja u vrednostima

koeficijenta inharmoničnosti duž celog opsega. „Nazubljenost“ krive u slučaju harfe govori o izraženom prisustvu fantomskih parcijala u spektrima tonova koji utiču na procenu koeficijenta inharmoničnosti. Radi mogućnosti poređenja na slici 6.5 prikazani su koeficijenti inharmoničnosti sva tri instrumenta za tonove koji pripadaju zajedničkom registru. Na osnovu zbirnog prikaza jasno se ističu razlike između koeficijenata inharmoničnosti instrumenata i ograničenja PFD algoritma naročito u slučaju harfe. Polazeći od ovih zapažanja, u narednom poglavlju uvodi se modifikovani PFD algoritam (mPFD), koji detektuje i eliminiše fantomske parcijale iz procene koeficijenta inharmoničnosti. Predloženi algoritam mPFD za procenu koeficijenta inharmoničnosti koristi broj parcijala koji je karakterističan za posmatrani instrument i zavisi od osnovne frekvencije tona. U originalnom PFD algoritmu broj parcijala imao je fiksne vrednosti. Prema uvidu u literaturu sistematska identifikacija i eliminacija fantomskih parcijala u okviru PFD algoritma nije objavljivana, te predloženi pristup predstavlja doprinos ove disertacije.



Slika 6.5 Poređenje koeficijenata inharmoničnosti *B* klavira, čembala i harfe u frekvencijskom opsegu od Es1 do Es6

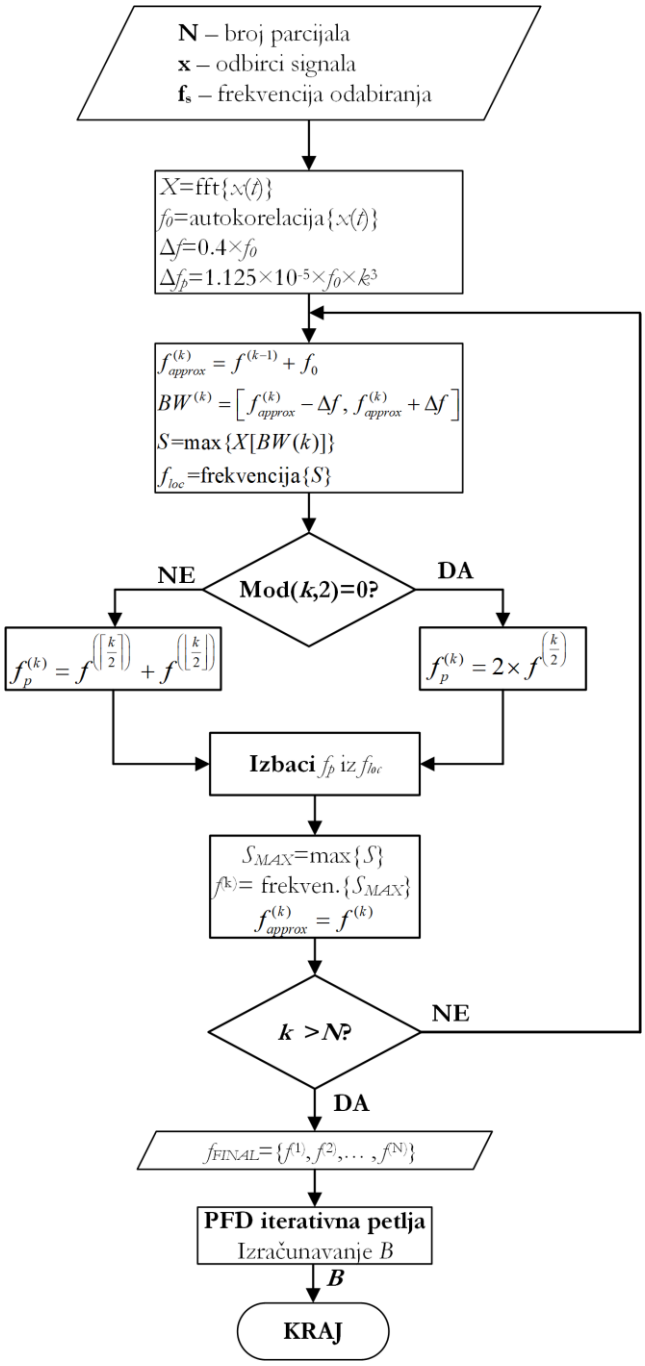
6.3 Modifikovani PFD

U poglavlju 2.2 pokazano je da je prisustvo fantomskih parcijala veoma izraženo kod žičanih muzičkih instrumenata, a naročito kod harfe. Utvrđeno je ne samo da su ove komponente učestale, već i da njihove amplitude često dostižu, pa i prevazilaze amplitude odgovarajućih inharmoničnih parcijala. Kako PFD algoritam u svakom posmatranom frekvencijskom opsegu bira komponentu najveće amplitude i proglašava je parcijalom, deo fantomskih komponenti biva pogrešno identifikovan kao inharmonični parcijal, što utiče na procenu koeficijenta inharmoničnosti *B*. Da bi se taj uticaj umanjio, uvodi se modifikacija PFD algoritma (mPFD) koja eksplicitno prepoznaje i isključuje fantomske parcijale iz postupka procene.

6.3.1. Opis algoritma

Radi preglednosti na slici 6.6 dat je dijagram toka modifikovanog PFD algoritma koji sažima ključne faze postupka i korake za eliminaciju fantomskih parcijala. Kao ulazni parametri algoritmu se prosleđuju: snimak snimljenog tona instrumenta (vremenska serija $x[n]$), frekvencija odabiranja sa kojom je snimak napravljen f_s i broj parcijala N koji je neophodan za procenu koeficijenta inharmoničnosti. Zatim se računa spektar signala pomoću FFT metode u 2^{20} tačaka kao i u slučaju PFD algoritma. Na osnovu izračunatog spektra vrši se preliminarno određivanje osnovne frekvencije tona f_0 pomoću autokorelacione funkcije. Vrednost dobijena na ovaj način koristi se u inicijalnoj

proceni ($f^{(0)}=f_0$) i u kasnijim koracima algoritma biće precizno izračunata. Nakon toga se definiše niz f, kojem se dodeljuju frekvencije parcijala, kao i niz f_p kojem će se dodeljivati frekvencije fantomskih parcijala. U fazi inicijalizacije, definišu se i parametri Δf i Δf_p, koji određuju zone pretrage parcijala, odnosno fantomskih parcijala. Parametar Δf ima istu vrednost kao i u originalnom PFD algoritmu i zavisi isključivo od osnovne frekvencije tona f_0. Za razliku od Δf ,parametar Δf_p zavisi i od osnovne frekvencije tona f_0 i od rednog broja parcijala k, budući da se razmak između fantomskih i inharmoničnih parcijala povećava sa porastom rednog broja parcijala. Parametar Δf_p je od posebnog značaja za mPFD algoritam, jer omogućava identifikaciju fantomskog parcijala u veoma uskom frekvencijskom opsegu i time smanjuje rizik da se greškom eliminiše inharmonični parcijal. Pošto Δf_p, kao i broj parcijala N, zavisi od instrumenta i od frekvencijskog registra, konkretno određivanje ovih veličina izlaže se u nastavku u zasebnim potpoglavljima 6.3.2 i 6.3.3.



Slika 6.6 Dijagram toka modifikovanog PFD algoritma (mPFD)

Sledeći korak algoritma obuhvata određivanje frekvencija parcijala koje se koriste kao ulaz u iterativni postupak za procenu koeficijenta inharmoničnosti. Za svaki parcijal tona određuje se

približna vrednost frekvencije f_{approx} sabiranjem osnovne frekvencije i frekvencije prethodno određenog parcijala $f^{(k-1)}$. Zatim se u okviru intervala $\left[f_{approx}^{k} - \Delta f, f_{approx}^{k} + \Delta f \right]$ izdvajaju frekvencije 10 komponenata najvećih amplituda i kao takve čine niz f_{loc}. U originalnom PFD algoritmu, frekvencija parcijala $f^{(k)}$ određivala bi se iz niza f_{loc} kao frekvencija koja odgovara komponenti najveće amplitude. Međutim, takav pristup ne daje informaciju da li izabrana frekvencija odgovara inharmoničnom transverzalnom parcijalu ili fantomskom parcijalu tona. Kao ključni korak predložene modifikacije uveden je verifikacioni mehanizam „provera fantoma“ kojim se ocenjuje priroda izabrane frekvencije.

U delu algoritma „provera fantoma“ najpre se utvrđuje da li je redni broj parcijala *k,* čija se frekvencija $f^{(k)}$ procenjuje, paran ili neparan. Na osnovu toga se odgovarajućim izrazom računa frekvencija pripadajućeg fantomskog parcijala f_p. Izrazi koji određuju frekvencije fantomskih parcijala, bilo oni parni ili neparni, prethodno su objašnjeni u poglavlju 2.2.3. Zatim se proverava da li neka od frekvencija iz niza f_{loc} pripada opsegu fantomskih parcijala $\left[f_p^k - \Delta f_p, f_p^k + \Delta f_p \right]$. Ukoliko pripada, te frekvencije se eliminišu iz niza f_{loc} zajedno sa amplitudama koje odgovaraju komponentama te frekvencije iz niza *S*. Nakon toga se identifikuje u nizu *S* komponenta najveće amplitude i frekvencija te komponente proglašava se frekvencijom inharmoničnog transverzalnog parcijala $f^{(k)}$. Opisana procedura verifikacije fantomskog parcijala sprovodi se za svih *N* parcijala analiziranog tona. Time se završava blok zadužen za identifikaciju prominentnih spektralnih komponenti. Krajnji rezultat ovog bloka jeste niz frekvencija f_{FINAL}, koji sadrži frekvencije inharmoničnih transverzalnih parcijala. Niz f_{FINAL} koristi se kao ulazni niz iterativne petlje PFD algoritma. Sama iterativna petlja implementirana je na isti način kao u PFD algoritmu, opisanom u prethodnom potpoglavlju 6.1. Rezultat algoritma je procenjena vrednost koeficijenta inharmoničnosti *B* za analizirani ton.

6.3.2. Određivanje broja parcijala *N*

Određivanje ukupnog broja parcijala za procenu koeficijenta inharmoničnosti teško je u potpunosti automatizovati. U snimcima tonova klavira, čembala i harfe, pored samih artefakata svojstvenih načinu pobuđivanja žica, prisutni su i uticaji prostorije i ambijentalna buka. Istovremeno, kako se ovde vrši objektivna karakterizacija tri različita instrumenta kroz prizmu inharmoničnosti, nije primereno usvojiti fiksan broj parcijala za sve tonove. Zbog toga je primenjen polu-automatski postupak sa završnom vizuelnom inspekcijom. Za svaki instrument ceo frekvencijski opseg podeljen je na oktave (12 tonova), a kao reprezentativan izabran je ton iz sredine svake oktave (6. po redu). Zatim se ton analizira u aplikaciji MuPI. U spektralnom prikazu, uz pomoć pomoćnih linija koje se mogu ručno pomerati, prebrojane su prominentne komponente koje se izdvajaju iznad sopstvenog šuma. Tako dobijeni broj parcijala dodeljen je ostalim tonovima unutar iste oktave, čime je formirana preliminarna tabela za sva tri instrumenta. Karakteristično je da sa porastom frekvencije tona opada i broj izraženih spektralnih komponenti. Zbog toga je u višim registrima potrebna finija podela, jer ne poseduju svi tonovi unutar oktave isti broj parcijala. Finija podela je izvedena iterativno gde se prvo na celom opsegu procenjuje koeficijent inharmoničnosti na osnovu mPFD algoritma. Zatim, za tonove gde kriva koeficijenta inharmoničnosti nema monotoni trend, izvršena je ciljano spektralna provera i smanjenje broja parcijala za 2. Na ovaj način, iterativnim polu-automatskim postupkom, određene su konačne vrednosti parcijala *N* sa kojima se ulazi u dalju procenu koeficijenta inharmoničnosti. Opsezi ukupnog broja parcijala *N* za klavir, čembalo i harfu dati su u Tabeli 6.1, dok se vrednosti za svaki ton ponaosob nalaze u tabeli u prilogu.

Tabela 6.1 Opsezi ukupnog broja parcijala *N* u zavisnosti od instrumenta

Instrument	Opseg ukupnog broja parcijala N
Klavir	60 do 3
Čembalo	100 do 15
Harfa	25 do 10

6.3.3. Određivanje parametra Δf_p

Parametar Δf_p predstavlja važan deo predložene modifikacije algoritma, jer na osnovu njega se određuje frekvencijski opseg u kom se vrši provera prirode parcijala, odnosno da li je parcijal u posmatranom opsegu fantomski ili ne. Da bi se došlo do odgovarajućeg izraza za Δf_p za svaki od instrumenata posmatra se prvo razlika između frekvencije neparnog fantomskog parcijala i inharmoničnog parcijala čiji je redni broj k. Neka je neparni parcijal jednak zbiru frekvencija dva inharmonična parcijala čiji su redni brojevi m i n i neka je redni broj inharmoničnog parcijala $k=m+n$. Zatim pretpostavimo ton osnovne frekvencije f_0 sa koeficijentom inharmoničnosti B čija je vrednost mala i pozitivna. U tom slučaju frekvencije parcijala definisane su prema izrazu 6.1. Frekvencija fantomskog parcijala, predstavlja zbir inharmoničnih parcijala sa rednim brojevima m i n:

$$f_p = f_m + f_n = f_0\left[m\sqrt{1+Bm^2} + n\sqrt{1+Bn^2}\right]. \qquad 6.3$$

Frekvencija inharmoničnog parcijala sa rednim brojem k ($k=m+n$) definisana je kao:

$$f_k = kf_0\sqrt{1+Bk^2}\ . \qquad 6.4$$

Razlika frekvencija fantomskog parcijala i najbližeg inharmoničnog parcijala u tom slučaju je:

$$\Delta f_{fantom} = f_p - f_k = f_0\left[m\sqrt{1+Bm^2} + n\sqrt{1+Bn^2} - k\sqrt{1+Bk^2}\right]. \qquad 6.5$$

Veza između rednih brojeva m, n i k, za parne i neparne vrednosti k je:

$$\begin{aligned} m &= \frac{k-1}{2}; n = \frac{k}{2}, \text{ za neparno } k \\ m &= n = \frac{k}{2}, \text{ za parno } k. \end{aligned} \ . \qquad 6.6$$

Pošto je vrednost koeficijenta inharmoničnosti predstavljena kao mala i pozitivna, može se primeniti binomna aproksimacija $\sqrt{1+x} = 1+\frac{x}{2}$. Primenom ove aproksimacije izraz 6.5 se može napisati kao:

$$\Delta f_{fantom} \approx \begin{aligned} &\frac{Bf_0}{2}\left[\left(\frac{k-1}{2}\right)^3 + \left(\frac{k+1}{2}\right)^3 - k^3\right] = \frac{3}{8}Bf_0(1-k^2), \text{ za neparno } k \\ &\frac{Bf_0}{2}\left[2\left(\frac{k}{2}\right)^3 - k^3\right] = -\frac{3}{8}Bf_0k^3, \text{ za parno } k. \end{aligned} \ . \qquad 6.6$$

U mPFD algoritmu vrednost parametra Δf_p koristi se za definisanje uskog frekvencijskog opsega oko predviđene pozicije fantomskog parcijala, unutar kog se spektralna komponenta može proglasiti za fantomski parcijal. Pomenuti opseg mora biti dovoljno uzak kako bi se izbegla slučajna eliminacija inharmoničnog parcijala, naročito u slučajevima kada su frekvencije fantomskog i inharmoničnog parcijala jako bliske. Da ne bi došlo do toga, parametar Δf_p mora biti manje vrednosti od očekivane razlike frekvencija između fantomskog i inharmoničnog parcijala (označene sa Δf_{fantom}) za sve analizirane tonove instrumenta. Najkritičniji slučaj nastaje kada koeficijent inharmoničnosti B ima malu vrednost, jer usled toga frekvencijski razmak između fantomskog parcijala i inharmoničnog parcijala je najmanji. Te tako da bi se dobila vrednost parametra Δf_p za klavir, čembalo i harfu, neophodno je u izraz 6.6 uvrstiti najmanju vrednost koeficijenta inharmoničnosti B za posmatrani instrument. Najmanje vrednosti koeficijenta B u slučaju klavira, čembala i harfe su:

$B_{klavir,min}$= $5.5\cdot10^{-5}$, $B_{čembalo,min}$= $8\cdot10^{-6}$ i $B_{harfa,min}$= $3\cdot10^{-5}$.

Uvrštavanjem minimalnih vrednosti B u izraz 6.6 dobijaju se Δf_{fantom} koji odgovara najmanjem mogućem razmaku između fantomskog parcijala i inharmoničnog parcijala (u slučaju parnih i u slučaju neparnih):

$$\Delta f_p = \left|\Delta f_{fantom}\right| \approx \begin{array}{l} 2.0625\cdot 10^{-5} f_0 k^3, \text{ za klavir} \\ 3\cdot 10^{-6} f_0 k^3, \text{ za čembalo} \\ 1.125\cdot 10^{-5} f_0 k^3, \text{ za harfu} \end{array} . \qquad 6.7$$

Na osnovu 6.7 vrednost Δf_p korišćena u mPFD algoritmu je izabrana tako da bude uvek manja od najmanje uočene vrednosti Δf_{fantom}, čime se obezbeđuje da svi inharmonični parcijali budu sačuvani prilikom procesa eliminacije fantomskih parcijala. Usvajanjem najmanje vrednosti B iz skupa podataka, algoritam ostaje primenljiv na sve analizirane tonove bez obzira na registar. Preciznija kalibracija Δf_p mogla bi se postići računanjem teorijske vrednosti koeficijenta inharmoničnosti B za svaku žicu pomenutih instrumenata i primenom odgovarajuće vrednosti prilikom analize konkretnog tona. Takav pristup zahteva sveobuhvatno predznanje o fizičkim karakteristikama instrumenta i time ograničava jednu od glavnih karakteristika ove metode, a to je automatizovana procena B na osnovu snimljenog tona instrumenta. Takođe, ovako definisan fiksni prag Δf_p omogućava primenu metode i na druge instrumente, pod uslovom da se vrednost Δf_p skalira u skladu sa minimalnom vrednošću koeficijenta inharmoničnosti B proučavanog instrumenta.

6.3.4. Verifikacija mPFD algoritma na skupu sintetisanih tonova

U ovom potpoglavlju sprovodi se verifikacija mPFD algoritma na kontrolisanom skupu sintetisanih tonova harfe. Na tim signalima biće izvršeno poređenje PFD i mPFD algoritma kako bi se ustanovila tačnost procene koeficijenta inharmoničnosti B.

6.3.4.1 Sinteza test signala

Radi procene tačnosti i robusnosti predložene modifikacije algoritma pri estimaciji koeficijenta inharmoničnosti generisan je skup sintetisanih tonova harfe primenom aditivne sinteze. Tonovi harfe su izabrani da predstavljaju test set signala zato što se odlikuju izraženim prisustvom fantomskih parcijala, kao i najvećim diskrepancama u trendu krive koeficijenta inharmoničnosti u frekvencijskom opsegu. Glavni cilj sinteze jeste da se dobiju signali koji verno reprodukuju karakteristike realnih tonova uz istovremenu mogućnost kontrole ključnih parametara kao što su koeficijent inharmoničnosti B, broj parcijala N, broj fantomskih parcijala N_p i njihova pozicija u spektru. Time je omogućeno sistematsko ispitivanje ponašanja algoritma u kontrolisanim uslovima. Model aditivne sinteze je definisan sledećom jednačinom:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N} a_k(t)\cos(2\pi f_k t) + \sum_{p=1}^{N_p} b_p(t)\cos(2\pi f_p t) + n(t), \qquad 6.8$$

gde a_k(t) i b_p(t) označavaju vremenske obvojnice inharmoničnih, odnosno fantomskih parcijala, f_k je frekvencija parcijala izračunata za zadati koeficijent inharmoničnosti B (jednačina 6.1), f_p je frekvencija fantomskog parcijala, a $n(t)$ aditivni Gausov šum filtriran niskopropusnim filtrom. Frekvencije fantomskih parcijala f_p određuju se u zavisnosti da li je indeks parcijala k paran ili ne. Ovaj postupak detaljno je opisan u poglavlju 2.2 o fantomskim parcijalima i dosledno je primenjen u sintezi test signala. Procedura sintetisanja test signala sprovedena je uz pomoć aplikacije MuPI [70].

Kako bi se očuvale spektralne karakteristike realnih tonova harfe u sintetisanim signalima, svakom parcijalu u modelu (izraz 6.8) dodeljena je vremenska obvojnica. Postupak određivanja vremenskih obvojnica inharmoničnih parcijala $a_k(t)$ i fantomskih parcijala $b_p(t)$ zasnovan je na proceni obvojnica iz realno snimljenih tonova harfe. Realan ton harfe dekomponovan je u kanale primenom dvostruko-komplementarne filtarske banke dizajnirane u okviru aplikacije MuPI. Centralne frekvencije filtara banke odgovaraju frekvencijama inharmoničnih parcijala f_k, tako da se obezbedi da svakom kanalu odgovara jedan parcijal analiziranog tona. U svakom od k kanala filtarske banke dobija se

odgovarajući signal $x_k(t)$. Pošto se izdvojeni signal $x_k(t)$ može smatrati uskopojasnim, obvojnica takvog signala $a_{ch}(t)$ može se proceniti uz pomoć Hilbertove transformacije. Međutim, jedan kanal filtarske banke može istovremeno sadržati i inharmonični i fantomski parcijal, pa dobijena obvojnica $a_{ch}(t)$ ne predstavlja jedinstvenu vremensku obvojnicu inharmoničnog parcijala. Time je kompromitovano generisanje jasno definisanog skupa sintetizovanih signala potrebnih za sistematsko testiranje algoritma u kontrolisanim uslovima. Kako bi se iz vremenske obvojnice $a_{ch}(t)$ eliminisalo prisustvo fantomskog parcijala i izdvojila obvojnica koja verodostojno predstavlja inharmonični parcijala $a_k(t)$, neophodno je uraditi aproksimaciju anvelope $a_{ch}(t)$. Aproksimacija je urađena pomoću MATLAB fit funkcije u okviru aplikacije MuPI, odnosno modula MuPI_A. Aproksimacijom obvojnice $a_{ch}(t)$ potisnut je uticaj fantomskog parcijala. Novonastala obvojnica može biti obvojnica inharmoničnog parcijala $a_k(t)$, a doprinos fantomskog parcijala se u tom slučaju može kontrolisano uključiti kao drugi sabirak u izrazu 6.8. Obvojnica fantomskog parcijala $b_p(t)$ dobijena je skaliranjem obvojnice najbližeg inharmoničnog parcijala $a_k(t)$ faktorom 1.4. Faktor je izabran tako amplituda fantomskog parcijala bude veća od amplitude odgovarajućeg inharmoničnog parcijala. Na opisani način izvršena je sinteza signala, a u Tabeli 6.2 prikazane su vrednosti svih korišćenih parametara pri formiranju skupa test signala. Vrednosti izabrane za B, N i N_p nalaze se u realnim okvirima za tonove harfe [98], [99]. Usvojene vrednosti za osnovnu frekvenciju f_0 odgovaraju tonovima As1 i As4.

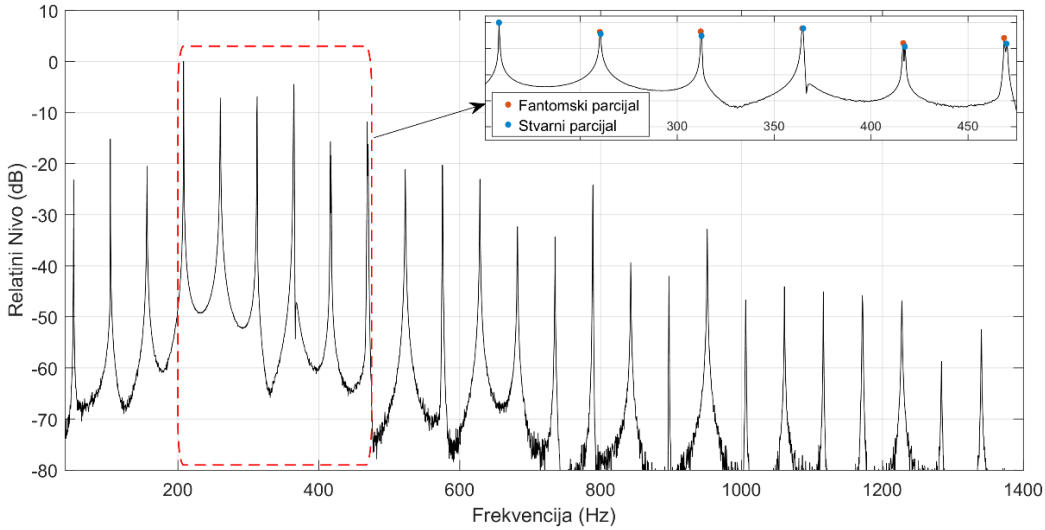
Tabela 6.2 Parametri sintetisanih signala (f_0 -osnovna frekvencija sintetizovanog tona, N-broj parcijala, N_p -broj fantomskih parcijala, pozicija-indikator lokacije fantomskih parcijala)

	f_0 (Hz)	N	B	N_p	Pozicija
Set 1 (As1)	52.02	25	$5\cdot10^{-5}$, 10^{-4}, $2\cdot10^{-4}$, $5\cdot10^{-4}$	0, 4, 6	na početku, u sredini, na kraju
Set 2 (As4)	416.21	15			

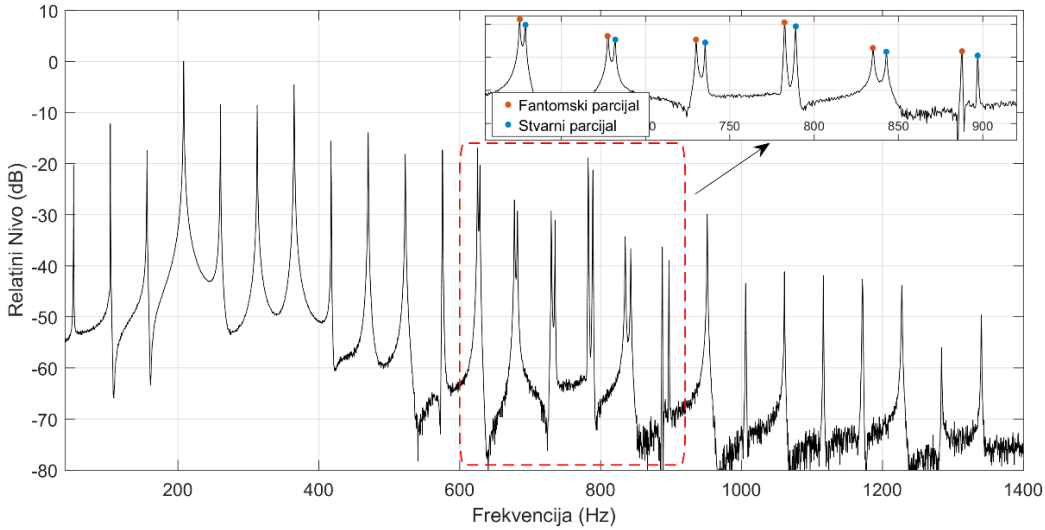
Parametar „pozicija“ definiše tri različite konfiguracije: „na početku“, „u sredini“ i „na kraju“. U varijanti „na početku“ fantomski parcijali su pozicioniraju uzastopno počevši od 4. parcijala. U varijanti „na kraju“ fantomski parcijali se nalaze na krajnjim pozicijama u spektru, npr. ukoliko je ukupan broj parcijala N jednak 25 i u spektru je prisutno 4 fantomska parcijala, oni su pozicionirani od 21. do 25. parcijala. U varijanti „u sredini“ fantomski parcijali su centrirani u spektru. Odnosno ukoliko signal sadrži ukupno 25 parcijala, grupisanje fantomskih parcijala počinje od 12. parcijala. Dok u slučaju kada signal sadrži ukupno 15 parcijala, grupisanje fantomskih parcijala počinje od 8. parcijala. Radi ilustracije značenja parametra „pozicija“ na slici 6.7 dati su primeri spektra tona As1 sintetisanog sa 6 fantomskih parcijala (sve tri konfiguracije položaja) i koeficijentom inharmoničnosti B=10^{-4}. Na slici 6.7 položaji sintetisanih fantomskih parcijala označeni su crvenim isprekidanim linijama, dok se u gornjem desnom uglu nalazi uvećani prikaz radi jasnije vizualizacije fantomskih (crveni kružići) i inharmoničnih (plavi kružići) parcijala. U konfiguraciji „na početku” fantomski parcijali zauzimaju pozicije od 4. do 9. parcijala (slika 6.7a)), u konfiguraciji „u sredini” fantomski parcijali se nalaze na pozicijama od 12. do 17. (slika 6.7b)), a u konfiguraciji „na kraju” na pozicijama od 20. do 25. (slika 6.7c)). Zbog niske osnovne frekvencije (f_0 =52.02 Hz) i izabrane vrednosti koeficijenta inharmoničnosti, fantomski parcijali u varijanti „na početku” (naročito oni na 4. i 5. poziciji) vrlo su bliski po frekvenciji svojim susednim inharmoničnim parcijalima. Razmak se povećava za parcijale višeg reda, što je uočljivo u varijantama „u sredini” i „na kraju”.

Test signali su organizovani u dva seta (po 28 signala). U prvom setu, osnovna frekvencija tona f_0 je fiksirana i iznosi 52.02 Hz, kao i broj parcijala N koji iznosi 25. U drugom setu, f_0 je postavljeno na vrednost 416.21 Hz, a broj parcijala N iznosi 15. Preostali parametri iz Tabele 6.2 sistemski se variraju nad oba seta. Oba seta su podeljena u 4 podgrupe, koje odgovaraju četiri vrednosti koeficijenta inharmoničnosti B. U okviru svake podgrupe, definiše se broj fantomskih parcijala N_p kao: 0 (bez fantomskih parcijala), 4 i 6. Dodatno, fantomski parcijali kada ih ima 4 ili 6 mogu biti raspoređeni na tri načina u okviru spektra tona. Na taj način svaka podgrupa sadrži sedam signala: jedan bez fantomskih parcijala i šest generisanih variranjem broja fantomskih parcijala N_p i njihove

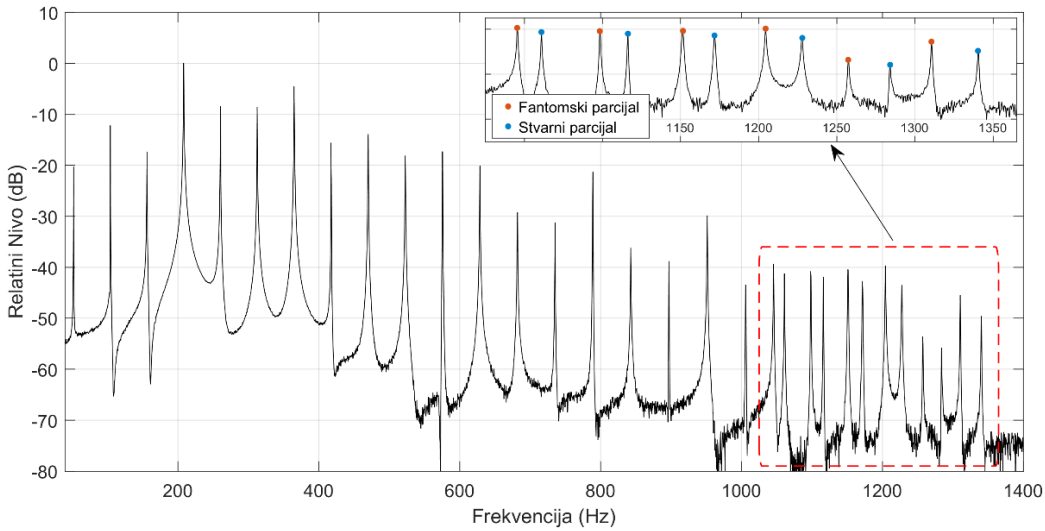
pozicije. Na primer, u prvoj podgrupi prvog seta (ton As1), jedna moguća kombinacija parametara za sintezu je: B=5·10^{-5}, N_p=4, pozicija=“na početku“.



a)



b)



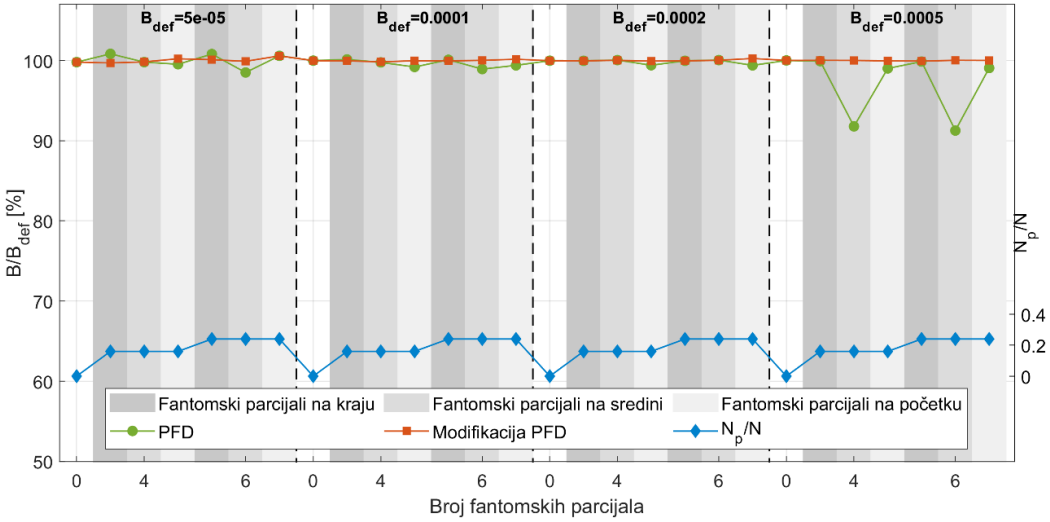
c)

Slika 6.7 Spektri sintetizovanog tona As1 sa 6 fantomskih parcijala u situacijama kada su oni pozicionirani: a) na početku, b) u sredini i c) na kraju.

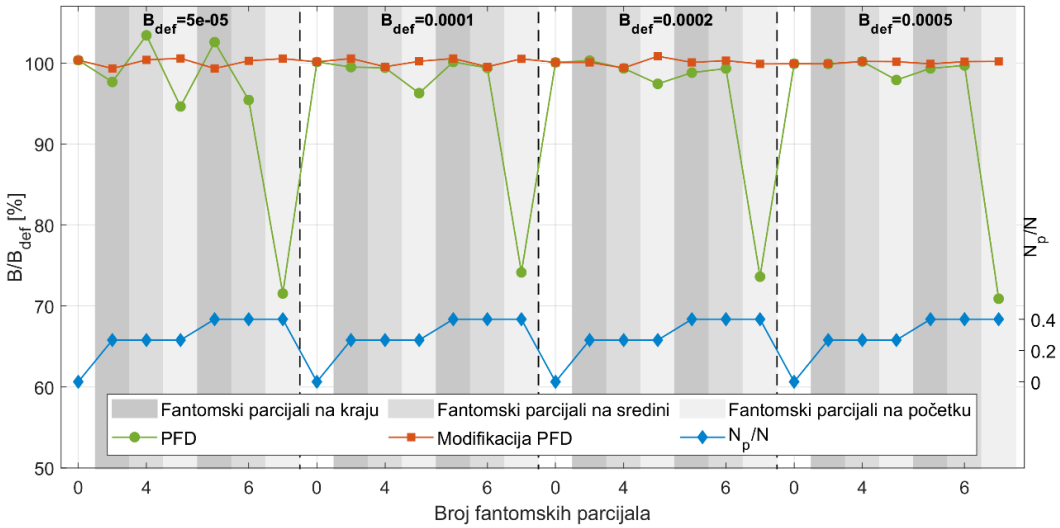
6.3.4.2 Uporedna analiza PFD i mPFD na sintetisanim signalima

Da bi se verifikovala predložena modifikacije izvršena je uporedna analiza PFD i mPFD algoritma na kontrolisanom skupu sintetisanih tonova harfe. Procene koeficijenta inharmoničnosti *B* porede se kroz različite scenarije (vrednosti *B*, broj i položaj fantomskih parcijala, ukupni broj parcijala *N*), uz evaluaciju tačnosti i robusnosti na prisustvo fantomskih komponenti.

Na slici 6.8 a) i b) prikazane su relativne greške procene *B* za sve varijante sintetisanih tonova As1 i As4. Slike podeljene su u 4 podgrupe određene referentnim vrednostima koeficijenta inharmoničnosti B_{def} koje su korišćene u sintezi (Tabela 6.2). Unutar svake podgrupe relativna greška koeficijenata inharmoničnosti *B* izračunata je za sedam sintetizovanih tonova sa različitim brojem i položajem fantomskih parcijala. Relativna greška definisana je kao odnos između procenjene vrednosti *B* (dobijene na osnovu PFD ili mPFD) i sintezom zadate vrednosti B_{def}. Na slici zelena kriva predstavlja grešku pri proceni koeficijenta inharmoničnosti PFD algoritmom, narandžasta kriva predstavlja grešku pri proceni koeficijenta inharmoničnosti mPFD algoritmom, a plava kriva prikazuje odnos broja fantomskih parcijala i ukupnog broja parcijala u signalu. Sivim zasenčenim trakama obeležena je pozicija fantomskih parcijala u spektru. Svetlo siva traka označava da se fantomi nalaze na početku, srednje siva da se fantomi nalaze u sredini spektra i tamno siva da se fantomi nalaze na kraju spektra. Belom trakom obeleženi su signali kod kojih nisu prisutni fantomski parcijali.



a)



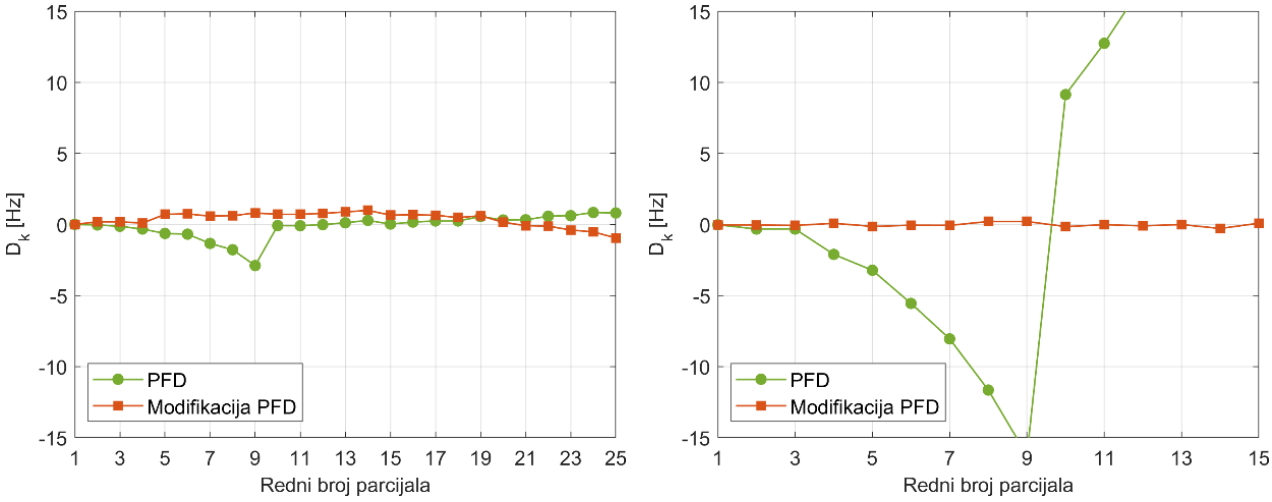
b)

Slika 6.8 Relativne greške procene koeficijenta *B* za sve varijante: a) sintetizovanih tonova As1 (Set 1) i b) sintetizovanih tonova As4 (Set 2)

Radi globalne ocene performansi PFD i mPFD algoritama preko celog skupa sintetisanih signala, izračunata je srednja relativna greška za oba seta test-signala (ukupno 56 signala). Dobijene vrednosti iznose 6.11% za PFD i 0.45% za mPFD. Za sintetisane signale tona As1 (slika 6.8 a)), najveća relativna greška procene B pomoću PFD algoritma iznosi 7%. Do nje dolazi kada je B=5·10^{-4} i kada je 4 ili 6 fantomskih parcijala smešteno u sredini spektra signala. Za ostale vrednosti B, PFD algoritam postiže minimalnu grešku od otprilike 2% kada se fantomski parcijali nalaze na početku ili na sredini spektra signala. U slučaju kada se fantomski parcijali nalaze na kraju spektra ili nisu prisutni uopšte, vrednosti B dobijene pomoću PFD i mPFD algoritma su iste. Za razliku od PFD, mPFD u svim ispitivanim uslovima, za sve vrednosti B i sve kombinacije broja i položaja fantomskih parcijala, ne greši pri proceni koeficijenta inharmoničnosti.

Za sintetisane signale tona As4 (slika 6.8 b)) najveća relativna greška procene B pomoću PFD algoritma dostiže 30%. Do greške dolazi u slučaju kada se u spektru signala nalazi 6 fantomskih parcijala lociranih na početku, bez obzira na vrednost B koja je korišćena pri sintezi. U slučaju kada se u spektru sintetisanih signala nalazi 4 fantomska parcijala na početku, pri vrednostima B od 5·10^{-5} i 10^{-4}, relativna greška procene B pomoću PFD algoritma iznosi oko 5%. Za istu poziciju i broj fantomskih parcijala, ali pri vrednostima B od 2·10^{-4} i 5·10^{-4}, relativna greška procene B pomoću PFD je manja, i iznosi oko 3%. Nasuprot tome, mPFD algoritam u svim varijantama sintetizovanih tonova As4 ostvaruje maksimalnu relativnu grešku od 0.5%.

Kako bi se utvrdio uzrok velike relativne greške od 30% u proceni B PFD algoritmom (uočen u slučaju sintetisanog tona As4 sa parametrima B=2·10^{-4} i 6 fantomskih parcijala na početku spektra) sprovedena je uporedna analiza. Analiza je bazirana na poređenju krivih odstupanja frekvencija parcijala D_k (definisana u poglavlju 6.1) dobijenih u završnoj iteraciji PFD i mPFD algoritma, za tonove As1 i As4 sintetizovane sa istom vrednošću B i istim brojem i pozicijom fantomskih parcijala. Na slici 6.9 a) prikazane su krive devijacije frekvencije parcijala D_k za slučaj kada je ton As1 sintetizovan sa parametrima: B=2·10^{-4}, N=25, N_p=6 i pozicija="na početku". Dok su na slici 6.9 b) prikazane krive devijacije parcijala D_k za slučaj kada je ton As4 sintetizovan sa parametrima: B=2·10^{-4}, N=15, N_p=6 i pozicija="na početku". Jedina razlika u parametrima sinteze između ova dva tona jeste u broju parcijala sa kojim su generisani, As1 sa 25, dok je As4 generisan sa 15 parcijala. Zelenom bojom prikazana je kriva D_k iz poslednje iteracije PFD algoritma, a narandžastom kriva D_k iz poslednje iteracije mPFD algoritma.



a) b)

Slika 6.9 Kriva devijacije frekvencije parcijala D_k u poslednjoj iteraciji u slučaju kada je: a) ton As1 sintetizovan parametrima B=2·10^{-4}, N=25, N_p=6 i pozicija="na početku" i b) ton As4 sintetizovan parametrima B=2·10^{-4}, N=15, N_p=6 i pozicija="na početku"

Posmatrajući krivu D_k koja odgovara PFD algoritmu (slika 6.9 a)), vidi se da je došlo do pogrešne procene frekvencija za parcijale od 4. do 9, gde su umesto frekvencija inharmoničnih parcijala

procenjuje frekvencije fantomskih. Ipak, kako ton As1 sadrži ukupno 25 parcijala koji ulaze u procenu B, PFD se može osloniti na preostalih 16 parcijala i postupno „ispeglati“ odstupanje D_k sa oko −4 Hz (9. parcijal) na oko 0,5 Hz (25. parcijal). Budući da je u opsegu 9–25 kriva D_k relativno blizu nule, relativna greška procene B (Slika 6.8 a)) iznosi približno 2%. Nasuprot tome, kod mPFD algoritma kriva D_k ostaje vrlo blizu nule za svih 25 parcijala, što potvrđuje odsustvo greške u proceni B (Slika 6.8 a)). U slučaju tona As4 situacija je drugačija. Na osnovu D_k krive dobijene PFD algoritmom (slika 6.9 b)) uočava se da algoritam ponovo pogrešno identifikuje frekvencije od 4. do 9. parcijala, ali je greška ovog puta znatno veća, preko -15 Hz. Pošto je As4 sintetisan sa svega 15 parcijala, PFD-u za procenu ostaje samo 6 pouzdanih parcijala, te B ne može biti tačno procenjen. Zbog toga kriva D_k koja odgovara PFD algoritmu divergira, odnosno odstupanje 15. parcijala prelazi 15 Hz, što se direktno odražava na relativnu grešku procene B koja dostiže 30% (slika 6.8 b)).

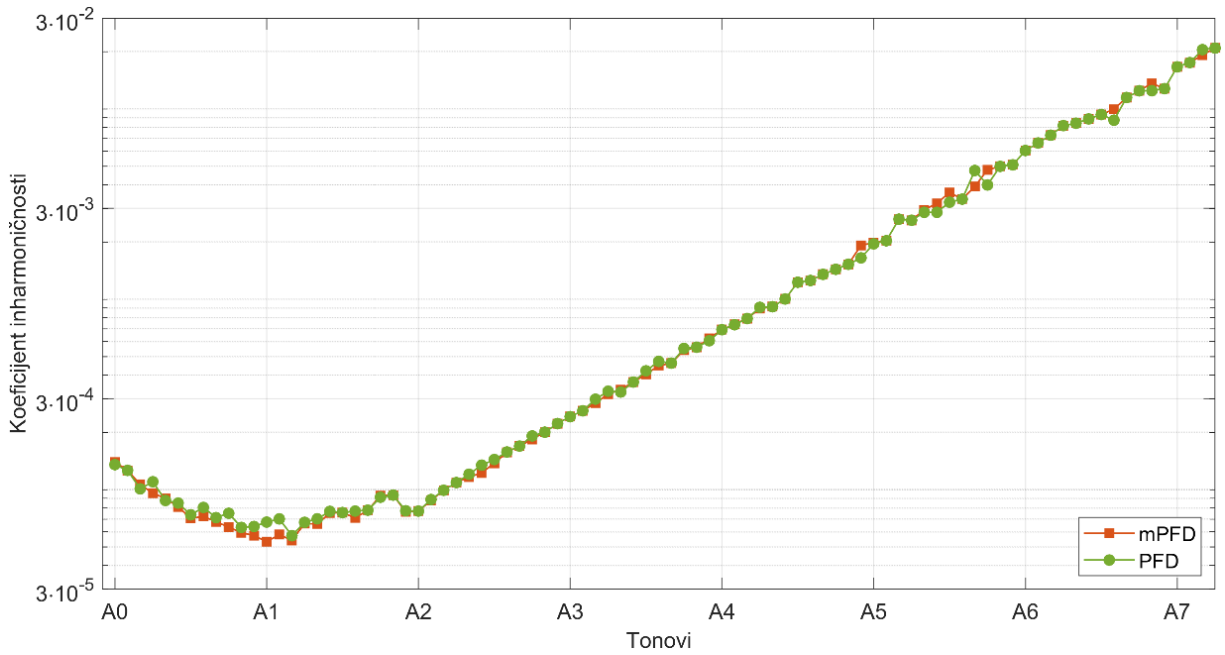
Analiza sprovedena na kontrolisanom skupu sintetisanih tonova pokazala je da fantomski parcijali sistematski uvode pristrasnost u procenu koeficijenta inharmoničnosti, dok se tačnost značajno poboljšava kada se oni uklone pre iterativnog dela PFD algoritma. Izrazite razlike između procenjenih vrednosti B sa i bez fantomskih parcijala potvrđuju presudan značaj ispravnog izbora spektralnih komponenti. Uz to, pokazano je da se greška procene B menja u zavisnosti od odnosa zahtevnog broja parcijala za procenu, položaja i grupisanja fantomskih parcijala u spektru. Ovi rezultati predstavljaju verifikaciju predložene modifikacije PFD algoritma i uporište za njegovu primenu na realnim snimcima, kao i uporednu analizu sa PFD algoritmom u narednom poglavlju.

6.4 Uporedna analiza PFD i mPFD algoritama na realnim snimcima

U ovom poglavlju sledi uporedna analiza PFD i mPFD algoritma na realnim snimcima klavira, čembala i harfe. Cilj je da se, nakon verifikacije na sintetizovanim tonovima, proceni kako se oba algoritma ponašaju na realnim snimcima: tačnost procene B, stabilnost po registrima i robusnost na prisustvo fantomskih parcijala.

6.4.1. Klavir

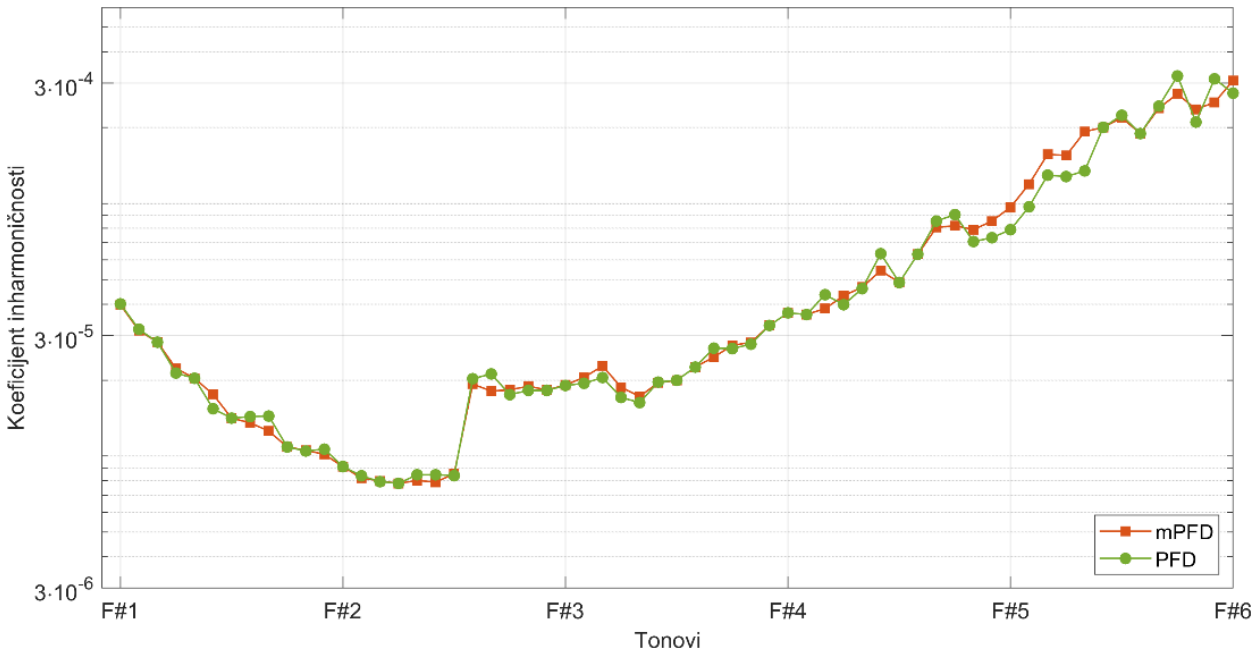
Na slici 6.10 prikazan je koeficijent inharmoničnosti B tonova klavira iz opsega A0 do C8 procenjen na osnovu PFD i mPFD algoritma. Kao i u poglavlju 6.2.1, rezultati su dati za formiranu hromatsku lestvicu. Zelena kriva predstavlja rezultate dobijene na osnovu PFD algoritma, dok narandžasta kriva predstavlja koeficijente B dobijene na osnovu mPFD. Na slici su prikazani koeficijenti inharmoničnosti za 88 tonova. Vrednosti koeficijenta B za dva algoritma razlikuju se za 27 tonova, odnosno u 30.7% slučajeva. Međutim, iako se koeficijenti inharmoničnosti razlikuju u trećini posmatranih tonova klavira, trend krive inharmoničnosti je očuvan u oba pristupa. Kako je PFD algoritam izvorno osmišljen za tonove klavira, činjenica da predložena modifikacija ne utiče na monotoni trend krive koeficijenta inharmoničnosti potvrđuje da se performanse metode, u domenu klavira, uvođenjem modifikacije ne degradiraju. Razlika u procenjenim vrednostima koeficijenta inharmoničnosti može se kvantifikovati kao relativno procentualno odstupanje, koje za analizirane tonove klavira varira u opsegu od 2% do 26.8%. Najveća procentualna odstupanja zabeležena su za tonove: C1(14.95%), E1(11.46%), Fis1(18.22%), Gis1(11.59%), A1(26.85%) i Ais1(20.8%). Do najvećih procentualnih odstupanja dolazi u prvoj oktavi za tonove od H0 do H1. Iako bi odstupanja mogla da se pripišu prominentnosti fantomskih parcijala, u ovom slučaju taj efekat nije presudan. Na nižim frekvencijama postoji dovoljan broj parcijala za procenu koeficijenta inharmoničnosti, te algoritam iterativnim postupkom smanjujući devijaciju krive D_k može da eliminiše uticaj nekoliko pogrešno procenjenih frekvencija parcijala. Uzrok odstupanja leži u proceni osnovne frekvencije f_0. Za prvu oktavu klavira karakteristično je da spektralna komponenta koja odgovara f_0 često nema dovoljno izraženu amplitudu u odnosu na sopstveni šum, što otežava pouzdano određivanje osnovne frekvencije tona. Posledično i procena koeficijenta inharmoničnosti, koja direktno zavisi od f_0, može da odstupi. Nasuprot tome, za ostale tonove od C2 do C8, praktično da ne postoji odstupanja između procenjenih vrednosti B na osnovu PFD i mPFD algoritma.



Slika 6.10 Koeficijent inharmoničnosti *B* klavira u opsegu od A0 do C8 procenjen na osnovu PFD i mPFD algoritma

6.4.2. Čembalo

Na slici 6.11. prikazan je koeficijent inharmoničnosti *B* čembala u opsegu od Fis1 do Fis6 procenjen PFD i mPFD algoritmom. Kao i u poglavlju 6.2.2, rezultati su dati za formiranu hromatsku lestvicu. Zelena kriva predstavlja rezultate dobijene na osnovu PFD algoritma, dok narandžasta kriva predstavlja koeficijente *B* dobijene na osnovu mPFD. Na slici su prikazani koeficijenti inharmoničnosti za 61 ton. Vrednosti koeficijenta *B* za dva algoritma razlikuju se za 31 ton, odnosno u 50.8% slučajeva. Iako u polovini slučajeva postoji razlika između procenjenih vrednosti *B*, monotoni trend krive inharmoničnosti u oba pristupa je očuvan. Razlika u procenjenim vrednostima koeficijenta inharmoničnosti može se kvantifikovati kao relativno procentualno odstupanje, koje za analizirane tonove čembala varira u opsegu od 2.3% do 30%.

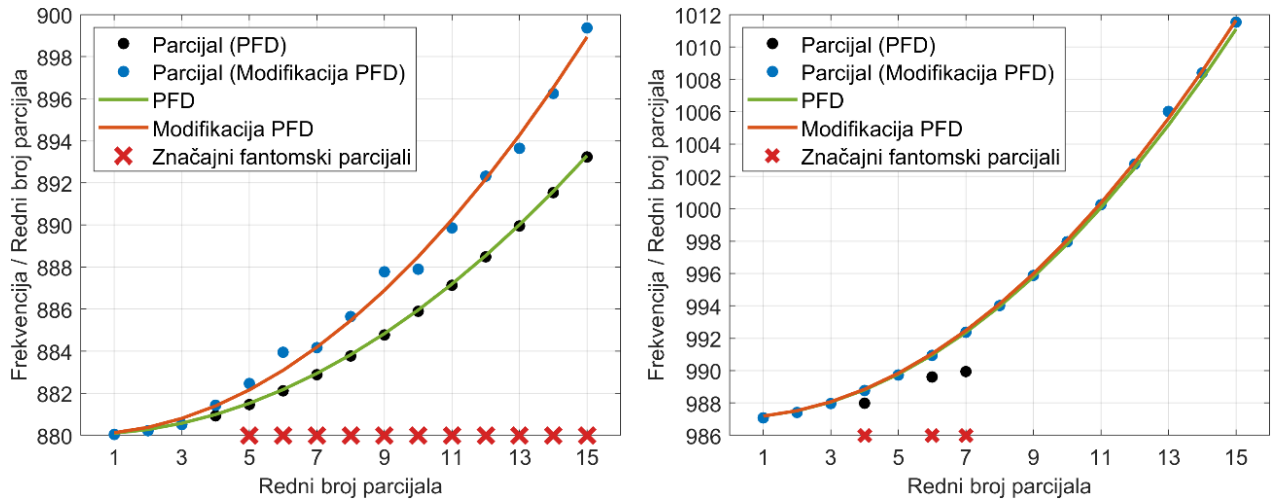


Slika 6.11 Koeficijent inharmoničnosti *B* čembala u opsegu od Fis1 do Fis6 procenjen na osnovu PFD i mPFD algoritma

Najmanja procentualna odstupanja zabeležena su za tonove najnižih frekvencija iz opsega od Fis1 do Cis3. Razlog što PFD u tom opsegu daje dobre procene uprkos prisustvu fantomskih parcijala leži u konstrukcijskim osobinama čembala, zbog kojih spektar tona sadrži veliki broj parcijala. U navedenim slučajevima procena B se vrši nad čak 100 parcijala. Broj od 100 parcijala koji ulaze u procenu B, dovoljno je velik da i u slučaju povremenih pogrešnih selekcija (kada PFD izabere fantomski parcijal umesto inharmoničnog) ostane dovoljan broj ispravno procenjenih komponenti. Kako je reč o iterativnom postupku, kriva odstupanja frekvencija D_k se pri svakoj iteraciji koriguje težeći da bude što ravnija (idealno 0 Hz), čime se procena B približava stabilnoj vrednosti. Zbog toga manji udeo pogrešno identifikovanih parcijala u odnosu na veliki broj pravilno procenjenih ne utiče značajno na tačnost konačne procene koeficijenta inharmoničnosti.

Nasuprot tome, u višem registru u opsegu od Fis5 do Fis6 procentualna odstupanja su znatno veća. U pomenutom opsegu mali broj parcijala je raspoloživ za procenu inharmoničnosti, te se udeo fantomskih parcijala u odnosu na ukupan broj parcijala za procenu B povećava. Kako se vrednost tog odnosa N_p/N povećava, tako opada broj pouzdanih spektralnih komponenti na kojima PFD može da zasnuje procenu, te ona postaje nestabilna. U takvim uslovima postaje presudan doprinos mPFD algoritma, koji identifikuje i eliminiše fantomske parcijale pre iterativne procene. Najveća odstupanja zabeležena su za tonove: H1(12.26%), D2(14.63%), D3(16.87%), Gis4(13.46%), H4(16.67%), Fis5(18.5%), Gis5(17.4%), Ais5(30.08%), Dis6(17.85%) i F6(24.07%).

Radi ispitivanja uticaja fantomskih parcijala na procenu koeficijenta inharmoničnosti kod realnih tonova čembala, analizirana su dva reprezentativna tona iz istog frekvencijskog opsega (zarad verodostojnije komparacije), Ais5 i C6. Izbor obuhvata dva scenarija, jedan u kome prisustvo fantomskih parcijala dovodi do odstupanja vrednosti koeficijenta B od oko 30%, i drugi u kome njihov uticaj ne utiče bitnije na procenu koeficijenta B (odstupanje od 2.3%). Na slici 6.12 a) i b) prikazana je zavisnost frekvencije parcijala tona (f_k) podeljena sa rednim brojem parcijala k od rednog broja parcijala k za tonove Ais5 i C6. Crnim tačkicama na slici označene su frekvencije parcijala procenjene PFD algoritmom, dok plave tačkice odgovaraju frekvencijama parcijala procenjenim mPFD algoritmom. Zelena kriva se zasniva na jednačini 6.1 i dobijena je sa vrednošću B procenjenom na osnovu PFD algoritma, dok je narandžasta kriva bazirana na istoj jednačini, ali u tom slučaju figuriše vrednost B procenjena na osnovu mPFD algoritma. Crvenom „X“ oznakom naznačeni su izraženi (značajni) fantomski parcijali. Pojam izraženog fantomskog parcijala u ovom kontekstu predstavlja fantomski parcijal koji je veće amplitude od inharmoničnog transverzalnog parcijala.



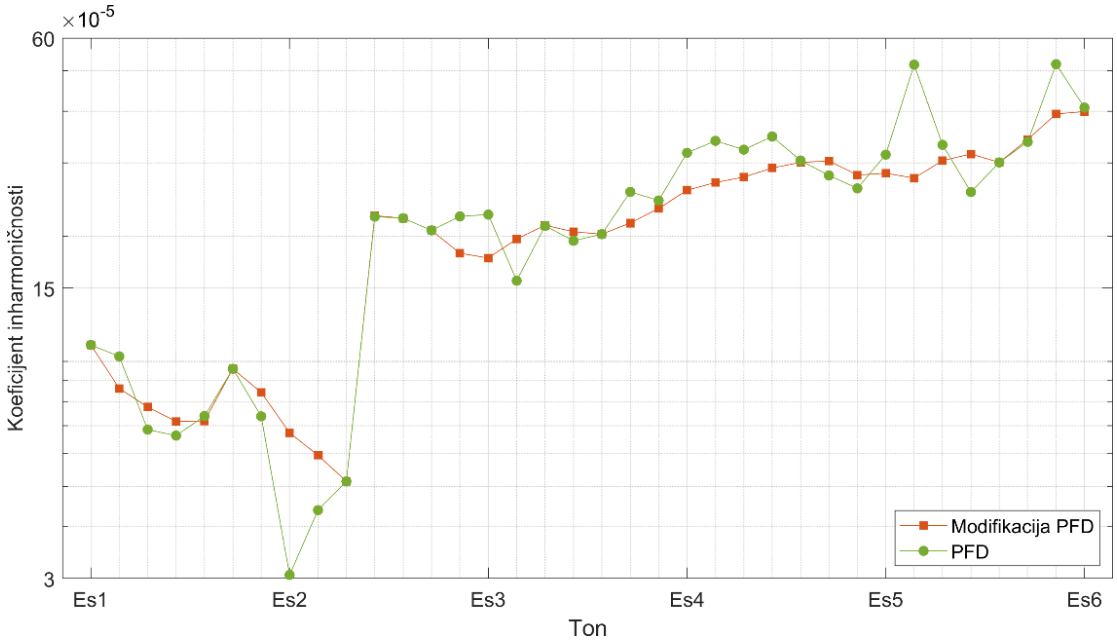
Slika 6.12 Zavisnost f_k/k od rednog broja parcijala k za ton: a) Ais5 i b) C6

Na slici 6.12. a) izraženi fantomski parcijali se mogu uočiti na pozicijama od 5. do 15. parcijala. U ovom slučaju, u spektru tona Ais5 postoji 11 fantomskih parcijala izraženijih u odnosu na

inharmonični parcijal, što predstavlja 73.33% u odnosu na ukupan broj parcijala koji ulaze u procenu algoritama. Te tako frekvencije prva četiri parcijala koje je PFD algoritam dobro procenio nisu bile dovoljne da procena vrednosti B bude tačna. U ovom scenariju vrednost B koju je procenio PFD algoritam i na osnovu koje je iscrtana zelena kriva je $1.35 \cdot 10^{-4}$, dok vrednost B procenjena na osnovu mPFD algoritma (koja određuje narandžastu krivu) iznosi $1.93 \cdot 10^{-4}$. Nasuprot tome, na Slici 6.12. (b) za ton C6 uočavaju se samo tri izražena fantomska parcijala, na pozicijama 4., 6. i 7. U ovom slučaju fantomske komponente čine oko 20% od ukupnog broja parcijala koji ulaze u procenu koeficijenta inharmoničnosti. Dodatno, pošto iza 7. fantomskog parcijala sledi još osam parcijala čije je frekvencije PFD uspešno procenio, odstupanje PFD-a u odnosu na mPFD ostaje malo i iznosi svega 2.3%, što se vidi i po poklapanju zelene i narandžaste krive. To dodatno potvrđuje činjenica da su procene frekvencija za parcijale od 8. do 15. identične za oba algoritma, što je vidljivo po preklapanju crnih i plavih tačkica na slici 6.12. b). U ovom primeru, procenjena vrednost koeficijenta je $B_{PFD}=2.24 \cdot 10^{-4}$, dok je $B_{mPFD}=2.19 \cdot 10^{-4}$.

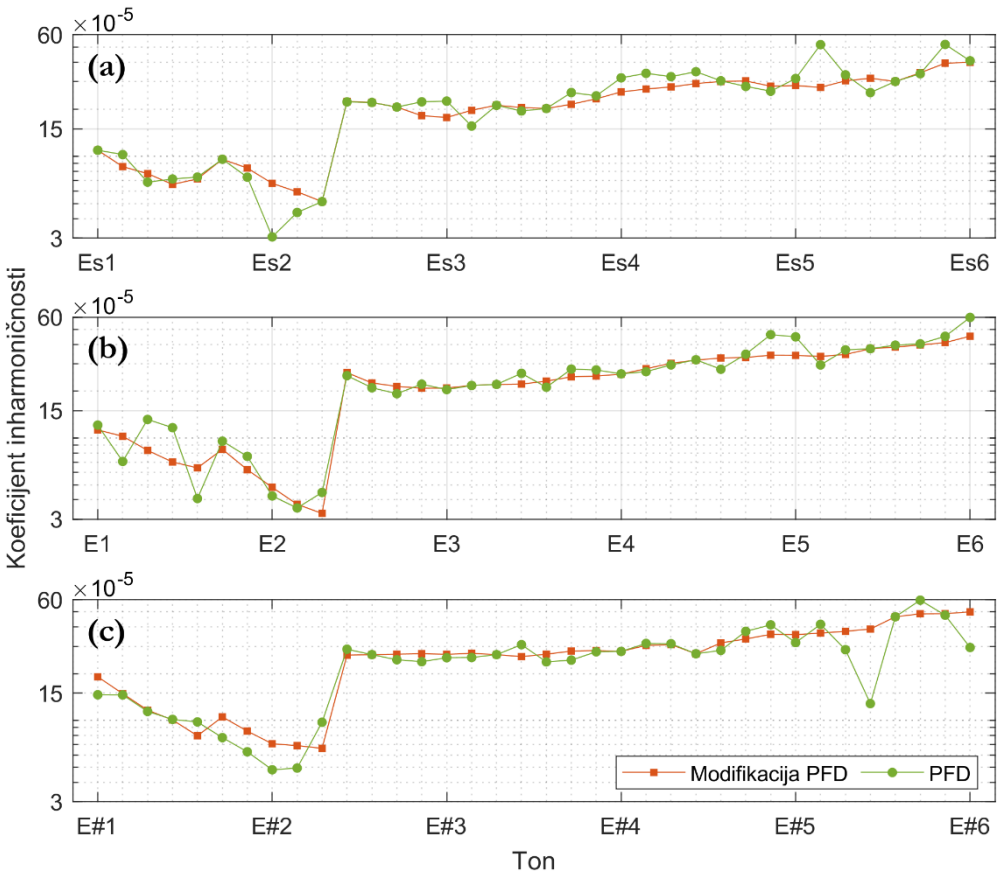
6.4.3. Harfa

Na slici 6.13. prikazan je koeficijent inharmoničnosti B harfe u opsegu od Es1 do Es6 procenjen PFD i mPFD algoritmom. Kao i u poglavlju 6.2.3, rezultati su predstavljeni za formiranu hromatsku lestvicu, kombinovanjem tonova odsviranim na prvoj i drugoj pedali. Zelena kriva predstavlja rezultate dobijene na osnovu PFD algoritma, dok narandžasta kriva predstavlja koeficijente B dobijene na osnovu mPFD. Posmatrajući trend krive, uočava se da mPFD daje ujednačeniji, monotono rastući profil, dok PFD pokazuje odstupanja od tog obrasca. Na slici 6.13 su prikazani koeficijenti inharmoničnosti za 62 tona. Vrednosti koeficijenta B se za dva algoritma razlikuju za 49 tonova, odnosno u preko 80% slučajeva. Imajući u vidu da harfa nije hromatski, već dijatonski instrument, razlike između PFD i mPFD biće dalje razmatrane za svaku od 3 pedale ponaosob.



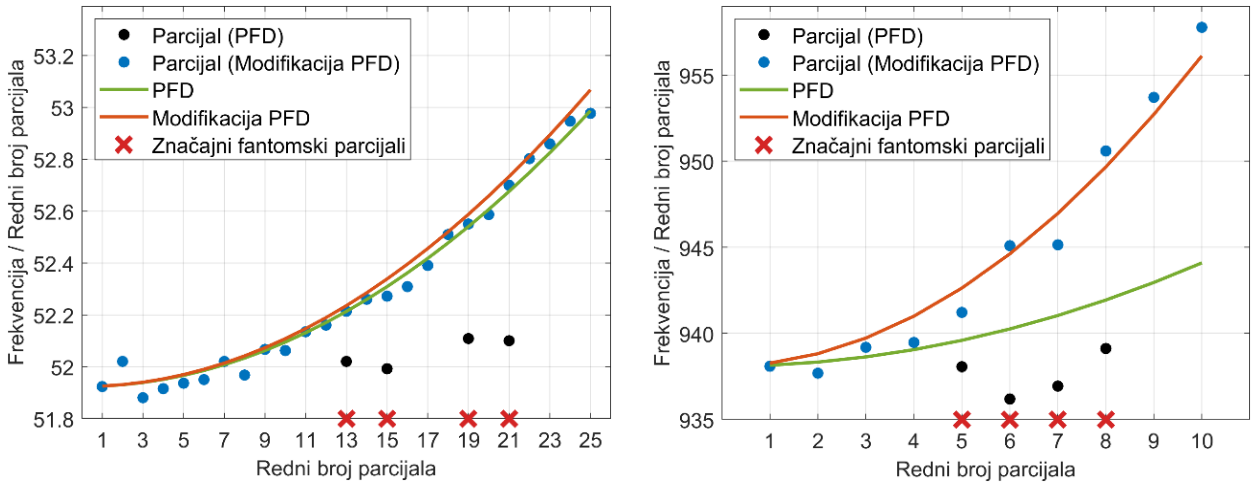
Slika 6.13 Koeficijent inharmoničnosti B harfe u opsegu od Es1 do Es6 procenjen na osnovu PFD i mPFD algoritma

Na slici 6.14. a) do c) prikazane su vrednosti koeficijenta inharmoničnosti harfe procenjene pomoću PFD i mPFD za položaje pedala 1, 2 i 3, respektivno. Za tonove kada je pedala u položaju 1, vrednosti B dobijene PFD i mPFD algoritmom razlikuju se za 21 ton, što predstavlja 58.3% od analiziranih tonova odsviranih na toj pedali. U slučaju kada je pedala u položaju 2, razlika u koeficijentu B je prisutna kod 23 tona (što predstavlja 63.8%), a u slučaju kada je pedala u položaju 3 razlika u procenjenim vrednostima B je kod 25 tonova (69.4%). Za preostale tonove, rezultati dobijeni na osnovu oba algoritma su identični. Ovi rezultati pokazuju da, u prisustvu izraženih fantomskih parcijala, modifikacija implementirana u PFD algoritmu značajno unapređuje tačnost procene B.



Slika 6.14 Koeficijent inharmoničnosti tonova harfe procenjen PFD i mPFD algoritmom za: a) položaj pedale 1, b) položaj pedale 2 i c) položaj pedale 3

Nasuprot tome, u tonovima gde je prisustvo fantomskih parcijala minimalno ili zanemarljivo, predložena modifikacija ne narušava tačnost procene. Najveća diskrepanca između PFD i mPFD uočena je za tonove odsvirane kada je pedala bila u položaju 3. Takav ishod je i očekivan, jer treći položaj pedale aktivira mehanizam koji preseca žicu na dva mesta, čime se skraćuje njena efektivna dužina, menjaju se granični uslovi oscilovanja žice, a posledično pojačavaju nelinearni efekti. Detaljan opis mehanizma dat je u poglavlju 3.3.2. Takođe, razlika u procenjenim vrednostima koeficijenata inharmoničnosti može se kvantifikovati kao relativno procentualno odstupanje, koje je za analizirane tonove variralo od 2.5% do 87.5%. Najveća odstupanja zabeležena su za tonove: G1(58.28%), A1(66.47%), Es2(54.5%), Eis2(32%), Gis2(47.16%), D5(35.66%), Fes5(87.5%), Ais5(66.9%), Des6(31.8%) i Eis6(41%).



Slika 6.15 Zavisnost f_k/k od rednog broja parcijala k za ton: a) As1 i b) Ais5

Radi ispitivanja uticaja fantomskih parcijala na procenu koeficijenta inharmoničnosti iz realnih tonova harfe analizirana su dva reprezentativna tona: As1 (odstupanje od 8.2%) i Ais5(odstupanje od 66.9%). Odabrani su ovi tonovi tako da prikažu dva scenarija, prvi u kome prisustvo fantomskih parcijala ne utiče značajno na procenu koeficijenta B i drugi u kome njihov uticaj dovodi do odstupanja procene od približno 70%. Na slici 6.15. a) i b) prikazana je zavisnost frekvencije parcijala tona (f_k) podeljena sa rednim brojem parcijala k od rednog broja parcijala k za tonove As1 i Ais5. Crnim tačkicama na slici označene su frekvencije parcijala procenjene PFD algoritmom, dok plave tačkice odgovaraju frekvencijama parcijala procenjenim mPFD algoritmom. Zelena kriva se zasniva na jednačini 6.1 i dobijena je sa vrednošću B procenjenom na osnovu PFD algoritma, dok je narandžasta kriva bazirana na istoj jednačini, ali u tom slučaju figuriše vrednost B procenjena na osnovu mPFD algoritma. Crvenom „X“ oznakom naznačeni su izraženi (značajni) fantomski parcijali. Pojam izraženog fantomskog parcijala u ovom kontekstu predstavlja fantomski parcijal koji je veće amplitude od inharmoničnog transverzalnog parcijala.

Na slici 6.15. a) izraženi fantomski parcijali se mogu uočiti na pozicijama 13.,15., 19. i 21. parcijala. To su ujedno i jedini slučajevi kada je PFD algoritam pogrešno procenio frekvencije parcijala , i umesto inharmoničnih parcijala procenio frekvencije fantomskih parcijala. Na ostalim pozicijama, frekvencije parcijala su identično procenjene primenom oba algoritma, što se vidi po tome što su se plave i crne tačkice na slici 6.15. a) preklopile. U ovom slučaju, procena koeficijenta inharmoničnosti B sprovedena je na osnovu 25 parcijala, pri čemu je PFD tačno procenio frekvencije prvih 12 parcijala. Dovoljno dugačak niz ispravno procenjenih frekvencija parcijala omogućio je PFD algoritmu pouzdanu procenu koeficijenta inharmoničnosti B, sa odstupanjem od svega 8.2% u odnosu na vrednost dobijenu pomoću mPFD algoritma ($B_{\mathrm{PFD}}=7.17\cdot10^{-5}$ i $B_{\mathrm{mPFD}}=6.62\cdot10^{-5}$). Nasuprot tome, za ton Ais5 (slika 6.15. b)) situacija je drugačija. Izraženi fantomski parcijali su grupisani i nalaze se na pozicijama od 5. do 8. parcijala. Kako ton sadrži ukupno 10 parcijala, za procenu B preostaju svega dva parcijala, što je nedovoljno da PFD algoritam da tačan rezultat. Zbog grupisanja i nepovoljnog položaja poslednjeg izraženog fantomskog parcijala naspram ograničenog broja preostalih parcijala, PFD ne može pouzdano da proceni B, što dovodi do toga da relativna greška iznosi oko 70%. U ovom slučaju procenjene vrednosti koeficijenata inharmoničnosti su: $B_{\mathrm{PFD}}=1.28\cdot10^{-4}$ i $B_{\mathrm{mPFD}}=3.88\cdot10^{-4}$. Nasuprot tome, mPFD algoritam tačno procenjuje frekvencije parcijala i konvergira ka tačnoj vrednosti koeficijenta inharmoničnosti.

Kao i na skupu sintetisanih tonova, i na realnim snimcima harfe mPFD donosi značajno poboljšanje tačnosti procene koeficijenta inharmoničnosti. Pri tome, greška procene ne zavisi od apsolutnog broja fantomskih parcijala, već pre svega od odnosa između broja fantomskih parcijala i ukupnog broja parcijala korišćenih za procenu B (N_p/N), u kombinaciji sa njihovim položajem i grupisanjem u spektru. U pomenutim uslovima mPFD je robusniji od PFD algoritma, jer pouzdano razlikuje fantomske od inharmoničnih parcijala i stabilno konvergira ka tačnoj vrednosti B.

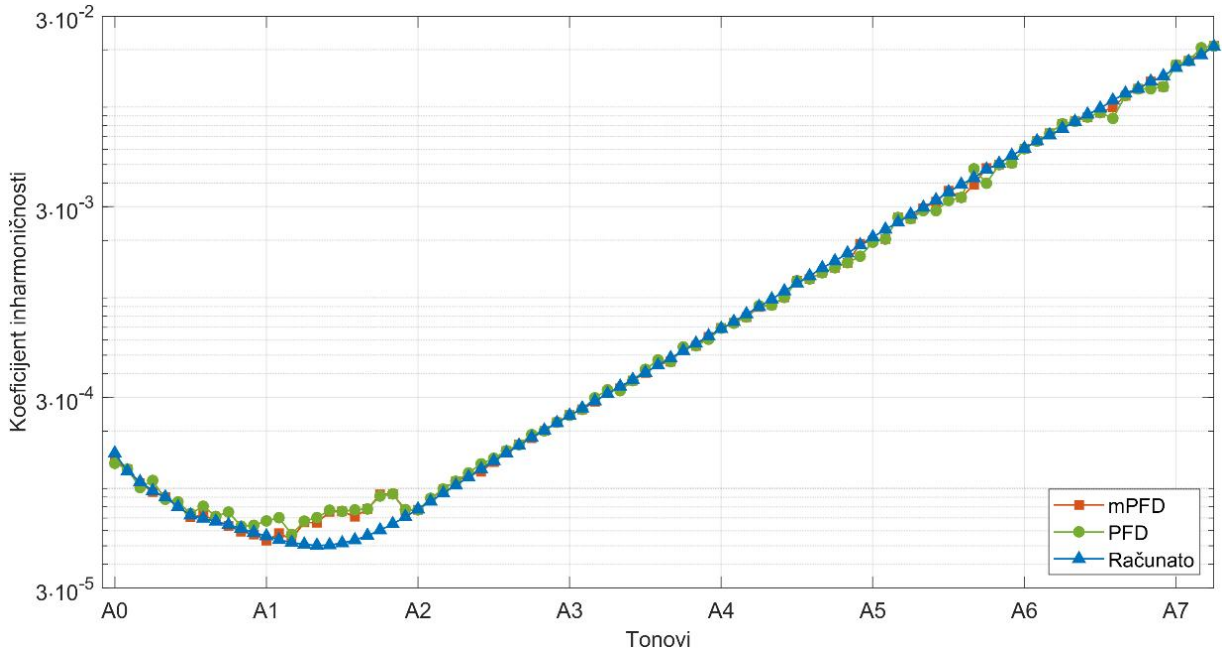
6.5 Validacija procene koeficijenta inharmoničnosti: PFD i mPFD u odnosu na teorijski model

U poglavlju 2.1.2 objašnjena je veza između koeficijenta inharmoničnosti i fizičkih svojstava žice kao što su krutost, Young-ov moduo elastičnosti. Zbog lakšeg praćenja dobijenih rezultata biće opet data u okviru ovog poglavlja kao:

$$B=\frac{\pi^3 E d^4}{64TL^2}, \qquad 6.9$$

gde E predstavlja Young-ov moduo elastičnosti, T tenziju žice, a d i L predstavljaju prečnik žice i njenu aktivnu dužinu. Ukoliko su poznati parametri žice, na osnovu jednačine 6.9 moguće je izračunati teorijski koeficijent inharmoničnosti za bilo koji tip žičanog muzičkog instrumenta. Pošto su vrednosti koeficijenta inharmoničnosti B izračunate sa dva algoritma (PFD i predloženi mPFD)

moguće je izvršiti njihovu verifikaciju poređenjem sa rezultatima proračuna na osnovu fizičkih parametara žica (teorijski model).

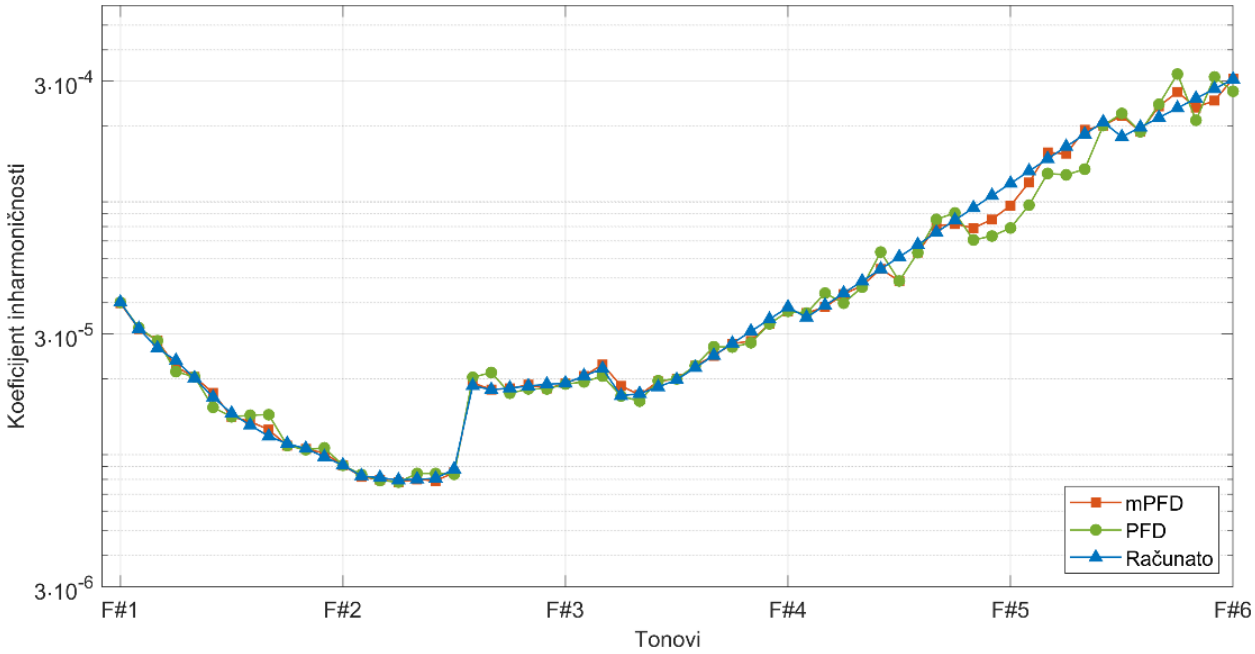


Slika 6.16 Koeficijent inharmoničnosti *B* tonova klavira procenjenih na osnovu teorijskog modela, PFD i mPFD algoritma

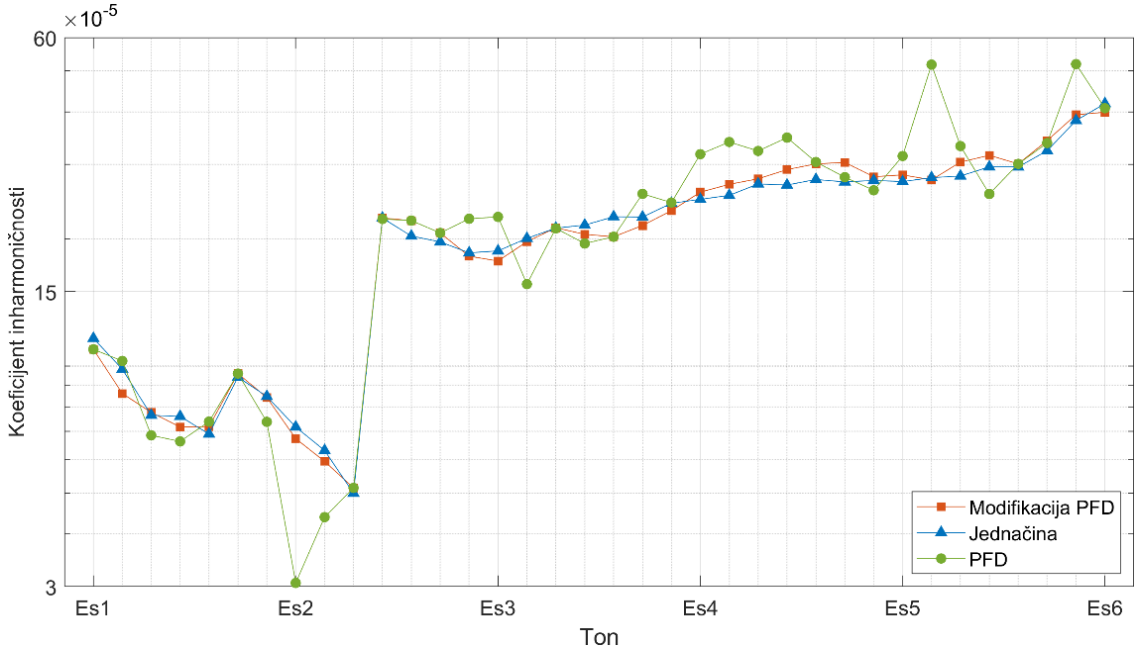
Na slici 6.16. dat je prikaz koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira dobijen na tri načina: na osnovu teorijskog modela (izraz 6.9), na osnovu PFD algoritma i na osnovu mPFD algoritma. Zelenim tačkicama predstavljene su vrednosti *B* dobijene PFD algoritmom, narandžastim kvadratićima vrednosti koje odgovaraju mPFD algoritmu, i plavim trouglićima vrednosti koje odgovaraju koeficijentu *B* računatom na osnovu 6.9. Podaci o žicama kao što su Young-ov moduo elastičnosti, tenzija, prečnik i aktivna dužina žice preuzeti su iz literature [63], [64], [65], [66]. Prikazane su vrednosti za ceo opseg klavira od tona A0 do tona C8. Sa slike 6.16. se može uočiti da se tri krive preklapaju skoro kroz čitav opseg od interesa. Kvantitativno, srednje relativno odstupanje između *B* procenjenog na osnovu realnih signala i vrednosti dobijenih izrazom 6.9, iznosi 9.54% za PFD algoritam, odnosno 6.7% za mPFD algoritam. Mali procenat odstupanja za PFD algoritam je u slučaju klavira i očekivan s obzirom da je PFD algoritam razvijan upravo na tonovima klavira. Takođe, spektar tona klavira ima veliki broj parcijala nad kojim se vrši procena *B*, a pojava izraženih fantomskih parcijala nije dovoljno dominantna da bi na taj način ugrozila tačnost procene *B*. Najveće odstupanje od teorijskog modela u slučaju PFD algoritma bilo je za ton D2 (52%), dok je najmanje odstupanje od 0.07% bilo u slučaju tona Ais6. Vrednosti *B* dobijene mPFD algoritmom iako zbog prikaza slike 6.16. deluju kao da ne odstupaju ni malo od teorijskog proračuna to nije slučaj. Najveće odstupanje od teorijskog modela u slučaju mPFD algoritma bilo je za ton Fis2 (53%), dok je kao i kod PFD algoritma i u slučaju mPFD algoritma najmanje odstupanje od 0.07% bilo u slučaju tona Ais6. Globalno, oba pristupa kako PFD, tako i mPFD algoritam daju pouzdane procene, ali predložena modifikacija se ponaša konzistentnije nad celim opsegom.

U istom maniru kao u slučaju klavira na slici 6.17. prikazane su krive koeficijenta inharmoničnosti *B* tonova čembala procenjenih na tri načina: na osnovu teorijskog modela, PFD i mPFD algoritmom. Oznake na slici su iste kao i u slučaju klavira. Za razliku od klavira gde se sve tri krive poklapaju za većinu tonova, kod čembala to nije slučaj. U donjem i srednjem registru, za tonove iz opsega od Fis1 do Fis4, sve tri krive imaju približno slične vrednosti i prate monotoni trend. U višem registru u poslednjoj oktavi od Fis5 do Fis6 i PFD i mPFD podbacuju u proceni *B* u odnosu na teorijsku vrednost računatu na osnovu 6.9. Upravo se i u tom frekvencijskom opsegu nalaze tonovi za koje oba algoritma najviše greše, u slučaju PFD algoritma to je ton Dis6 sa greškom od 36.31%, dok u slučaju mPFD

algoritma to je ton C6 sa greškom od 21%. Razlog tome je što je u tom opsegu broj parcijala na osnovu kojih se vrši procena 15, a prisustvo fantomskih parcijala je izraženo, što dovodi do podbacivanja u proceni *B*. Kvantitativno, srednje relativno odstupanje između *B* procenjenog na osnovu realnih signala i vrednosti dobijenih izrazom 6.9, iznosi 9.48% za PFD algoritam, odnosno 4.84% za mPFD algoritam. Srednje relativno odstupanje čembala jeste veće u odnosu na srednje relativno odstupanje klavira, ali neznatno, jer se oba instrumenta odlikuju sa velikim brojem parcijala neophodnim za procenu *B*.



Slika 6.17 Koeficijent inharmoničnosti *B* tonova čembala procenjenih na osnovu teorijskog modela, PFD i mPFD algoritma



Slika 6.18 Koeficijent inharmoničnosti *B* tonova harfe procenjenih na osnovu teorijskog modela, PFD i mPFD algoritma

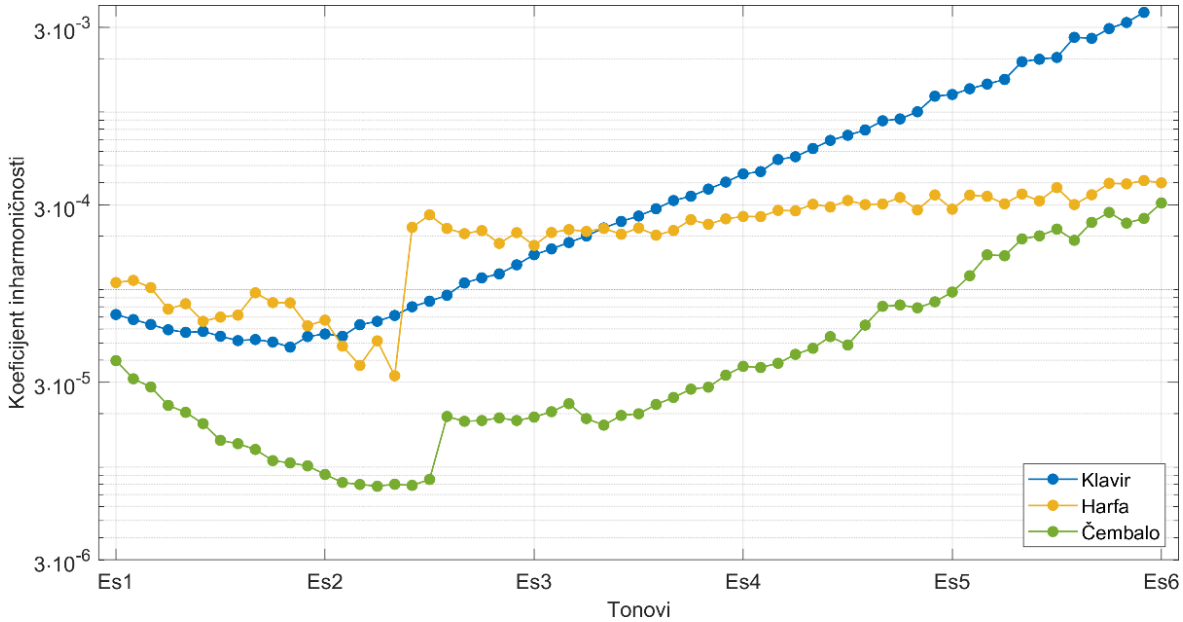
Kao i u slučajevima klavira i čembala na slici 6.18. prikazane su krive koeficijenta inharmoničnosti *B* tonova harfe procenjenih na tri načina: na osnovu teorijskog modela, PFD i mPFD algoritmom (oznake su iste kao za klavir i čembalo). Jedina razlika u prikazu je što su u slučaju harfe krive prikazane samo za položaj pedale 1, kada se žica smatra otvorenom, odnosno mehanizam za

preštimavanje nije pokrenut. Te su tako analizirani samo tonovi koji odgovaraju dijatonskom Ces-duru u rasponu od Es1 do Es6. Sa slike 6.18. se uočava da kriva dobijena na osnovu mPFD algoritma manje odstupa od vrednosti procenjenih na osnovu teorijskog modela, dok PFD algoritam značajnije odstupa, u opsegu tonova od Ges3 do Es6 čak ne prateći ni monotoni trend krivih procenjenih na osnovu mPFD i teorijskog modela. Odstupanja PFD algoritma u opsegu od Ges3 do Es6 pokazuju uticaj odnosa izraženih fantomskih parcijala N_p i ukupnog broja parcijala za procenu B. U tom opsegu odnos N_p/N raste, jer se broj parcijala za procenu smanjuje. Srednje relativno odstupanje između procenjenog B na osnovu realnih signala i dobijenih izrazom 6.9 u slučaju PFD algoritma iznosi 15.4%, odnosno 4.9% za mPFD. Najveće odstupanje od teorijskog modela u slučaju PFD algoritma bilo je za ton Fes5 (85.3%), dok je najmanje odstupanje od 0.15% bilo u slučaju tona Ges3. U slučaju mPFD algoritma, najveće odstupanje u odnosu na teorijski model bilo je za ton As1 (12.76%), a najmanje odstupanje za ton As2 (0.03%).

Zaključno, poređenje sa teorijskim modelom pokazuje da su procene zasnovane na mPFD algoritmu konzistentno tačnije u uslovima koji su izazovni za standardni PFD. Na klaviru, gde je PFD prvobitno razvijan i gde su fantomski parcijali prisutni ali ne i uvek izraženi, oba pristupa daju gotovo istovetne rezultate u odnosu na izraz (6.9), pri čemu primenom mPFD za pojedine tonove dolazi do minimalnih poboljšanja. Na čembalu se razlike uočavaju u višem registru zbog manjeg broja korisnih parcijala u proceni, udeo fantomskih parcijala relativno raste, te mPFD, zahvaljujući eliminaciji fantomskih parcijala, ostaje u proseku bliži vrednostima dobijenim iz fizičkog modela. Najzad, kod harfe, gde su fantomski parcijali česti i amplitudski izraženi, mPFD pokazuje jasnu prednost: kriva procenjenog koeficijenta inharmoničnosti B znatno bolje prati referentnu (računatu) krivu nego PFD, što je potvrđeno i merenim srednjim relativnim odstupanjima (4.9% naspram 15.4%).

6.6 Fizička interpretacija obrazaca za izračunavanje koeficijenta inharmoničnosti *B*

S obzirom na to da je u poglavljima 6.4 i 6.5 pokazano da modifikacija PFD algoritma obezbeđuje tačniju i stabilniju procenu koeficijenta inharmoničnosti B na realnim snimcima klavira, čembala i harfe, u nastavku se razmatra zbirni prikaz ovih rezultata. Na slici 6.19. prikazan je koeficijent B za sva tri instrumenta, procenjen na osnovu mPFD algoritma u zajedničkom tonskom opsegu. Za potrebe diskusije kriva B koja predstavlja koeficijent inharmoničnosti tonova harfe, odnosi se na tonove koji predstavljaju kombinaciju tonova odsviranih pedalom u položaju 1 i 2, čime je veštački formirana hromatska lestvica pogodna za uporednu analizu sa klavirom i čembalom.



Slika 6.19 Koeficijenti inharmoničnosti B tonova klavira, čembala i harfe procenjeni pomoću mPFD algoritma

Na osnovu oblika krivih koeficijenata inharmoničnosti može se izvući nekoliko zaključaka. Sagledavajući krivu koja odgovara koeficijentu inharmoničnosti klavira uočava se da ona za razliku od krivih čembala i harfe, ima monotono rastući trend, bez diskrepanci i skokova u toku. Ovakav profil je u skladu sa karakteristikama klavirskih žica. Kroz opseg od A0 do C8 parametri koji, sa stanovišta fizike, determinišu vrednost koeficijenta B (prečnik, aktivna dužina i tenzija) smanjuju se sa porastom frekvencije. Na osnovu izraza (6.9) može zaključiti da opadanje proizvoda tenzije i kvadrata aktivne dužine vodi ka porastu B, što se makroskopski ispoljava kao monotoni rast krive.

Za razliku od klavira, čembalo nema tako ujednačen trend. Nakon tona C3 uočava se skok u vrednosti koeficijenta B i to za red veličine. Ton C3 ima vrednost B=7.78·10^{-6}, dok njemu susedni ton Cis3 ima vrednost B=1.88·10^{-5}. Uzrok je promena materijala žice. Od Cis3 pa nadalje žice imaju manju gustinu (za oko 600 kg/m^3), što menja i tenziju kojom su zategnute. U ovom intervalu promena tenzije je izražena (oko 30 N), pa se, u skladu sa inverznom zavisnošću između B i tenzije, javlja skok u vrednosti B. Nakon tog, kod krive čembala uočava se trend monotonog rasta, ali znatno sporijom brzinom u odnosu na klavir. Razlog je što od tona Cis3 tenzija kod čembala opada sporije (u opsegu 55 do 33 N), dok se kod klavira u istom registru kreće približno od 762 do 576 N.

Profil koeficijenta inharmoničnosti harfe je zanimljiv jer poprima osobine kako klavira tako i čembala. U donjem registru, od tona Es1 do G2 vrednosti koeficijenta inharmoničnosti klavira i harfe su poredive. Iako je tenzija žica kod klavira u tom opsegu veća (oko 1700 N) nego kod harfe (oko 600 N), presudan uticaj ima prečnik žice. U tom frekvencijskom opsegu, žice harfe su izgrađene od čelika i obmotane su bakarnim nitima samim tim prečnik im je veći, a na osnovu izraza 6.9 se može videti da koeficijent B raste sa četvrtim stepenom prečnik žice. Sa druge strane, od tona Ges2 do Es6 žice harfe su izgrađene od creva. Promena materijala žice utiče na gustinu žice a samim tim i na tenziju kao i u slučaju čembala. Zbog toga kriva inharmoničnosti harfe isto ima skok od tona Ges2, gde ona za razliku od čembala nema tako izraženi monotoni rast.

Imajući u vidu da svaka od tri krive koeficijenata inharmoničnosti poseduje posebne profile i obrasce, koji su povezani sa fizičkim karakteristikama instrumenta, moguće je na osnovu oblika krive inharmoničnosti izvršiti distinkciju različitih žičanih muzičkih instrumenata.

6.7 Zaključak

Sprovedena analiza u ovom poglavlju pokazala je da je koeficijent inharmoničnosti B adekvatna mera za objektivnu karakterizaciju tonova klavira, čembala i harfe, ali i da tačnost procene presudno zavisi od prisustva fantomskih parcijala. Primena PFD algoritma dala je očekivano stabilne rezultate na klaviru i u velikom delu opsega čembala, dok su kod harfe uočena sistematska odstupanja upravo zbog zamene inharmoničnih parcijala fantomskim parcijalima u postupku selekcije maksimuma. Zbog navedenih ograničenja formalizovana je modifikacija PFD algoritma (mPFD). Ova modifikacija uvodi detekciju i eliminaciju fantomskih parcijala u zoni Δf_p kao i korišćenje adaptivnog broj parcijala N u skladu sa instrumentom i registrima. Dodatno, širina opsega Δf_p je analitički određena i može se podešavati prema instrumentu koji se analizira. Verifikacija je sprovedena na kontrolisanom skupu sintetisanih signala, gde su varirane vrednosti B, broj i raspored fantomskih parcijala. Pokazano je značajno smanjenje greške procene u odnosu na PFD (srednja relativna greška približno 0.45% za mPFD naspram 6.11% za PFD), kao i robusno ponašanje mPFD algoritma u uslovima nepovoljnog odnosa N_p/N i grupisanja fantomskih parcijala. Na realnim snimcima, mPFD je obezbedio ujednačeniji profil krive koeficijenta inharmoničnosti u odnosu na PFD. Kod harfe su uklonjene lokalne diskrepance u trendu toka krive povezane sa fantomskim parcijalima. Za sva tri instrumenta na osnovu mPFD algoritma postignuto je procentualno smanjenje greške u odnosu na procenu koeficijenta B pomoću PFD algoritma. U slučaju klavira, srednja greška pri proceni PFD algoritmom iznosi 8.9%, dok pri proceni mPFD algoritmom iznosi 3%. U slučaju čembala, procenti su sledeći: PFD algoritam (srednja greška 9.5%), mPFD algoritam (srednja greška 4.8%), dok u slučaju harfe PFD algoritam ima srednju grešku od 15.4%, a mPFD algoritam od 4.9%.

Glavni zaključci poglavlja objektivne karakterizaciju su:

1. Prisustvo i raspored fantomskih parcijala (odnos N_p/N, grupisanje i položaj u spektru) imaju presudan značaj na uticaj tačnosti procene koeficijenta inharmoničnosti B;
2. Predloženi algoritam mPFD obezbeđuje tačniju procenu koeficijenta inharmoničnosti eliminacijom fantomskih parcijala iz proračuna;
3. Oblik krive koeficijenta inharmoničnosti reflektuje fizičke karakteristike instrumenta (materijal, prečnik i dužina žice, tenzija), što omogućava jasnu distinkciju među žičanim muzičkim instrumentima.

Time je uspostavljena pouzdana i objektivna osnova za dalju perceptivnu analizu i korelaciju koeficijenta inharmoničnosti sa rezultatima subjektivnih testova.

7 Perceptivni efekti inharmoničnosti: prirodnost sinteze i konsonantnost intervala

Ovo poglavlje bavi se perceptivnom karakterizacijom tonova i intervala žičanih instrumenata kroz dva komplementarna subjektivna testa. Najpre se sprovodi subjektivna evaluacija prirodnosti sinteze. Na osnovu analiza realnih signala razvijen je postupak koji se zasniva na principima aditivne sinteze, gde je moguće lako kontrolisati parametre poput osnovne frekvencije f_0, koeficijenta inharmoničnosti B i vremenske obvojnice parcijala. Razvijenim postupkom formirane su četiri varijante sinteze koje se subjektivno evaluiraju sa ciljem izbora koja od četiri varijante najvernije podražava prirodni ton instrumenta harfe (Poglavlje 7.1). Metoda sinteze razvijena u okviru ove disertacije, kao i rezultati subjektivnog testiranja, objavljeni su i prezentovani na konferenciji [100]. U nastavku, izabrana sinteza koristi se za ispitivanje uticaja inharmoničnosti na disonantnost intervala. Najpre se izvršava objektivna karakterizacija putem krivih disonantnosti i kritičnih opsega (kvantifikacija uticaja broja parcijala i koeficijenta inharmoničnosti B), a zatim se formulišu i proveravaju hipoteze subjektivnim testiranjem (Poglavlje 7.2). Test signali u drugom subjektivnom testu zasnovani su na tonovima harfe i čembala, čime se fokus proširuje izvan klavira i obuhvataju instrumenti sa različitim spektralnim svojstvima i vrednostima koeficijenta inharmoničnosti B. Stimulusi intervala drugog subjektivnog testa sintetisani su metodom sinteze koja je ocenjena najprirodnijom u okviru subjektivnog testa opisanog u poglavlju 7.1. Na ovaj način minimizuje se uticaj same sinteze na ocenu disonantnosti intervala, obezbeđuje se metodološki kontinuitet između objektivnih i subjektivnih rezultata i postavlja okvir za kasnije razmatranje združenih efekata inharmoničnosti i fantomskih parcijala na percepciju intervala.

7.1 Subjektivna evaluacija prirodnosti metoda sinteze muzičkih tonova sa izraženom inharmoničnošću

U poglavlju 2 pokazano je da inharmoničnost predstavlja jedan od ključnih fenomena sa neposrednim perceptivnim implikacijama kako na tonove, tako i na intervale žičanih instrumenata. Stoga je neophodno uzeti u obzir koeficijent inharmoničnosti B u postupku sinteze tonova žičanih muzičkih instrumenata. Dosadašnja istraživanja uticaja inharmoničnosti na doživljaj tonova, sprovedena pre svega na klaviru, uglavnom su se oslanjala na aditivnu sintezu zbog njene jednostavne parametarske kontrole veličina kao što su osnovna frekvencije f_0 i koeficijent inharmoničnosti B. Međutim, takvi stimulusi često zvuče sintetički, budući da se zasnivaju na zbiru sinusoida (uz eventualno dodati šum ili spektralnu obvojnicu), što može skrenuti pažnju slušaoca sa fenomena koji se ispituje. Polazeći od ovih ograničenja, javila se potreba za razvojem metode koja generiše perceptivno verodostojnije tonove žičanih instrumenata, a istovremeno obezbeđuje preciznu i nezavisnu kontrolu parametara relevantnih za eksperiment: osnovne frekvencije f_0, koeficijenta inharmoničnosti B i vremenskih obvojnica pojedinačnih parcijala. Na osnovu predloženog dizajna stimulusa formirane su četiri varijante sinteze, čija će se prirodnost procenjivati subjektivnim testom. Cilj je umanjiti uticaj neprirodnosti sinteze na ocene i usmeriti pažnju ispitanika na efekat inharmoničnosti. Zbog toga se sprovodi subjektivna procena prirodnosti ove četiri varijante kako bi se odabrala ona koja najvernije oponaša prirodni ton i zatim koristila u daljim eksperimentima. Kao izvorni instrument izabrana je harfa: njeni tonovi su analizirani i sintetisani, a zatim korišćeni u subjektivnom testiranju. Odabir harfe motivisan je potrebom za širim domenom primenljivosti rezultata, jer preovlađujući fokus literature za klavir nameće proveru da li se zaključci mogu proširiti i na druge žičane instrumente, pri čemu izražena inharmoničnosti tonova harfe takvu proveru čini relevantnom. U skladu s tim, u nastavku je predstavljena i primenjena metoda analize i sinteze tonova sa izraženom inharmoničnošću, pogodna za sistematske perceptivne studije u kojima se B i ostali parametri ciljano variraju uz očuvanje visokog stepena prirodnosti zvuka.

7.1.1. Dizajn stimulusa

Dizajn stimulusa se bazira na principima aditivne sinteze gde se svakom stimulusu dodaju specifični atributi procenjeni iz realnih tonova harfe za koje se smatra da će pridodati utisku prirodnosti sintetizovanog tona. Sa ciljem da se to postigne, potrebno je izvršiti proces analize i sinteze signala. Oba procesa vrše se u specijalizovanom MuPI alatu opisanom u poglavlju 4. Akcenat je dat na dva modula MuPI aplikacije:

1. MuPI_B – u kojem se definiše broj parcijala N sa kojim će stimulus biti dizajniran, procenjuju se osnovna frekvencija tona f_0 kao i koeficijent inharmoničnosti B, projektuje se filtarska banka koja će izvršiti dekompoziciju signala na frekvencijske podopsege i procenjuje parametar M2M koji govori o izraženosti parcijala u okviru odgovarajućeg kanala filtarske banke;
2. MuPI_A – u kojem se vrži ekstrakcija vremenske obvojnice parcijala i sinteza stimulusa na osnovu procenjenih parametara iz modula MuPI_B.

Model na osnovu kojeg će biti dizajnirane različite varijante stimulusa, kao što je rečeno zasniva se na aditivnoj sintezi:

$$x[n] = \sum_{k=1}^{N} p_k a_k[n] sin\left(2\pi \frac{f_k}{f_s} n + \varphi_k\right) + r_l[n] + r_h[n], \qquad 7.1$$

gde je N broj parcijala korišćen pri sintezi, p_k predstavlja parametar M2M (u formulaciji dat kao p_k zbog lakše notacije), $a_k[n]$ predstavlja vremensku obvojnicu k-tog parcijala, f_k je frekvencija k-tog parcijala, φ_k je faza k-tog parcijala, a $r_l[n]$ i $r_h[n]$ su komponente signala iz opsega ispod najnižeg i najvišeg parcijala respektivno.

Procedura je takva da se snimljeni ton harfe, učita u prvi modul aplikacije MuPI, MuPI_S (opisano u poglavlju 4). U prvom modulu vrši se predobrada signala ukoliko postoji šum, na početku ili na kraju snimljenog tona. Takav deo se eliminiše i prelazi se u drugi modul, MuPI_B, u kojem se vrši dalja analiza signala. U modulu MuPI_B parametri poput osnovne frekvencije tona f_0, broja parcijala N i koeficijenta inharmoničnosti B unose se manuelno na osnovu rezultata mPFD algoritma. Završetkom unosa pojavljuju se isprekidane crvene pomoćne linije koje se pozicioniraju u skladu sa zadatim parametrima, što omogućava još jednu vrstu provere ukoliko je došlo do greške pri estimaciji navedenih parametara mPFD algoritmom. Ukoliko su vrednosti dobro procenjene, prelazi se na dizajniranje filtarske banke koja će signal podeliti na frekvencijske podopsege i time izdvojiti svaki parcijal ponaosob. Frekvencijski opsezi odgovaraju frekvencijama f_k inharmoničnih parcijala tona dobijenih na osnovu poznatog izraza $f_k = kf_0\sqrt{1+Bk^2}$. Broj kanala filtarske banke koja se dizajnira je N+2. U nultom kanalu filtarske banke nalaze se spektralne komponente koje su manjih frekvencija od osnovne frekvencije tona. Kanali pod rednim brojevima od 1 do N odgovaraju pojedinačnim parcijalima tona, dok poslednji kanal rednog broja N+1 sadrži opseg viših frekvencija, odnosno opseg u kome nema izraženih parcijala. Prema tome su i definisane komponente $r_l[n]$ i $r_h[n]$, odnosno komponenta $r_l[n]$ predstavlja sadržaj nultog kanala analiziranog tona, dok komponenta $r_h[n]$ predstavlja sadržaj poslednjeg (N+1) kanala. Za svaki od N kanala u kojima se nalaze frekvencije parcijala računa se parametar M2M, koji predstavlja odnos između maksimalne i srednje vrednosti u tom delu spektra. Ukoliko je vrednost parametra M2M manja od empirijski određenog praga (čija je vrednost 5), smatra se da takav parcijal ne treba uključiti u sintezu, jer kanal koji odgovara takvom parcijalu pretežno predstavlja energiju filtriranog šuma. Uključivanje takvog kanala u sintezu, po modelu opisanom formulom 7.1 bi uvelo nepostojeću, tonalnu komponentu u sintetisan signal. Samim tim ako je vrednost M2M manja od praga, parametar p_k koji učestvuje u sintezi dobija vrednost 0, odnosno takav parcijal se ne uključuje u sintezu. Ukoliko vrednost parametra M2M prelazi empirijski određeni prag takav parcijal ima udela u sintezi, odnosno parametru p_k se dodeljuje vrednost 1.

Parametri određeni u modulu aplikacije MuPI_B kao što su: procena frekvencije f_0, koeficijent inharmoničnosti B, frekvencija odabiranja f_s, signali kanala i niz p_k vrednosti, čuvaju se u privremenu .mat datoteku i prosleđuju u modul MuPI_A u kojem sledi procena vremenskih obvojnica parcijala i sinteza stimulusa. U modulu MuPI_A prvobitno je izvršena estimacija vremenskih obvojnica N parcijala. Estimacija vremenske obvojnice parcijala $a_k[n]$ izvršena je pomoću Hilbertove transformacije na način objašnjen u poglavlju 4. Međutim, tokom preliminarnih provera, stručnjaci koji se profesionalno bave snimanjem zvuka ukazali su da ovakav pristup sintezi održava energiju pojedinačnih parcijala. To ima za posledicu da sintetisani signal ne ispoljava prirodan vremenski tok opadanja obvojnice parcijala (eng. *decay*). Kako bi se kontrolisao uticaj energije parcijala, sprovedena je dodatna modifikacija vremenskih obvojnica tako da energetski nedominantni parcijali brže opadaju. Na taj način formirana je obvojnica $a_k^*[n]$. S obzirom da je reč o tonovima harfe koji su predmet analize, pokazano je da se već od 5. parcijala u spektru uočavaju parcijali koji nisu energetski dominantni, te su njihove obvojnice modifikovane. Modifikacija vremenskih obvojnica parcijala izvršena je takođe u okviru modula MuPI_A, gde je na estimiranu obvojnicu $a_k[n]$ dodat i eksponencijalni član zarad postizanja bržeg opadanja parcijala. Estimacijom vremenskih obvojnica parcijala završena je procena svih parametara iz izraza 7.1 i moguće je izvršiti sintezu stimulusa.

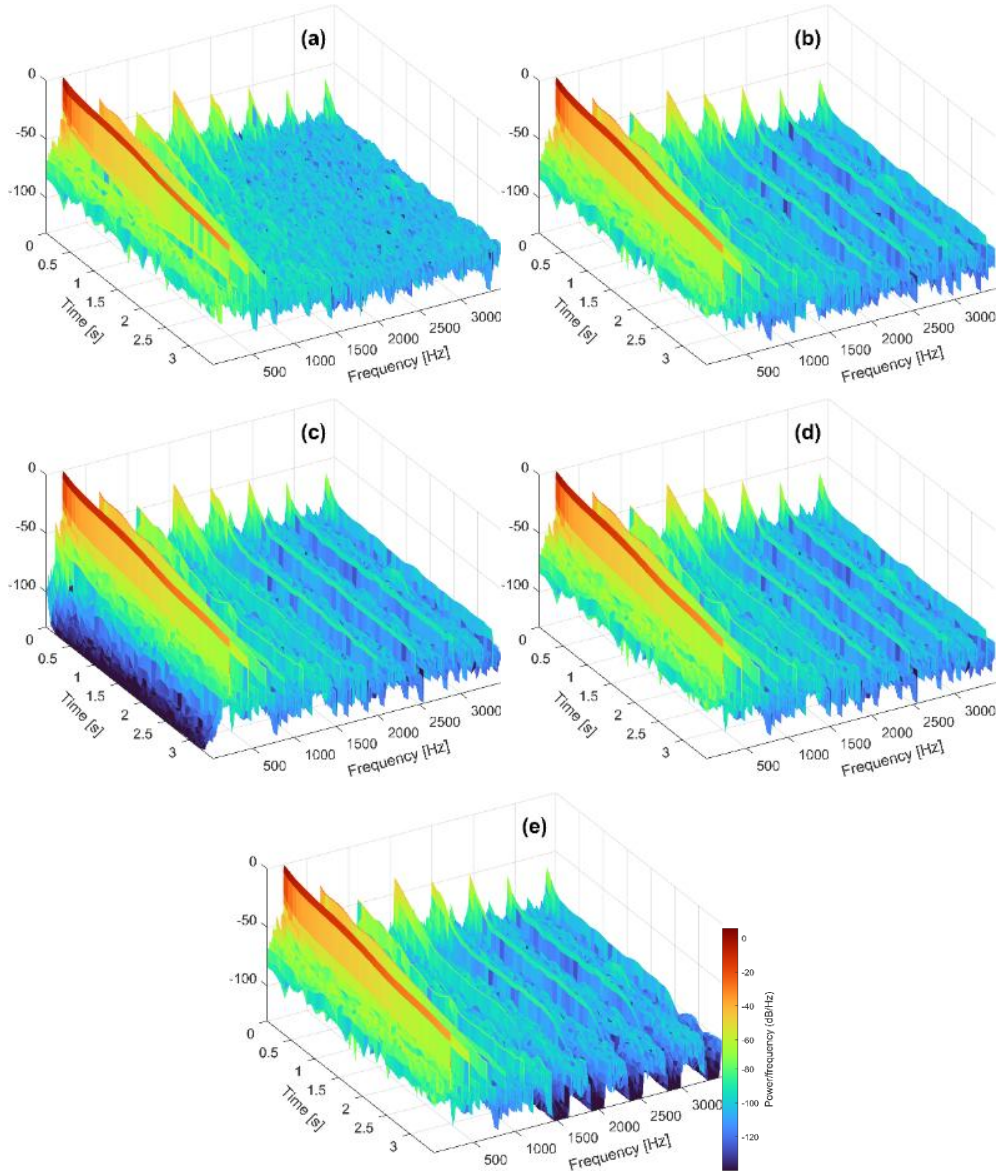
Radi procene prirodnosti predložene aditivne sinteze sa dodatnim parametrima, definisane su četiri varijante sinteze, dobijene modifikovanjem izraza 7.1. Predložene varijante su sledeće:

- Varijanta 1:
  $x[n]=\sum_{k=1}^{N} p_k a_k[n] sin\left(2\pi \frac{f_k}{f_s} n+\varphi_k\right)+r_l[n]+r_h[n]$ snimljen kao 16-to bitni signal,
- Varijanta 2:
  $x[n]=\sum_{k=1}^{N} p_k a_k[n] sin\left(2\pi \frac{f_k}{f_s} n+\varphi_k\right)$ snimljen kao 24-to bitni signal,
- Varijanta 3:
  $x[n]=\sum_{k=1}^{N} p_k a_k[n] sin\left(2\pi \frac{f_k}{f_s} n+\varphi_k\right)+r_l[n]+r_h[n]$ snimljen kao 24-to bitni signal,
- Varijanta 4:
  $x[n]=\sum_{k=1}^{N} p_k a^*{}_k[n] sin\left(2\pi \frac{f_k}{f_s} n+\varphi_k\right)+r_l[n]+r_h[n]$ snimljen kao 24-to bitni signal.

Varijante 1 i 4 razlikuju se samo po broju bita sa kojim su snimljeni signali za test. Obe varijante predstavljaju kompletan izraz 7.1, uključujući i parametre $r_l[n]$ i $r_h[n]$. Varijanta 2 je najjednostavnija i uključuje samo sumu, bez dodatih komponenti ispod osnovne frekvencije tona i iznad poslednjeg N. parcijala. Varijanta 4 je najkompleksnija i integriše sve procenjene parametre uz dodatnu manipulaciju vremenske obvojnice $a_k^*[n]$ nedominantnih harmonika.

Radi ilustracije navedenih principa i uočavanja razlika među varijantama, prikazani su spektrogrami reprezentativnog tona harfe A3 sintetizovanog sa sve četiri varijante sinteze. Ovi prikazi omogućavaju konceptualni uvid u položaje parcijala, efekte dodatnih komponenti r_l i r_h, kao i uticaj promena vremenskih obvojnica nedominantnih parcijala. Na Slici 7.1 dati su spektrogrami originalnog tona harfe A3 (Slika 7.1 a)), kao i spektrogrami signala sintetizovanih prema sve četiri varijante sinteze (Slike 7.1 b) do e)). Spektrogrami prikazani na slici 7.1 b) i d) se ne razlikuju jer se odnose na signale sintetizovane varijantom 1 i 3, koje se razlikuju samo u broju bita sa kojim su signali snimljeni. Poređenjem spektrograma originalnog signala (slika7.1 a)) sa spektrogramima signala sitntetizovanih kao varijanta 1 (slika7.1 b)) i varijanta 3 (slika7.1 d)), može se uočiti da se na nižim frekvencijama, do 1000 Hz, signali 1 i 3 poklapaju sa originalnom. Nasuprot tome, u slučaju

sintetizovanih signala 1 i 3 na višim frekvencijama dolazi do održavanja energije svakog parcijala tokom vremena, što kod originalnog tona harfe nije slučaj. Na slici 7.1 c) prikazan je spektrogram signala sintetizovanog varijantom 2 koji se najviše razlikuje od originalnog tona, jer u njegovu sintezu nisu uključene komponente originalnog signala r_l i r_h. Odsustvo r_l je posebno uočljivo, jer se u frekvencijskom opsegu ispod osnovne frekvencije tona ne pojavljuju komponente koji su nosioci energije. Nasuprot tome, spektrogram signala sintetizovanog varijantom 4 (slika 7.1 e)) najviše nalikuje originalnom signalu. U frekvencijskom opsegu od 1500 do 3000 Hz obvojnice parcijala su potisnute što dovodi do bržeg opadanja energije, zbog čega signal sintetizovan varijantom 4 najviše i nalikuje originalnom signalu tona harfe.



Slika 7.1 Spektrogrami tona A3: a) originalni ton, b) sintetizovan varijantom 1, c) sintetizovan varijantom 2, d) sintetizovan varijantom 3 i e) sintetizovan varijantom 4

7.1.2. Formiranje seta stimulusa za subjektivni test

U ovom potpoglavlju definiše se skup stimulusa za subjektivnu evaluaciju prirodnosti različitih varijanti sinteze. Glavni parametri za definisanje skupa stimulusa su: osnovna frekvencija tonova f_0, broj parcijala N i koeficijent inharmoničnosti B. Navedeni parametri se koriste u svim varijantama sinteze. U Tabeli 7.1 date su vrednosti pomenutih parametara koje su korišćene pri sintezi. Tonovi D2, A3 i H4 koji čine set test signala odabrani su zato što se razlikuju u više relevantnih parametara. Ključna razlika odnosi se na koeficijent inharmoničnosti B, pri čemu se vrednosti između tona D2 i

tonova A3/H4 razlikuju za red veličine. Ovaj raspon je u skladu sa činjenicom da se D2 na harfi ostvaruje okidanjem metalne žice, dok se A3 i H4 proizvode na crevnim žicama. Takvim izborom obuhvaćene su ne samo različite tonske visine, već i različiti materijali žica, što omogućava da se pored uticaja koeficijenta *B* razmotri i uticaj varijanti sinteze na očuvanje boje tona.

Tabela 7.1 Parametri korišćeni pri sintezi stimulusa

Ton	f_0 [Hz]	Broj parcijala *N*	Koeficijent inharmoničnosti *B*
D2	73.394	25	$6.92 \cdot 10^{-5}$
A3	220.077	15	$2.13 \cdot 10^{-4}$
H4	494.908	18	$3.1 \cdot 10^{-4}$

7.1.3. Procedura i učesnici subjektivnog testa

Subjektivni test je sproveden kao AB test, gde je ispitanik naizmenično i proizvoljan broj puta imao mogućnost da sluša stimulus A i stimulus B pre nego što donese odluku. Ispitanik je donosio odluku tako što je odgovarao na pitanje "Šta je prirodnije?". U ponuđenim odgovorima imao tri opcije A, B i jednako. Ukoliko se ispitanik odluči za opciju A to znači da mu je stimulus A zvučao prirodnije u odnosu na stimulus B, dok se opcija jednako odnosi na to da stimulusi A i B zvuče jednako prirodno.

S obzirom da su predmet subjektivnih testova bila 3 tona (D2, A3 i H4) i da za svaki ton postoji 5 različitih kombinacija signala (original i 4 varijante sinteze), ukupan broj kombinacija bez ponavljanja mogućih za slušanje u tom slučaju bio je 30. Međutim, osim 30 signala koji predstavljaju različite kombinacije sintetizovanih tonova u test je uključena i kontrolna grupa signala. Kontrolna grupa obuhvata parove u kojima signali A i B predstavljaju identične stimuluse. Takvih stimulusa u kontrolnoj grupi je bilo 15, što bi značilo da je ukupan broj stimulusa za testiranje koje su ispitanici morali da preslušaju bio 45. U subjektivno testiranje kontrolna grupa sintetisanih stimulusa je uključena kako bi se sprovela analiza o kredibilitetu slušalaca.

U testiranju je učestvovalo 46 ispitanika, starosne dobi od 20 do 35 godina. Formalno muzičko obrazovanje (srednja muzička škola ili muzička akademija) posedovao je 21 ispitanik. Subjektivno testiranje je izvršeno u prostorijama Laboratorije za Akustiku na Elektrotehničkom fakultetu. Ispitanici su slušali u kontrolisanim i za sve jednakim uslovima. Zarad uticaja na kvalitet zvuka samih signala njihova reprodukcija je omogućena uz Yamaha Steinberg UR22 [92], kao i AKG K92 slušalice [101]. S obzirom na to da nivo signala ne utiče na rezultate subjektivnog testiranja ove vrste, ispitanici su imali slobodu da po sopstvenom nahođenju prilagode nivo zvuka prilikom testiranja.

7.1.4. Analiza rezultata subjektivnog testa

U ovom potpoglavlju izvršena je statistička analiza rezultata subjektivnog testa. Sprovedene su analize o kredibilitetu slušača i o zavisnosti rezultata od reprodukovanog sadržaja. Takođe, izvršena je korelacija između rezultata dobijenih subjektivnim testiranjem i objektivnih parametara.

7.1.4.1 Ispitivanje kredibiliteta slušača

Analiza je bazirana na formiranju nulte hipoteze i dve alternativne hipoteze za verovatnoću odgovora slušaoca (p), koje se testiraju dvostranim testom [102]:

- H_0: slušaoci odgovaraju slučajno, p=0.5,
- H_{A1}: slušaoci odgovaraju bolje od slučajnog izbora (identifikuju iste stimuluse), p>0.5 i
- H_{A2}: slušaoci odgovaraju lošije od slučajnog izbora (greška u eksperimentu), p<0.5.

Na osnovu tabele za dvostrani test [102], na nivou značajnosti od 5%, slušaoci moraju da identifikuju iste signale bar 13 od 15 puta da bi odbacili hipotezu H_0 u korist H_{A1}. Ako ne uspeju da ih identifikuju najmanje 4 puta, H_0 se odbacuje u korist H_{A2}. U analizi za ispitivanje kredibiliteta slušača, slušalac

sa najslabijim rezultatom imao je 5 tačnih identifikacija, što implicira da ne postoji greška u eksperimentu (hipoteza H_{A2} je odbačena). Istovremeno, 25 od 46 učesnika identifikovalo je iste signale bar 13 puta, što znači da sa nivoom značajnosti od 5%, 25 slušača je odbacilo hipotezu H_0 u korist hipoteze H_{A1}. Za preostale učesnike, njih 21, odgovori se tretiraju kao slučajni. Shodno tome, u daljim analizama razmatraće se odgovori samo 25 učesnika.

7.1.4.2 Zavisnost rezultata testa od reprodukovanog sadržaja

U subjektivnom testu postoje stimulusi četiri različite vrste sinteze za tri različita tona. Sa ciljem ispitivanja da li postoji uticaj sadržaja (tona) na rezultate subjektivnog testa formirane su dve hipoteze:

- H_0 (Nulta hipoteza): rezultati subjektivnog testa ne zavise od sadržaja (tona)
- H_A (Alternativna hipoteza): rezultati subjektivnog testa zavise od sadržaja (tona)

U Tabeli 7.2 prikazani su rezultati koliko puta su se slušaoci odlučili za svaku varijantu sinteze svakog tona (red „Izbrojano“). Kolona „Ukupno“ odnosi se na zbir reda „Izbrojane“ za Ton 1, 2 i 3. Vrednosti u redu „Očekivano“ dobijene su tako što je vrednost „Ukupno“ podeljena na 3 jednaka dela.

Tabela 7.2 Izbor varijanti sinteze na osnovu procene slušaoca i očekivanog broja izbora

Sinteza		Ton 1	Ton 2	Ton 3	Ukupno
Orig.	Izbrojano	40	39	52	131
	Očekivano	43.7	43.7	43.7	
1	Izbrojano	34	38	28	100
	Očekivano	33.3	33.3	33.3	
2	Izbrojano	23	12	18	53
	Očekivano	17.7	17.7	17.7	
3	Izbrojano	45	35	30	110
	Očekivano	36.7	36.7	36.7	
4	Izbrojano	37	38	35	110
	Očekivano	36.7	36.7	36.7	

Na osnovu Tabele 7.2 može se uočiti da su izbrojane i očekivane frekvencije slične, ali je za ispitivanje nulte hipoteze potrebno sprovesti χ^2 test [103]. Kritična vrednost za χ^2 test određena je iz tabele [104], za dvostrani interval poverenja od 95%. Vrednost sprovedenog χ^2 testa iznosi 11.01 što je manje od kritične vrednosti testa. Takođe, nivo značajnosti testa ima vrednost od 0.954. Na osnovu toga, može se tvrditi da se hipoteza H_0 ne odbacuje, odnosno da rezultati subjektivnog testa ne zavise od tona koji se reprodukuje slušaocima. Uzimajući u obzir rezultate statističkog testa, u daljoj analizi podaci iz subjektivnog testa biće razmatrani zbirno za sva tri tona, bez gubitka relevantnih informacija.

7.1.4.3 Rangiranje sinteza prema rezultatima subjektivnog testa

Subjektivni test u ovom poglavlju koncipiran je tako da ispitanik, za svaki par stimulusa, odabere prirodniji. Postoje tri moguća odgovora A, B i stimulusi su jednako prirodni. Ukoliko se slušalac

odluči za stimulus A, taj stimulus dobija 1 poen, a stimulus B dobija 0 poena i obrnuto. Za slučaj kada je odgovor da su stimulusi jednako prirodni oba stimulusa A i B dobijaju po 0.5 poena. Na osnovu analize kredibiliteta slušalaca utvrđeno je da će u finalnom subjektivnom testu učestvovati 25 slušalaca. Analiza uticaja sadržaja na rezultate subjektivnog testa pokazala je da se rezultati za tri različita tona mogu posmatrati objedinjeno. Shodno tome, svaki ispitivani par sinteza mogao je da ostvari ukupno 75 poena. Imajući u vidu način bodovanja odgovora slušaoca formirana je tabela sa rezultatima subjektivnog testa. U Tabeli 7.3 prikazani su rezultati testa za sve parove stimulusa svih varijanti sinteza kao i originalnog signala (Orig.). Kolona d1 Tabele 7.3 odnosi se na broj poena koje je sinteza A osvojila u poređenju sa sintezom B u A/B paru, dok kolona d2 prikazuje broj poena koje je sinteza B osvojila u poređenju sa sintezom A u istom A/B paru.

Tabela 7.3 Distribucija rezultata subjektivnog testa za svaki par sinteza

A/B Par	d1	d2	d1 (%)	d2 (%)
Orig. - 1	42.5	32.5	56.7	43.3
Orig. - 2	**63**	**12**	**84.0**	**16.0**
Orig. - 3	42	33	56	44
Orig. - 4	40	35	53.3	46.7
1 - 2	**57.5**	**17.5**	**76.7**	**23.3**
1 - 3	34.5	39.7	46.6	53.4
1 - 4	40.5	34.5	54	46
2 - 4	**19**	**56**	**25.3**	**74.7**
2 - 4	**9**	**66**	**12**	**88**
3 - 4	36.5	38.5	48.7	51.3

Zarad analize rezultata subjektivnog testa prikazanih u Tabeli 7.3 neophodno je sprovesti statističku analizu. Za te potrebe formirane su nulta i alternativna hipoteza, koje se testiraju dvostranim testom [102], [105]:

- H_0: slušaoci odgovaraju nasumično jer ne mogu da izaberu jednu sintezu u odnosu na drugu, P_s=50%,
- H_A: slušaoci biraju jednu sintezu kao prirodniju u odnosu na drugu, P_s>50%.

S obzirom da je za svaki par stimulusa veličina uzorka bila 75 (n>30) možemo izvršiti aproksimaciju multinominalne raspodele normalnom raspodelom [105], [106] čime se omogućava sprovođenje standardnog z-testa. Z-*score* se računa kao [107]:

$$z_{sample} = \frac{(P_s - 0.5)}{\sqrt{\frac{P_u(100-50)}{n}}}, \qquad 7.2$$

kada važi da je P_s>P_u, gde su P_s procenat uzorka, P_u pretpostavljeni procenat, a n veličina uzorka. Preuređivanjem izraza 7.2 izražava se pojedinačna verovatnoća za svaki par stimulusa kao:

$$P_s = z_{sample}\sqrt{\frac{P_u(100-50)}{n}} + P_u + 0.5. \qquad 7.3$$

Da bi se na osnovu izraza 7.3 dobila vrednost P_s (pojedinačne verovatnoće za svaki par) neophodno je prvo odrediti z-*sample*, gde se vrednost z-*sample* dobija na osnovu tabele kritičnih vrednosti za normalnu raspodelu. Korišćen je nivo značajnosti od 5%, za koji z-*sample* ima vrednost 1.64. Na osnovu toga i prethodnog izraza dobija se da je P_s =59.9%. Dobijena vrednost P_s =59.9% implicira da se u bilo kom paru, sinteza sa rezultatom od 59.9% ili više može smatrati boljom od druge sinteze iz para sa nivoom značajnosti od 5%. Te su tako u Tabeli 7.2 podebljani oni parovi kod kojih je dobijen rezultat veći od 59.9%. Na osnovu tih rezultata zaključuje se da je sinteza 2 lošija od svih drugih sinteza. Dvosmislenost u ostalim parovima u kojima nijedna sinteza nije bila superiorna prema statističkoj analizi, uticala je da se formiraju tri moguća rangiranja, pri nivou značajnosti od 5%:

- Orig. 1 4 3 2
- Orig. 3 1 4 2
- Orig 4 3 1 2

7.1.4.4 Korelacija subjektivnih i objektivnih ocena

Prema rezultatima subjektivnog testa, prikazanim u prethodnom potpoglavlju, mogu postojati tri različita rangiranja sinteza. Da bi se jednoznačno odredilo koja sinteza od 4 varijante je najbolja izračunati su i objektivni parametri. Određivanjem objektivnih parametara za sva 4 tipa sinteze ideja je da se izračunavanjem korelacije između tri moguća ranga sinteza (dobijena kao rezultat subjektivnog testiranja) i objektivnih parametara izvede zaključak o jednoznačnom rangu sinteza i samim tim i sintezi koja je ostvarila najbolje rezultate. Za sve varijante sintezi izračunata su tri objektivna parametra, PEAQ (*Perceptual Evaluation of Audio Quality*) [108], RMSE (*Root Mean Square Error*) [106] i koeficijent korelacije [107], koja pokazuju sličnost sintetizovanih stimulusa sa originalnim signalom. Tri pomenuta objektivna parametra izabrani su kao uobičajeni predstavnici objektivne mere audio signala. Rezultati objektivnih parametara za sve sinteze dati su u Tabeli 7.4.

Struktura Tabele 7.4 je ista je za svaki od tri objektivna parametra (PEAQ, RMSE i koeficijent korelacije). U koloni „Parovi“ prikazane su sve kombinacije u kojima se poredi originalni signal sa četiri varijante sinteze. U koloni „Vrednost parametra“ nalaze se vrednosti koje su dobijene računanjem objektivnog parametra od interesa kada su ulazni podaci neka od kombinacija signala koji se porede. Kolona „Rang prema objektivnom testu“ predstavlja rang koji je formiran na osnovu kolone „Vrednost parametra“. Zatim u koloni „Rang prema subjektivnom testu“ ispisana su 3 ranga koja su dobijena subjektivnim testiranjem, i ta 3 ranga su u tabeli ista za sva tri objektivna parametra. I na kraju kolona „Spearman-ov koeficijent“ u kojoj se nalaze vrednosti koje govore o korelaciji objektivnog ranga i svakog od tri subjektivna ranga data u koloni „Rang prema subjektivnom testu“.

PEAQ predstavlja standardizovani postupak za objektivno merenje perceptivnog audio kvaliteta i njegova vrednost se kreće u granicama od -4 do 0, gde 0 predstavlja neprimetnu razliku, a -4 veoma veliku razliku između 2 signala. Posmatrajući vrednosti u Tabeli 7.4 uočava se da najnegativniju vrednosti parametra PEAQ (najrazličitiji od originala) ima sinteza broj 2. Sinteze označene sa 1, 3 i 4 imaju slične vrednosti, ali se sinteza broj 4 na osnovu ovog parametra izdvaja kao najsličnija originalnom signalu. Čime se zaključuje da je objektivan rang sinteza prema ovom parametru: Orig. 4 3 1 2. Vrednosti parametra RMSE se razlikuju malo za sve slučajeve sinteze, ali se može uspostaviti rang sinteza kao: Orig. 4 1 3 2. Kao i kod PEAQ parametra, koeficijent korelacije je najmanji kod druge sinteze, dok su vrednosti za sinteze 1, 3 i 4 sličnije. Međutim i na osnovu koeficijenta korelacije između sintetizovanih signala i originalnog signala uspostavljen je rang: Orig. 4 3 1 2. Na osnovu rangova dobijenih pomoću tri objektivna parametra zaključuje se da je sinteza 4 najsličnija originalnom signalu.

Tabela 7.4. Rang sinteza na osnovu subjektivnog testa i objektivnih parametara

Parametar	Parovi	Vrednost parametra	Rang prema objektivnom testu	Rang prema subjektivnom testu	Spearman-ov koeficijent
PEAQ	Orig. - Orig.	0	Orig. 4 3 1 2		
	Orig. - 1	-1.35433		Orig. 1 4 3 2	0.9
	Orig. - 2	-2.02267		Orig. 3 1 4 2	0.75
	Orig. - 3	-1.33330		Orig. 4 3 1 2	**1.0**
	Orig. - 4	-1.32566			
RMSE	Orig. - Orig.	0	Orig. 4 1 3 2		
	Orig. - 1	0.014042		Orig. 1 4 3 2	0.9
	Orig. - 2	0.014335		Orig. 3 1 4 2	0.75
	Orig. - 3	0.014090		Orig. 4 3 1 2	**0.9**
	Orig. - 4	0.014031			
Koeficijent korelacije	Orig. - Orig.	1.0	Orig. 4 3 1 2		
	Orig. - 1	0.808474		Orig. 1 4 3 2	0.9
	Orig. - 2	0.799388		Orig. 3 1 4 2	0.75
	Orig. - 3	0.808476		Orig. 4 3 1 2	**1.0**
	Orig. - 4	0.808927			

Za određivanje veze između rezultata subjektivnog testa i objektivnih metrika za poređenje različitih sinteza signala korišćen je Spearman-ov koeficijent [109]. Ovaj koeficijent se zasniva na računanju razlika između odgovarajućih vrednosti u dva skupa podataka (u ovom slučaju subjektivni i objektivni rangovi sinteza) [110]. Spearman-ov koeficijent se računa [109]:

$$r_s = 1 - \frac{6\sum D^2}{n(n^2-1)}, \qquad 7.4$$

gde je D razlika u rangu između dva seta podataka, a n veličina seta. U ovom konkretnom slučaju veličina seta je 5 (original i četiri varijante sinteze). Spearman-ov koeficijent izračunat je za svaki od mogućih kombinacija rangova na osnovu subjektivnog testa i rangova dobijenih na osnovu tri objektivna parametra. Rezultati su prikazani u poslednjoj koloni Tabele 7.4. Na osnovu vrednosti Spearman-ovog koeficijenta između PEAQ ranga i tri potencijalna ranga iz subjektivnog testa zaključuje se da je rang Orig. 4 3 1 2 najverovatniji (r_s=1). Isti zaključak se nameće i na osnovu Spearman-ovog koeficijenta između koeficijenta korelacije i rezultata subjektivnog testa. Spearman-ov koeficijent između RMSE i subjektivnog testa za rang Orig. 4 3 1 2 (najbolji u prethodna dva izračunavanja) ima istu vrednost kao za rang Orig. 1 4 3 2 (r_s=0.9). Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 7.4 zaključuje se da rang sinteza Orig. 4 3 1 2 ima najbolje ocene kada se posmatraju rezultati

objektivnih i subjektivnih testova. Dakle, sinteza 4 prema rezultatima sprovedenog subjektivnog i objektivnog istraživanja, najsličnija je originalnom signal.

7.1.5. Zaključak

U ovom potpoglavlju ispitana je prirodnost različitih varijanti sinteze tonova harfe, polazeći od aditivne sinteze sa dodatim atributima iz realnih signala kao što su: vremenska obvojnica i broj dominantnih parcijala, koeficijent inharmoničnosti B, komponente ispod najnižeg (r_l) i iznad najvišeg (r_h) parcijala, kao i manipulacija nad obvojnicama nedominantnih parcijala. Subjektivni test nije izdvojio jednu od varijanti sinteze kao statistički superiornu, već su se formirala tri moguća subjektivna ranga. Zbog toga uvedene su objektivne metrike (parametara PEAQ, RMSE i koeficijenta korelacije) i izvršena je korelacija subjektivnih i objektivnih rangova. Korelacijom rangova dobijenih subjektivnim testom i na osnovu objektivnog ranga dobijenog na osnovu parametara PEAQ, RMSE i koeficijenta korelacije može se izvući nekoliko zaključaka. S obzirom da nakon subjektivnog testiranja postoje tri ranga sinteza, odnosno nijedna varijanta sinteze se statistički jednoznačno ne izdvaja, generalni zaključak je da je princip sinteze u ovom radu koji se zasniva na aditivnoj sintezi sa pridodatim atributima estimiranim iz realnih signala harfe, dobar. Izborom tonova za stimulus sinteze, pokazano je da je sinteza primenjiva kroz ceo frekvencijski registar muzičkog instrumenta, kao i da na sintezu ne utiču ostali objektivni parametri poput broja harmonika i koeficijenta inharmoničnosti. Najlošija sinteza je varijanta sinteze 2, što pokazuje da nije dovoljno u sintetizovani zvuk uključiti samo predefinisani broj harmonika sa njima pridruženim obvojnicama, već da na utisak "prirodnosti" signala utiču komponente signala koje se nalaze iznad najvišeg (r_h) i ispod najnižeg (r_l) parcijala. Takođe, bliski procenti ostvareni u subjektivnom testiranju između sinteze 1 i 3 (46.6% do 53.4%) govori u prilog tome da broj bita kojim će se sintetizovati stimulus za naredna istraživanja nije od presudnog značaja sa aspekta percepcije prirodnosti sinteze. Na osnovu rezultata korelacije subjektivnih i objektivnih rangova sinteza najsličnija originalu je varijanta sinteze 4. Manipulacija nad obvojnicama nedominantnih parcijala koja je implementirana u varijanti sinteze 4 pored ostalih atributa (r_l, r_h i p_k) doprinela je opadanju energije viših harmonika. Upravo to energetsko opadanje viših harmonika u vremenu utiče na prirodnost sinteze, jer podjednako trajanje viših harmonika kao i nižih sugeriše slušaocima da se radi o sintetizovanom stimulusu, a ne o stimulusu koji predstavlja ton odsviran na instrumentu. Saznanje da je varijanta 4 najprirodnija ima suštinski značaj, jer se njenom primenom u narednim subjektivnim testovima otklanja pitanje prirodnosti sinteze, a fokus istraživanja premešta se isključivo na uticaj inharmoničnosti na percepciju tonova i muzičkih intervala žičanih instrumenata.

7.2 Uticaj inharmoničnosti na konsonantnost i disonantnost intervala: objektivna i subjektivna procena na tonovima harfe i čembala

U poglavlju 2, pokazano je, kroz pregled literature, da doživljaj konsonance i disonance intervala zavisi od interakcija parcijala u okviru kritičnih opsega i inharmoničnosti tonova koji čine interval [13]. Prvobitna istraživanja sprovođena su na prostim sinusnim komponentama (interval čini par sinusoida različitih frekvencija), a zatim i na kompleksnim tonovima. Kompleksni tonovi u tom slučaju predstavljali su signale koji se sastoje od niza sinusnih komponenti čije su frekvencije raspoređene ili prema harmonijskom nizu (na celobrojnim umnošcima osnovne frekvencije f_0) ili kao inharmonični parcijali sa frekvencijama korigovanim u skladu sa koeficijentom inharmoničnosti B. Međutim, ostaje otvoreno pitanje da li i kako inharmoničnost utiče na konsonantnost, odnosno disonantnost intervala kada su u pitanju tonovi koji verodostojno podražavaju realne tonove žičanih instrumenata.

U ovom poglavlju najpre se sprovodi objektivna analiza koja se bazira na krivoj disonantnosti [13], kao i na kritičnom opsegu i opsegu izbijanja (eng. *beating*). Cilj objektivne analize jeste kvantifikacija disonantnosti u zavisnosti od broja parcijala i koeficijenta inharmoničnosti B. Na osnovu saznanja objektivne analize formuliše se hipoteza za subjektivno testiranje, pri čemu su test signali

sintetizovani varijantom sinteze 4 utvrđenom kao najprirodnijom u subjektivnom testu opisanom u poglavlju 7.1. Time se minimizuje uticaj same sinteze na ocenu konsonance, odnosno disonance. Subjektivnim testom obuhvaćeni su tonovi harfe i čembala, sa ciljem proširivanja saznanja o disonantnosti intervala van domena klavira. Takođe, harfa i čembalo su izabrani kao antipodi, u broju izraženih parcijala u spektru i koeficijenta inharmoničnosti. Rezultati objektivne analize, kao i subjektivnog testa, smatraju se polaznom instancom istraživanja uticaja inharmoničnosti na percepciju disonantnosti, sa idejom proširivanja saznanja ka zbirnom uticaju inharmoničnosti i fantomskih parcijala na percepciju intervala.

7.2.1. Objektivna karakterizacija intervala

Konsonantnost i disonantnost intervala opisuju se kao subjektivni kvaliteti zvuka dva ili više tonova koji se izvode istovremeno. Konsonanti intervali su muzički intervali koji se doživljavaju kao stabilni, prijatni i harmonični. Povezuju se sa jednostavnim odnosima osnovnih frekvencija (2:1 za oktavu, 3:2 za kvintu, 4:3 za kvartu) koji rezultuju velikom koincidencijom parcijala i malim stepenom interferencija u kritičnim opsezima [13], [111], [112]. U muzičkoj praksi, konsonantni intervali se koriste kao stabilne tačke tonaliteta i osnova akorda. Na osnovu tradicionalno utemeljene muzičke teorije, kontrapunkta i harmonije, razlikuju se savršene konsonance (oktava, čista kvinta, čista kvarta) i nesavršene konsonance (velika i mala terca, velika i mala seksta) [113], [114].

Nasuprot tome, disonantni intervali su intervali koji se doživljavaju kao nestabilni, napeti i neprijatni i koji stvaraju osećaj potrebe za razrešenjem ka konsonanci. Disonanca je povezana sa kompleksnijim odnosima osnovnih frekvencija, pri čemu dolazi do povećane interferencije parcijala unutar kritičnih opsega, što dovodi do perceptivne „grubosti“ (eng. *roughness*) [13], [111], [115]. U strogom kontrapunktu disonance su prihvatljive samo u kontrolisanim uslovima, kada predstavljaju prolazni ton ili anticipaciju koja vodi ka razrešenju, dok u savremenim teorijama predstavljaju izvor ekspresije i napetosti. Predstavnici disonantnih intervala su: mala i velika sekunda i mala i velika septima.

Pojmovi konsonantnosti i disonantnosti predstavljaju kvalitativne odrednice, odnosno subjektivna merila, koja nisu jednoznačno definisana u poređenju sa psihofizičkim fenomenima poput tonske visine (eng. *pitch*), jačine (eng. *loudness*) i boje tona (eng. *timbre*). Sa tim u vezi potrebno je razmatrati muzičke intervale sa objektivnog kvantitativnog stanovišta i ostvariti vezu sa dosadašnjim perceptivnim saznanjima.

7.2.1.1 Kriva disonantnosti

Kriva disonantnosti predstavlja objektivnu funkciju koja kvantifikuje očekivani stepen perceptivne „grubosti“ (eng. *roughness*) za dati interval, kao posledicu interferencije parcijala u okviru kritičnih opsega. Teorijsko utemeljenje analize disonantnosti počiva na radu Plompa i Levelta [13]. Autori su najpre sproveli niz subjektivnih testova i korelisali rezultate sa nalazima drugih istraživača. Zatim su se oslonili na teoriju kritičnih opsega, već razrađenu i kvantifikovanu u radu Zwicker-a, Flottorp-a i Stevens-a [116]. Uz pomoć navedenih saznanja izvedena je kriva disonantnosti koja se od tada koristi kao polazna pretpostavka kada se govori o proceni disonantnosti intervala. Pomenuta kriva disonantnosti odnosi se na dva prosta (sinusna) tona jednakih amplituda, gde se disonantnost posmatra u funkciji razlike frekvencija dva tona. U kasnijim radovima kriva je dodatno parametrizovana, odnosno izvedeni su analitički izrazi koji proističu iz oblika krive, a pogodniji su za dalja istraživanja i praktičnu primenu [117], [118].

U okviru istraživanja doktorske disertacije, gde je bila potrebna matematička formalizacija, korišćen je izraz iz rada Sethares-a za izračunavanje koeficijenta disonantnosti D_{uk} za dva tona sa relativnim pomakom osnovnih frekvencija α (osnovna frekvencija drugog tona je α puta veća u odnosu na osnovnu frekvenciju prvog tona) [117]. Oba tona modelovana su kao nizovi od N parcijala. Te je tako kriva disonantnosti definisana kao:

$$D_{uk}\left(f_0,\alpha\right)=D_1+D_2+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}d\left(f_{1i},f_{2j},v_{1i},v_{2j}\right), \qquad 7.5$$

gde je f_{lk} frekvencija parcijala k tona l, v_{lk} mera amplitude parcijala k tona l, a D_1 i D_2 su koeficijenti disonantnosti koji potiču samo od parcijala jednog tona, odnosno prvog i drugog respektivno. Koeficijenti disonantnosti dati su sledećim izrazom:

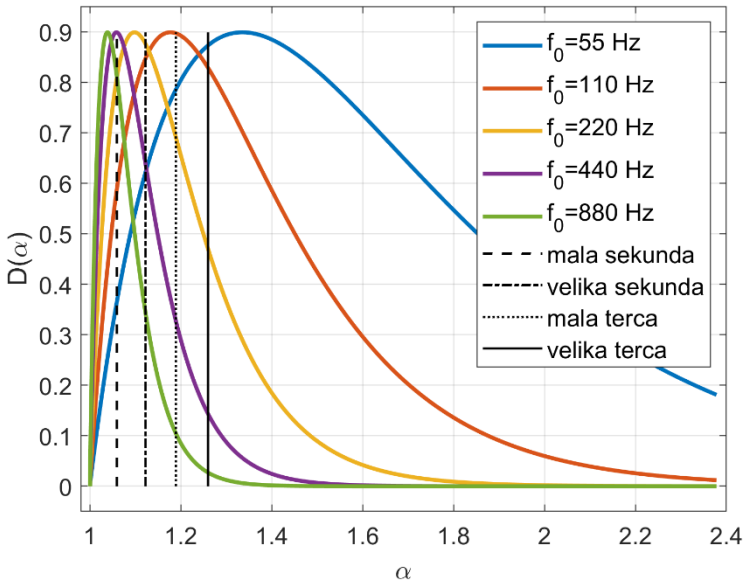
$$D_l=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}d\left(f_{li},f_{lj},v_{li},v_{lj}\right),\ l=1,2. \qquad 7.6$$

Da bi se ustanovio oblik funkcije d koja figuriše u okviru dvostruke sume date izrazom 7.5, Seathers je izveo izraz aproksimacijom krive disonantnosti date u radu Plomp-a [13], polazeći od modela $d\left(\theta\right)=e^{-a\theta}-e^{-b\theta}$. Te tako oblik funkcije d se može predstaviti kao:

$$\begin{aligned} &d\left(f_1,f_2,v_1,v_2\right)=v_{12}\left(e^{-as\left(f_2-f_1\right)}-e^{-bs\left(f_2-f_1\right)}\right),\\ &a=3.5,\ b=5.75,\ s=\frac{d^*}{s_1f_1+s_2},\ d^*=0.24,\ s_1=0.021,\ s_2=19, \end{aligned} \qquad 7.7$$

gde je $v_{12}=v_1\cdot v_2$ ili $v_{12}=\min(v_1,v_2)$. Pitanje skalirajućeg faktora v_{12} predstavlja jedan od izazova koji još uvek nije egzaktno razrešen. U okviru objektivizacije disonantnosti intervala sprovedene analize korišćen je skalirajući faktor $v_{12}=\min(v_1,v_2)$.

Na osnovu pretpostavljenog modela može se zaključiti da na krivu disonantnosti utiče osnovna frekvencija nižeg tona, broj parcijala, amplituda parcijala, kao i frekvencijski sadržaj u kontekstu tačne pozicije parcijala. Imajući u vidu da je kod žičanih muzičkih instrumenata inharmoničnost izražena, pozicije parcijala tada zavise i od koeficijenta inharmoničnosti B. Kao direktna posledica, odnos između frekvencija odgovarajućih parova parcijala dva tona više nije jednak odnosu osnovnih frekvencija. Stoga, ispitivan je uticaj osnovne frekvencije nižeg tona, broja parcijala N i koeficijenta inharmoničnosti B na izgled krive disonantnosti.

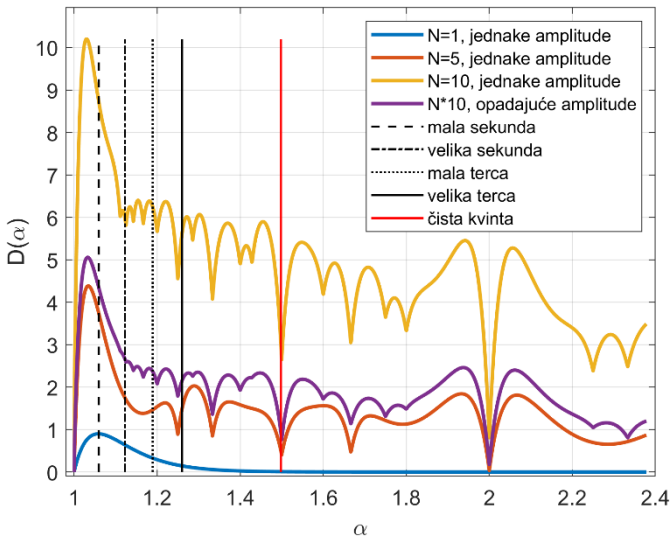


Slika 7.2 Kriva disonantnosti $D(\alpha)$ za različite frekvencije f_0 višeg tona

Na slici 7.2 prikazana je kriva disonantnosti za 5 različitih vrednosti osnovne frekvencije f_0 nižeg tona intervala. Krive su formirane prema Plomp-ovom modelu za dva prosta sinusna tona, gde niži ton ima frekvenciju f_0, a frekvencija višeg sinusnog tona se menja u rasponu od α=1 do α=2.2. Sinusni tonovi su jednakih jediničnih amplituda. Karakteristično je da svih 5 krivi imaju minimalnu vrednost u koordinatnom početku koji odgovara unisonom intervalu. S obzirom da se razmatra kriva

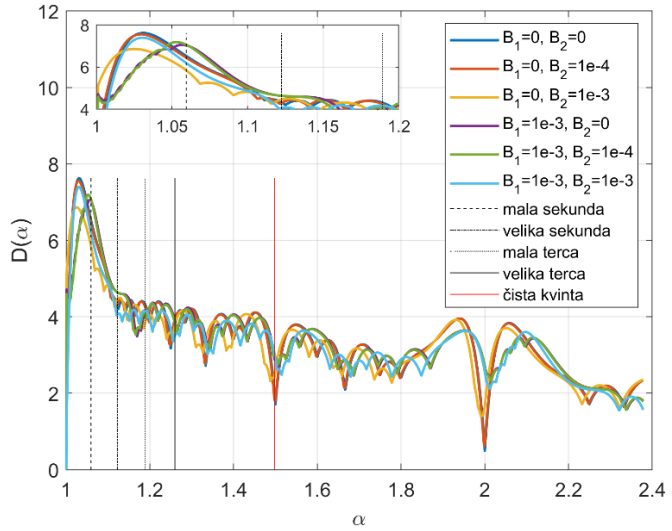
disonantnosti minimalna vrednost ostvarena pri unisonu označava da je to maksimalna ostvarena vrednost konsonantnosti intervala. Zatim svih 5 krivih imaju nagli rast koji označava maksimum disonantnosti. Glavna razlika je u brzini opadanja krivih nakon maksimuma disonantnosti, kao i u širini, odnosno „zaobljenosti“ krivih. Sa porastom frekvencije tona kriva disonantnosti se sužava i brže opada. Takođe, sa slike 7.2 može se uočiti da promena frekvencije tona utiče na pozicije maksimuma krivih u odnosu na pomak α. Vertikalna isprekidana linija koja odgovara intervalu male sekunde, nalazi se tačno na maksimumu krive koja odgovara frekvenciji f_0=440Hz, što implicira da pri frekvenciji od 440 Hz mala sekunda predstavlja najdisonantniji interval. Poređenjem gde vertikalna isprekidana linija koja odgovara maloj sekundi preseca krive određene nižim frekvencijama odnosno 220, 110 i 55 Hz, uočava se da sa smanjenjem frekvencije smanjuje se i stepen disonantnosti male sekunde. U slučaju male i velike terce situacija je obrnuta. Praćenjem preseka vertikalnih krivih koje odgovaraju maloj i velikoj terci uočava se da je velika terca najdisonantnija u slučaju kada je frekvencija tona 55 Hz, i kako se frekvencija povećava velika terca postaje sve konsonantniji ton. Na primeru male terce ponašanje je isto izuzev toga što je mala terca najdisonantnija u slučaju kada je frekvencija tona 110 Hz. Rezultati ukazuju na to da se sa porastom f_0 sužava zona maksimalne interferencije i samim tim isti interval nema istu vrednost na disonantnoj krivoj u različitim frekvencijskim registrima. U skladu s tim, normalizacijom x-ose širinom kritičnog opsega (računatom za svaku posmatranu vrednosti f_0) dovodi do poklapanja svih krivih i jedinstvene forme prikazane u literaturi [13].

Na slici 7.3 prikazana je kriva disonantnosti $D(\alpha)$ dobijena za različit broj parcijala N. Krive su formirane tako što je i nižem i višem tonu pridružen određen broj parcijala amplituda jednakih amplitudama osnovne frekvencije. Slučaj kada je broj parcijala 1, odnosno kada se ton smatra prostom sinusnom komponentom, predstavlja glatku disonantu krivu sa maksimumom disonantnosti pozicioniranim na intervalu male sekunde. U poređenju sa plavom (N=1) krivom, narandžasta (N=5) i žuta (N=10) kriva poseduju izražene lokalne minimume i maksimume. Za razliku od disonantne krive kada se posmatra samo jedna frekvencija, krive nastale sa većim brojem parcijala nakon maksimalnog vrha nemaju monotoni pad, već se odlikuju lokalnim pregibima. To govori u prilog tome, da se povećanjem komponenti koje interaguju u procesu slušanja i percepcija disonantnosti, odnosno konsonantnosti, usložnjava. Bitno je napomenuti da su i narandžasta i žuta kriva nastale pri parcijalima koji su bili iste amplitude, što znači da su sa istim stepenom važnosti učestvovali u formiranju krive disonantnosti. Da bi se teorijski model približio realnim tonovima formiran je niz od 10 parcijala kod kojih amplitude nisu jednake već imaju implementirane linearno opadajuće amplitude, time imitirajući spektralne obvojnice realnih instrumenata. Ljubičasta kriva prikazana na slici 7.3 nastala je sa 10 parcijala opadajućih amplituda. Poređenjem žute i ljubičaste krive disonantnosti može se uočiti uticaj amplituda parcijala na krivu disonantnosti. Uvođenjem opadajućih amplituda ukupna disonantnost se smanjuje, lokalni pregibi koji se javljaju kako između velike sekunde i male terce, tako i između velike terce i čiste kvinte, se ublažavaju u odnosu na slučaj kada u krivu disonantnosti ulaze parcijali jednakih amplituda. Globalni minimumi koji odgovaraju konsonantnim intervalima poput velike terce, čiste kvinte, velike sekste i oktave, i dalje su izraženi. Rezultati ove analize ukazuju da broj parcijala kao i opadajuće amplitude koje ulaze u proračun krive disonantnosti predstavljaju ključne kontrolne parametre teorijske disonantnosti. Odnosno, povećanjem broja parcijala povećava se broj parcijala koji međusobno interaguju a samim tim i izraženost lokalnih pregiba krive disonantnosti, dok nejednake opadajuće amplitude parcijala doprinose smanjenju ukupnu disonantnost i izraženost lokalnih pregiba.



Slika 7.3 Kriva disonantnosti $D(\alpha)$ za različit broj parcijala N

Na slici 7.4 prikazan je uticaj inharmoničnosti na krivu disonantnosti D(α) kroz različite kombinacije koeficijenta inharmoničnosti B_1 i B_2, pri čemu su ostali parametri poput osnovne frekvencije f_0, broja parcijala N i amplitude parcijala bili isti za oba tona. Nizovi parcijala za niži i viši ton koji čine interval, formirani su u skladu sa pripadajućim koeficijentima inharmoničnosti, pri čemu se za niži ton koristi B_1, a za viši B_2. Referentna kriva predstavlja slučaj kada je B_1=B_2=0, odnosno kada oba tona predstavljaju harmonijski niz (plava boja krive). U tom slučaju formiraju se jasni globalni minimumi na mestima karakterističnim za konsonantne intervale (velika terca, čista kvinta, mala seksta i oktava), uz globalni maksimum koji se nalazi između unisona i male sekunde. Narandžasta kriva predstavlja slučaj kada prvi ton predstavlja harmonijski niz (B_1=0), a drugi ton poseduje malu vrednost koeficijenta inharmoničnosti (B_2=10^{-4}). Uvođenjem koeficijenta inharmoničnosti u analizu disonantnosti, dolazi do pomeraja frekvencija parcijala čime se narušava idealna koincidencija parcijala (koja postoji u referentnom slučaju) i povećava se verovatnoća preklapanja parcijala u kritičnim opsezima. Međutim u slučaju kada je koeficijent inharmoničnosti drugog tona male vrednosti, takvi pomeraji ne daju značajne promene u okviru krive disonantnosti. Kao što se i sa slike 7.4 može uočiti trend plave, referente krive i narandžaste krive je isti pri čemu se razlikuje samo vrednost disonantnosti. Situacija je drugačija za slučaj kada je prvi ton harmonijski niz (B_1=0), a drugi ton ima izražen koeficijent inharmoničnosti (B_2=10^{-3}). Pomenuti slučaj predstavljen je žutom krivom i na osnovu slike se vidi da se trend krive disonantnosti ne poklapa ni sa jednim slučajem. Globalni minimumi koji odgovaraju konsonatnim intervalima u ovom slučaju pomereni su ulevo u odnosu na globalne minimume kako referente, tako i ostalih krivih.



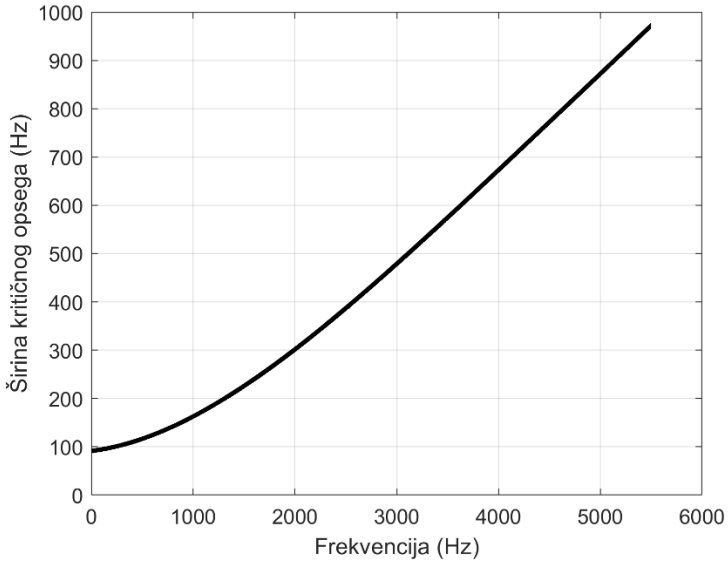
Slika 7.4 Kriva disonantnosti $D(\alpha)$ za različite vrednosti koeficijenta inharmoničnosti B

Ljubičasta kriva odgovara situaciji u ogledalu žute krive, odnosno u ovoj konstelaciji prvi ton ima izraženu inharmoničnosti (B_1=10^{-3}), dok je drugi ton bez inharmoničnosti (B_2=0). Iako su vrednosti koeficijenta inharmoničnosti iste, krive se u ova dva slučaja ne ponašaju isto. Ljubičasta kriva disonantnosti se takođe ne poklapa sa referentnom krivom, međutim njeni globalni minimumi koji odgovaraju konsonantnim intervalima su u ovom slučaju pomereni u desno od globalnog minimuma referentne krive. Takođe, mera konsonantnosti ljubičaste krive u slučajevima velike terce, čiste kvarte i kvinte i oktave manja je u odnosu na referentni slučaj. Maksimum disonantnosti ljubičaste krive je takođe pomeren u desno u odnosu na referentnu krivu i odgovara maloj sekundi. Zelenom krivom predstavljen je slučaj kada je u oba tona prisutna inharmoničnost, gde je kod prvog tona koeficijent inharmoničnosti veliki (B_1=10^{-3}), dok je kod drugog tona koeficijent inharmoničnosti manje vrednosti (B_2=10^{-4}). Zbog toga što je koeficijent inharmoničnosti drugog tona male vrednosti, a koeficijent inharmoničnosti prvog tona je za red veličine veći, može se smatrati da drugi ton zapravo predstavlja harmonijski niz (kao u slučaju ljubičaste krive). Takva tvrdnja je opravdana jer se zelena i ljubičasta kriva praktično poklapaju, bez ikakve promene trenda krive disonantnosti. Poslednji slučaj je najdrastičniji i predstavlja antipod referentom slučaju. Tirkiznom krivom predstavljena je situacija kada krivu disonantnosti formiraju oba tona sa izraženom inharmoničnošću (B_1= B_2=10^{-3}). U ovom slučaju globalni maksimum, koji odgovara najvećoj disonantnosti, nalazi na istoj poziciji kao i globalni maksimum referentne krive, između unisona i male sekunde. Međutim, u daljem toku krive usled izražene inharmoničnosti, globalni minimumi, koji odgovaraju mestima najveće konsonantnosti, ne poklapaju se sa globalnim minimumima referentne krive, već prate globalne minimume ljubičaste i zelene krive. Glavni zaključak sprovedene analize jeste da izražena inharmoničnost ima uticaj na meru disonantnosti, odnosno konsonantnosti intervala, gde se pored pozicije globalnih minimuma i maksimuma menja i njihova izraženost. Manje vrednosti koeficijenta inharmoničnosti na osnovu ovog teorijskog modela nemaju značajni uticaj na krivu disonantnosti.

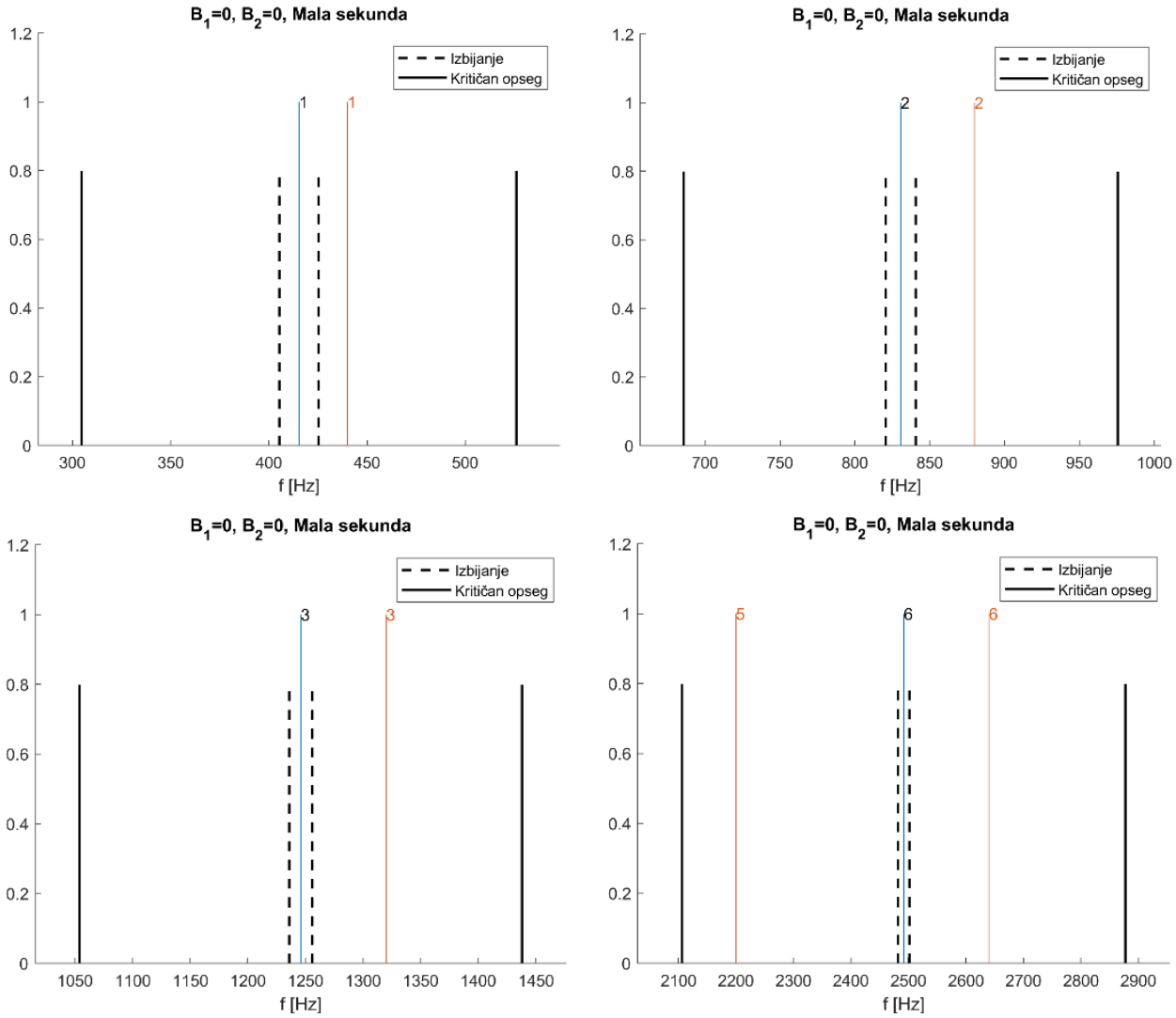
7.2.1.2 Kritični opsezi

Čulo sluha čoveka predstavlja kompleksan sistem. Jedan od aspekata tog sistema, koji je od interesa sa stanovišta ove doktorske disertacije, tiče se vibracija bazilarne membrane. Kada se bazilarna membrana pobudi jednom frekvencijom, raspodela intenziteta vibracija bazilarne membrane u tom slučaju ima jedan maksimum koji diktira frekvencija pobude. Pored toga, receptorske ćelije vrše analizu vibracija bazilarne membrane. S obzirom da duž membrane postoji ograničeni broj receptorskih ćelija čulo sluha ima izvesna ograničenja u rezoluciji vibracija bazilarne membrane, a samim tim i frekvencijska ograničenja u detekciji maksimuma [119]. Opisana specifična selektivnost čula sluha uvodi pojam kritičnog opsega. Pod tim se podrazumeva širina frekvencijskog opsega u kome se dve frekvencijski bliske pobude na bazilarnoj membrani ne mogu potpuno razdvojiti kao dve nezavisne pobude. Ako dva tona istovremeno deluju na uvo i imaju istu frekvenciju, oni se stapaju u jedinstven proces na bazilarnoj membrani i jedinstven doživljaj jednog tona. Ako se frekvencija jednog od ta dva tona menja potrebno je napraviti frekvencijski pomak koji je veći od neke granice da bi se jasno percepiralo prisustvo dva nezavisna tona, odnosno da se frekvencije signala ne nalaze u istom kritičnom opsegu [119]. Međutim, poimanje percepcije dve bliske frekvencije unutar kritičnog opsega nije tako jednostavno. Kritični opseg je strukturiran u nekoliko podopsega s različitim uticajem na percepciju komponenti koje mu pripadaju. Ukoliko je razlika frekvencija dva prosta sinusna tona Δf manja od 10 Hz, smatra se da se te dve frekvencije nalaze u opsegu izbijanja (eng. *beating*). U tom opsegu zvuk dve frekvencije se percipira kao jedan ton sa sinusnom obvojnicom, promenljive amplitude koja se menja u ritmu razlike frekvencija dve komponente [120]. Situacija kada se dve proste sinusne komponente nalaze u opsegu izbijanja, odgovara početnom delu krive disonantnosti, između unisona i globalnog maksimuma. Sa daljim povećanjem frekvencijske razlike Δf, frekvencija izbijanja se povećava, samim tim percepcija izbijanja se gubi, a zbir dva tona prelazi u zonu maksimalne disonantnosti. Opisana zona se u literaturi naziva, zona hrapavosti (eng. *roughness*) ili neprijatnosti (eng. *unpleasantness*), prema senzacijama do kojih dovodi u čulu sluha [120]. Na kraju kada frekvencijska razlika Δf postane veća od kritičnog opsega, senzacija hrapavosti prelazi u gladak (eng. *smooth*) i prijatan (eng. *pleasent*) zvuk. Takođe, kritičan opseg ne predstavlja

frekvencijski opseg koji je fiksne širine, već raste sa porastom frekvencija. Na osnovu konkretnih vrednosti širina kritičnih opsega za pobude različitih frekvencija koje su prikazane u radu Zwicker-a i saradnika, a Bernini je izveo analitički izraz [116], [118]. Prema Bernini-jevoj aproksimaciji sračunata je zavisnost širine kritičnog opsega od frekvencije signala i prikazana na slici 7.5.

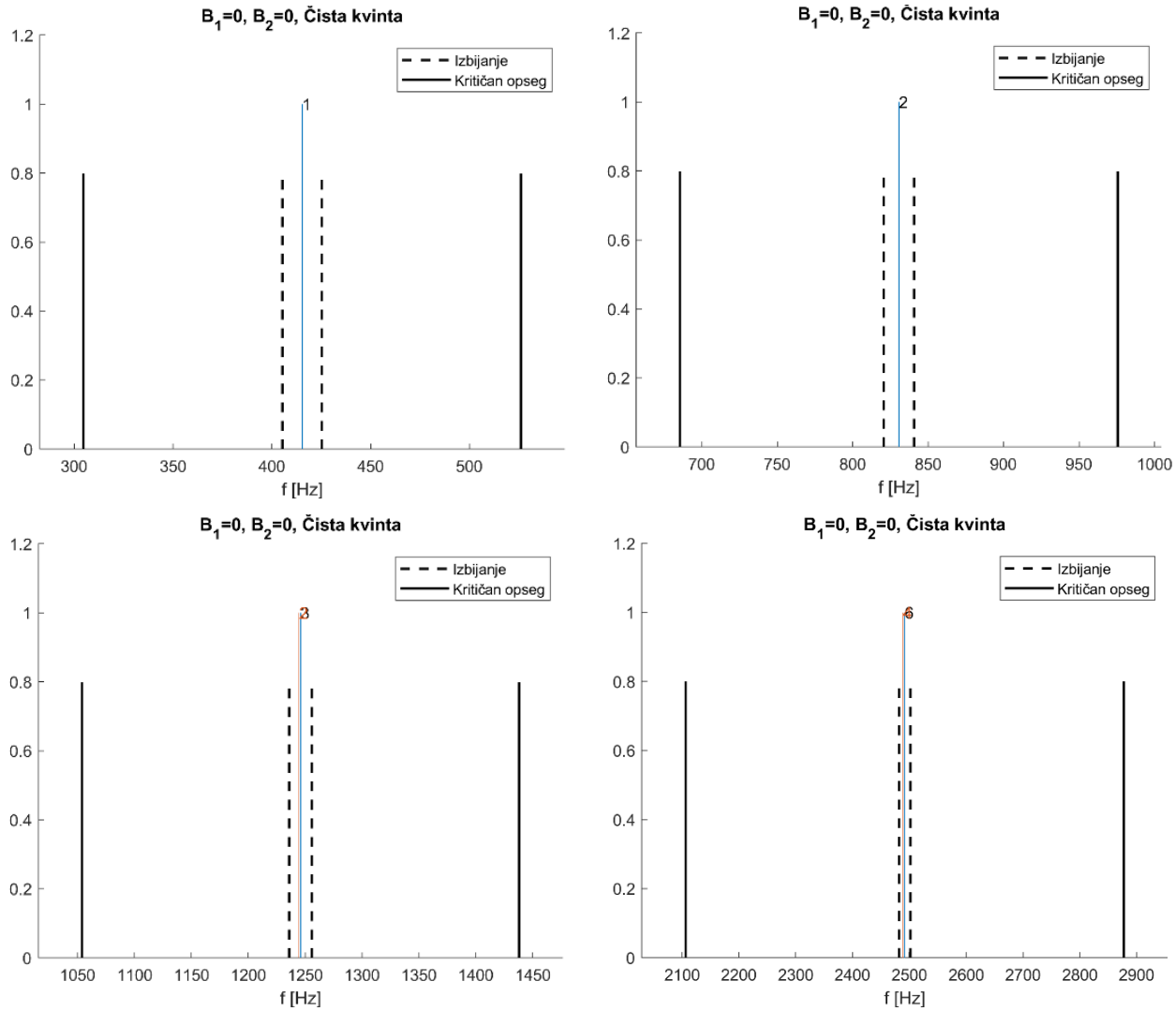


Slika 7.5 Zavisnost širine kritičnog opsega u odnosu na frekvenciju pobudnog signala



Slika 7.6 Prikaz prvog, drugog, trećeg i šestog parcijala oba tona male sekunde unutar kritičnih opsega

Posmatrajući interakciju dva složena tona, koja se sastoje od određenog broja parcijala i zajedno formiraju interval, potencijalni broj parcijala čije kombinovanje doprinosi disonantnosti je relativno veliki. Broj kombinacija je veliki jer treba uzeti u obzir da svaki parcijal jednog tona može da stupa u interakciju kako sa parcijalima istog tona, tako i sa parcijalima drugog tona. Čak i u slučaju da se posmatraju kombinacije u okviru istog tona bez prisustva inharmoničnosti, može se desiti da se viši parcijali nađu u istom kritičnom opsegu. Zarad ilustracije ovog fenomena na slikama 7.6 i 7.7 su prikazane neke moguće situacije do kojih dolazi kod male sekunde i čiste kvinte. Na obe slike prikazani su opsezi izbijanja i kritični opsezi u okolini prvog, drugog, trećeg i šestog parcijala. Slike su formirane tako da u slučaju oba intervala frekvencija nižeg tona odgovara tonu As4. Takođe, u ovom primeru smatra se da oba tona koja čine interval ne poseduju inharmoničnost (B_1=B_2=0).

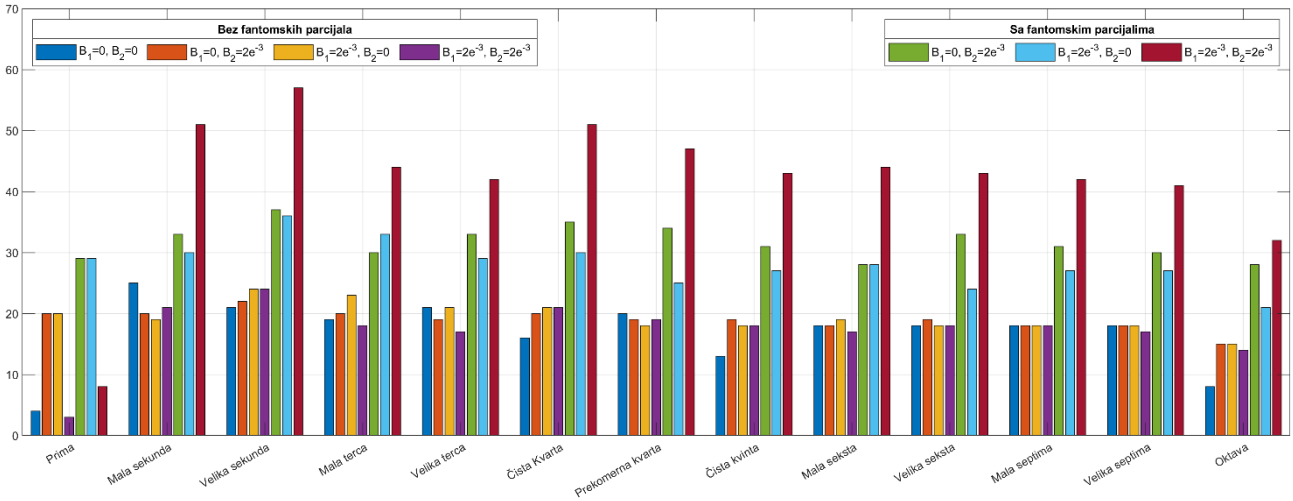


Slika 7.7 Prikaz prvog, drugog, trećeg i šestog parcijala oba tona čiste kvinte unutar kritičnih opsega

Na osnovu slike 7.6 uočava se da kod male sekunde, prvi, drugi i treći parcijali oba tona upadaju u njima pripadajuće kritične opsege. Dok u okviru kritičnog opsega koji odgovara šestom parcijalu prvog tona, pored šestog parcijala drugog tona nalazi se i peti parcijal drugog tona, što dodatno doprinosi disonantnosti. Na osnovu slike 7.7 uočava se da, u slučaju čiste kvinte, prvi i drugi parcijal nižeg tona se nalaze sami u okviru pripadajućeg kritičnog opsega, za razliku od prvog i drugog parcijala male sekunde. Međutim, u okviru kritičnog opsega i opsega izbijanja trećeg parcijala nižeg tona nalazi se i drugi parcijal višeg tona. Ovakva situacija mogla bi da bude kompromitujuća za senzaciju konsonantnosti čiste kvinte, međutim treći parcijal nižeg tona i drugi parcijal višeg tona se poklapaju samim tim ne dolazi do izbijanja. Isti slučaj je prisutan i za šesti parcijal nižeg tona, koji se u okviru svog kritičnog opsega poklapa sa četvrtim parcijalom višeg tona čiste kvinte. Imajući u

vidu prikazani koncept kritičnog opsega, opsega izbijanja i pozicioniranja parcijala intervala unutar njih, na intervalima male sekunde i čiste kvinte, moguće je lakše razumeti krivu disonantnosti i zašto se neki intervali percipiraju kao konsonantni, a neki kao disonantni.

Analiza sprovedena slikama 7.6 i 7.7 govori o specifičnim situacijama, o jednom disonantnom i jednom konsonantnom intervalu (mala sekunda i čista kvinta), gde su tonovi koji ih formiraju posmatrani bez prisustva inharmoničnosti. Radi sagledavanja uticaja inharmoničnosti na disonantnost intervala u opštem slučaju, napravljen je pregled za sve intervale u okviru jedne oktave, pri čemu je niži ton fiksiran kao As4. U svim slučajevima amplitude parcijala su jednake. Koeficijent inharmoničnosti tonova variran je tako da je imao ili vrednost 0 ili $2\cdot10^{-3}$. Sa te dve vrednosti, napravljene su četiri kombinacije s obzirom da se analizom sprovedenom pomoću krivih disonantnosti pokazalo da je redosled bitan. Odnosno da se ne ponašaju isto intervali kada niži ton ima koeficijent inharmoničnosti $2\cdot10^{-3}$, a viši ton nema inharmoničnost, i kada niži ton nema inharmoničnost, a viši ton ima koeficijent inharmoničnosti $2\cdot10^{-3}$. Takođe, u poglavlju 2 ove disertacije pokazano je da su posledica inharmoničnosti žičanih muzičkih instrumenata fantomski parcijali, stoga su formirane i varijante u kojima se oni eksplicitno uvažavaju. Kako bi se ispitao i uticaj fantomskih parcijala na disonantnost intervala, napravljene su još tri kombinacije tonova sa vrednostima B iz skupa 0 i $2\cdot10^{-3}$. Pretpostavljeno je da svaki ton ima 4 fantomska parcijala koji se nalaze u zonama 4., 5., 6. i 7. inharmoničnog parcijala. Na osnovu svih navedenih promenljivih, posmatraju i prebrojavaju se parovi parcijala koji se nalaze u okviru istog kritičnog opsega. Na slici 7.8 prikazani su rezultati opisane analize.



Slika 7.8 Broj parova parcijala koji pripadaju istom kritičnom opsegu za intervale unutar jedne oktave

Analiza broja parova sa slike 7.8, posmatrana iz ugla inharmoničnosti (slučajevi bez fantomskih parcijala), ne pokazuje jasnu pravilnost koja bi se dosledno primenila na sve intervale unutar jedne oktave. Takav ishod je očekivan budući da inharmoničnost dovodi do frekvencijskog pomeranja opjedinih parcijala tako da jedini dospevaju u kritični opseg sledećeg parcijala, dok drugi iz njega izlaze. Ilustrativan primer ove fluktuacije uočava se kod male i velike terce. Iako se oba intervala smatraju nesavršenim konsonancama i stoga je očekivan manji broj parova parcijala unutar istog kritičnog opsega, moglo bi se pretpostaviti da će konsonantnost biti veća kada su oba tona bez inharmoničnosti u odnosu na slučaj izražene inharmoničnosti (B_1=B_2=$2\cdot10^{-3}$). Međutim, to nije slučaj. U odsustvu inharmoničnosti broj parova iznosi 19(mala terca), odnosno 21(velika terca), dok uvođenjem inharmoničnosti opada na 18(mala terca) i 17(velika terca). Zbog pregrupisavanja parcijala usled inharmoničnosti deo parova napušta kritične opsege, pa se pokazuje da je velika terca sastavljena od inharmoničnih tonova konsonantnija od odgovarajuće terce bez inharmoničnosti. U slučaju ostalih intervala, sprega između inharmoničnosti i broja parova parcijala unutar kritičnog opsega podleže očekivanim obrascima. Oktava, kao savršena konsonanca, izdvojena je sa najmanjim brojem parova (15), što je u skladu sa minimalnom interferencijom u okviru kritičnog opsega. Kod

nesavršenih konsonanci (mala i velika terca) broj parova je manji nego kod disonanci, tipično oko 18, ali podložan opisanim fluktuacijama usled inharmoničnosti. Nasuprot tome, u zoni disonanci mala i velika sekunda beleže najveći broj parova (24), što korespondira maksimumima krive disonantnosti i povećanoj perceptivnoj „grubosti“ (*roughness*). Konačno, intervali poput velike sekste, male septime i velike septime prirodno imaju veće razmake između parcijala, pa varijacije koeficijenta inharmoničnosti ne dovode do promena u broju parova unutar kritičnog opsega.

Poredeći situaciju kada su u analizu uključeni i fantomski parcijali, brojevi parcijala unutar kritičnog opsega se značajno povećao. Takođe, poređenjem istih kombinacija koeficijenata inharmoničnosti sa i bez fantomskih parcijala unutar jednog intervala, uočava se da broj komponenti koje doprinose disonantnosti poraste i više nego duplo. Na primer, za slučaj velike sekunde kada je $B_1=B_2=10^{-3}$, broj parova parcijala u slučaju kada nisu uračunati fantomski parcijali je 24, dok sa uračunatim fantomskim parcijalima broj parova ide do 57. Najveći doprinos disonantnosti intervala donosi slučaj kada su uključeni fantomski parcijali i kada u tonovima postoji izražena inharmoničnost.

7.2.2. Subjektivni test

Polazeći od preliminarnih rezultata objektivne karakterizacije intervala, definisan je koncept subjektivnog testa čiji je cilj da ispita uticaj inharmoničnosti na percepciju disonantnosti intervala. Teorijski modeli krivih disonantnosti za složene tonove ukazuju da svaka dodatna tonska komponenta može u manjoj ili većoj meri, uticati na povećanje disonantnosti. U tom smislu, inharmoničnost deluje posredno jer generiše fantomske parcijale kao spektralne artefakte, čime se uvećava broj potencijalno interagujućih komponenti. Međutim, nije presudan samo njihov broj već i način na koji su energetski raspodeljeni parcijali. Ključnu ulogu u tome ima spektralna obvojnica [121]. Povećanjem kritičnog opsega sa porastom frekvencije, u slučaju intervala sačinjenih od realnih tonova, dolazi do grupisanja komponenti oko viših parcijala što direktno dovodi do toga da se veći broj komponenti oba tona nađe unutar istog kritičnog opsega. Imajući to u vidu, ukoliko je spektralna obvojnica instrumenta takva da favorizuje više komponente u spektru, disonantnost intervala odsviranih na tim instrumentima biće veća. Dodatno, ranija istraživanja obrađena u literaturi, pokazala su da inharmoničnost utiče i na percepciju visine tona [7], [8], [18]. Na toj osnovi postavlja se glavno pitanje subjektivnog testa: Da li inharmoničnosti, sama po sebi i nezavisno od ostalih faktora, neposredno utiče na doživljaj disonantnosti intervala?

7.2.2.1 Formiranje seta stimulusa za subjektivni test

U ovom potpoglavlju definiše se skup stimulusa za subjektivnu evaluaciju uticaja inharmoničnosti na percepciju disonantnosti intervala. Kao stimulusi izabrani su tonovi harfe i čembala, sa ciljem proširivanja saznanja o disonantnosti intervala van domena klavira. Takođe, harfa i čembalo su izabrani kao antipodi, jer se razlikuju u broju izraženih parcijala i spektralnim obvojnicama.

S obzirom da se celokupno istraživanje bazira na temperovanoj skali i postulatima Zapadne muzičke kulture, broj mogućih intervala unutar oktave je 12. Ukoliko bi želeli da skup stimulusa za subjektivnu evaluaciju čine svi intervali unutar oktave za koje bi se varirao koeficijent inharmoničnosti u nekoliko kombinacija, takav test bi imao previše stimulusa za slušanje i uticao bi na slušalački zamor ispitanika. S tim u vezi ideja je izabrati predstavnike najdisonantnijih intervala u okviru oktave i predstavnike konsonantnih intervala. Na osnovu krive disonantnosti, njenog globalnog maksimuma i lokalnih pregiba, kao i analize sprovedene o broju parova parcijala unutar kritičnog opsega, pokazano je da su najdisonantniji intervali mala i velika sekunda. Vodeći se istom logikom, najkonsonantniji intervali su oktava i čista kvinta. Međutim, kao predstavnici konsonantnih intervala u ovom subjektivnom testu izabrani su mala i velika terca, jer na osnovu objektivne analize pokazano je da izražena inharmoničnost neće značajno uticati na doživljaj savršenih konsonanci (oktava i čista kvinta). Osnovni, niži ton intervala za sve stimuluse je ton As4 za koji je u prethodnom poglavlju sprovedena objektivna analiza. Ton As4 je izabran između ostalog, jer se nalazi u sredini registara žičanih muzičkih instrumenata. Odabir tona iz nižeg frekvencijskog opsega ne bi bio odgovarajući za

ovakav vid testa, jer iako se odlikuju velikim brojem parcijala (što direktno vodi ka povećanju disonantnosti), vrednost koeficijenta inharmoničnosti B takvih tonova je mala. Sa druge strane, ni tonovi iz višeg frekvencijskog opsega ne predstavljaju reprezentativan uzorak za test. Iako tonovi viših frekvencija imaju veću vrednost koeficijenta inharmoničnosti, zbog manjeg broja izraženih parcijala, perceptivni uticaj inharmoničnosti nije dominantan [27]. Te je izabrana osnovna frekvencija nižeg tona intervala u setu stimulusa f_0=415.3 Hz, dok su frekvencije viših tonova intervala date u Tabeli 7.5. U Tabeli 7.5 pored frekvencija koje čine malu/veliku sekundu i tercu, nalaze se i frekvencije koje bi činile intervale koji se nalaze između intervala temperovane skale. Dodati intervali su uključeni da bi simulirali kontinualnu podelu po frekvenciji, kao što se podrazumeva pri proračunu teorijskih krivih.

Tabela 7.5 Frekvencije viših tonova intervala za set stimulusa subjektivnog testa

Redni broj intervala	**f_{20} [Hz]**	**Interval u temperovanoj skali**
1	427.5	
2	433.7	
3	440.0	Mala sekunda
4	446.4	
5	452.9	
6	459.5	
7	466.2	Velika sekunda
8	472.9	
9	479.8	
10	486.8	
11	493.9	Mala terca
12	501.1	
13	508.4	
14	515.7	
15	523.3	Velika terca
16	530.9	

Stimulusi intervala sintetisani su tako da su varirane dve vrednosti koeficijenta inharmoničnosti, 0 (odnosno bez inharmoničnosti) i $2\cdot10^{-3}$. Za sve kombinacije stimulusa osnovni niži ton intervala uvek je imao vrednost B=0, dok je koeficijent inharmoničnosti višeg tona variran iz skupa $B\epsilon\{0.2\cdot10^{-3}\}$ Konačni set stimulusa za eksperiment je pripremljen u četiri grupe. Prva i druga grupa intervala su sintetisani od tonova harfe, gde se u prvoj grupi nalaze intervali za slučaj kada oba tona nemaju prisutnu inharmoničnost B_1=B_2=0, dok se u drugoj grupi nalaze intervali za slučaj kada viši ton ima izražen koeficijent inharmoničnosti B_2=$2\cdot10^{-3}$. Po istom principu formirane su i treća i četvrta grupa za tonove čembala. Tonovi harfe sintetisani su sa 20 parcijala, dok su tonovi čembala sintetisani sa 15. Iako tonovi čembala imaju mnogo veći broj parcijala, broj od 15 parcijala je izabran kako bi se izbegao deo spektra sa fantomskim parcijalima. Podaci o sintetisanim stimulusima za sve četiri grupe prikazani su u Tabeli 7.6.

Tabela 7.6 Parametri sintetisanih stimulusa

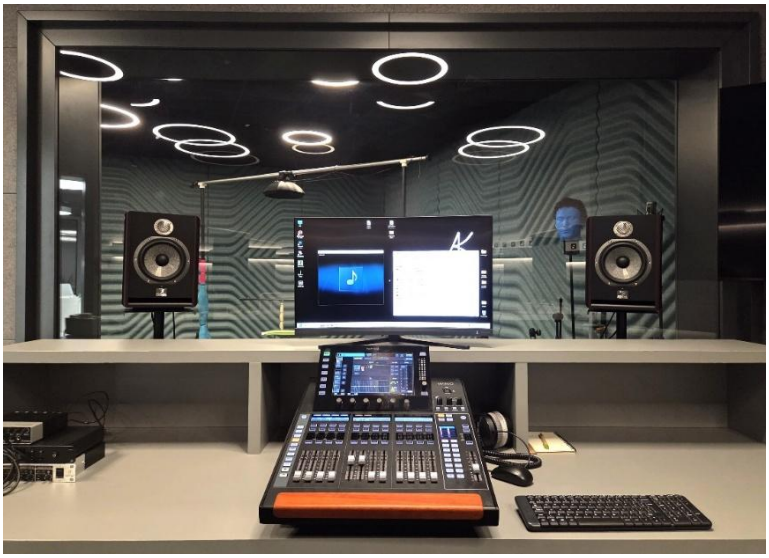
Grupa	**Instrument**	**Broj parcijala**	**Koeficijenti inharmoničnosti**
1	Harfa	20	B_1=0, B_2=0
2	Harfa	20	B_1=0, B_2=2e-3
3	Čembalo	15	B_1=0, B_2=0
4	Čembalo	15	B_1=0, B_2=2e-3

Stimulusi intervala su formirani istovremenom sintezom oba tona. Sinteza na osnovu koje su sintetisani pojedinačni tonovi intervala realizovana je kao varijanta 4 sinteze koja je ocenjena kao najprirodnija subjektivnim testom opisanim u poglavlju 7.1.

7.2.2.2 Procedura i učesnici subjektivnog testa

Testiranje je podeljeno u četiri nezavisna testa oformljena na osnovu četiri grupe stimulusa opisane u prethodnom poglavlju. Prva dva testa odnosila su se analogno na prve dve grupe stimulusa, gde su stimulusi predstavljali intervale formirane od tonova harfe. Druga dva testa odnosila su se na treću i četvrtu grupu stimulusa, gde su stimulusi predstavljali intervale formirane od tonova čembala. Svaki od testova sadržao je po 16 stimulusa intervala. Zadatak ispitanika u svakom testu bio je da rangira 16 stimulusa na osnovu disonantnosti. Rangiranje je trebalo formirati od najdisonantnijeg do najkonsonantnijeg. S tim u vezi broj 1 treba da predstavlja najdisonantniji interval, a broj 16 treba da odgovara najkonsonantnijem intervalu. Ispitanici nisu imali vremensko ograničenje za realizaciju testova i mogli su proizvoljan broj puta da reprodukuju intervale koji se nalaze u testu.

U testiranju je učestvovalo 12 ispitanika, starosne dobi od 20 do 27 godina. Svi subjekti su imali formalno muzičko obrazovanje, odnosno diplomirali su ili trenutno studiraju na muzičkoj akademiji. Subjekti su se školovali za različite instrumente: klavir, violinu, klasičnu gitaru, violončelo i obou. Jedan ispitanik završio je kompoziciju, jedan muzičku produkciju i jedan teorijski odsek. Subjekti su izabrani tako da imaju obrazovanje na različitim instrumentima kako bi se izbegla eventualna pristrasnost u testiranju povezana sa nekim instrumentom. S obzirom da je cilj testa rangiranje intervala od najdisonantnijeg ka najkonsonantnijem, izabrani su samo ispitanici koji poseduju formalno muzičko obrazovanje. Za ispitanike bez formalnog muzičkog obrazovanja postavka subjektivnog testa bi morala biti drugačija, s obzirom da nisu upoznati sa pojmovima konsonance i disonance. Subjektivno testiranje je izvršeno u muzičkoj režiji Centra za 3D zvuk u Palati Nauke. Ispitanici su slušali u kontrolisanim i za sve jednakim uslovima. Zarad uticaja na kvalitet zvuka samih signala njihova reprodukcija je omogućena uz Beringer Wing Compact digitalnu audio miksetu [122] i Focal Solo6 monitorske zvučnike [123]. S obzirom da nivo signala ne utiče na rezultate subjektivnog testiranja ove vrste, ispitanici su imali slobodu da po sopstvenom nahođenju prilagode nivo zvuka prilikom slušanja testa. Na slici 7.9. prikazana je postavka za subjektivno testiranje.



Slika 7.9 Postavka eksperimenta subjektivnog testa

7.2.2.3 Rezultati subjektivnog testa

S obzirom da realizovani subjektivni test predstavlja polaznu instancu istraživanja uticaja inharmoničnosti na percepciju disonantnosti, sa idejom proširivanja saznanja ka zbirnom uticaju inharmoničnosti i fantomskih parcijala na percepciju intervala, broj od 12 ispitanika nije dovoljan da bi se sprovela formalna statistička analiza kao u slučaju subjektivnog testa za ocenu prirodnosti

metoda sinteze (poglavlje 7.1). Imajući to u vidu rezultati svakog od četiri testa predstavljeni su matričnim prikazom. Matrica se sastoji od sledećih kolona: kolona u kojoj su naznačene frekvencije višeg tona intervala, kolona u kojoj se nalazi mera disonantnosti dobijena proračunom, i 12 kolona koje odgovaraju rezultatima ranga intervala svakog od 12 subjekata. Mera disonantnosti (kolona pod nazivom „Formula“) dobijena je numeričkim proračunom na osnovu formula 7.5 i 7.7, gde su podaci korišćeni u formulama predstavljali frekvencije i amplitude parcijala sintetisanih tonova. Subjekti su vršili rangiranje numerišući intervale rednim brojevima od 1 do 16, gde ocena 1 predstavlja najdisonantniji, a ocena 16 najkonsonantniji interval. Takođe, zarad lakšeg sagledavanja rezultata polja u matrici su obojena u gradijentnom valeru boja, počevši od crvene, ka narandžastoj, zatim žutoj i na kraju zelenoj, gde crvena boja odgovara najdisonantnijem, a zelena boja najkonsonantnijem intervalu. Na slikama od 7.10 do 7.13 prikazane su matrice rezultata za četiri sprovedena testa.

redni broj	interval	frekvencije	formula	Sub 01	Sub 02	Sub 03	Sub 04	Sub 05	Sub 06	Sub 07	Sub 08	Sub 09	Sub 10	Sub 11	Sub 12
1		427.5 Hz	0.9595	13	14	1	7	8	5	5	5	2	5	5	5
2		433.7 Hz	1.0934	10	3	2	4	6	3	2	1	1	1	4	1
3	mala sekunda	440 Hz	1.1048	2	2	3	3	4	1	1	2	3	6	3	13
4		446.4 Hz	1.0663	1	1	11	1	2	2	3	3	4	7	1	8
5		452.9 Hz	0.9846	3	4	4	5	1	4	4	4	5	4	2	4
6		459.5 Hz	0.8825	4	7	8	6	3	6	6	6	6	2	8	10
7	velika sekunda	466.2 Hz	0.7678	6	9	13	8	5	7	10	8	7	3	11	14
8		472.9 Hz	0.6705	5	8	9	9	7	9	7	7	8	10	9	3
9		479.8 Hz	0.5737	7	5	7	2	10	8	8	9	9	8	6	2
10		486.8 Hz	0.4861	9	11	12	10	16	15	11	10	11	9	7	11
11	mala terca	493.9 Hz	0.4159	8	10	14	11	14	10	9	15	10	16	12	15
12		501.1 Hz	0.3468	12	12	15	12	12	11	12	12	13	14	15	7
13		508.4 Hz	0.2903	11	13	5	13	11	12	13	11	12	11	10	6
14		515.7 Hz	0.2422	16	15	10	14	13	16	14	13	16	13	14	9
15	velika terca	523.3 Hz	0.2021	15	16	16	15	15	14	16	16	14	15	16	16
16		530.9 Hz	0.1720	14	6	6	16	9	13	15	14	15	12	13	12

Slika 7.10 Matrica rezultata za test stimulusa grupe 1 (Tonovi harfe, B_1=B_2=0)

redni broj	interval	frekvencije	formula	Sub 01	Sub 02	Sub 03	Sub 04	Sub 05	Sub 06	Sub 07	Sub 08	Sub 09	Sub 10	Sub 11	Sub 12
1		427.5 Hz	0.9516	12	5	4	10	8	6	5	1	1	6	5	3
2		433.7 Hz	1.0719	11	4	2	2	7	4	1	2	3	2	2	1
3	mala sekunda	440 Hz	1.0955	4	2	1	3	5	1	2	3	2	1	1	6
4		446.4 Hz	1.0452	2	1	3	1	6	2	3	4	4	5	3	2
5		452.9 Hz	0.9592	1	3	13	5	4	3	4	5	5	3	4	4
6		459.5 Hz	0.8606	3	6	8	4	3	5	6	7	6	4	9	8
7	velika sekunda	466.2 Hz	0.7501	7	7	7	7	1	7	7	6	7	8	10	7
8		472.9 Hz	0.6580	5	10	5	6	2	9	8	8	8	7	8	5
9		479.8 Hz	0.5633	6	8	6	8	11	13	9	9	9	9	7	9
10		486.8 Hz	0.4753	10	9	15	11	16	10	10	12	10	11	11	15
11	mala terca	493.9 Hz	0.4004	9	15	14	9	15	12	11	11	11	15	16	13
12		501.1 Hz	0.3391	8	12	12	14	12	11	12	10	12	10	13	11
13		508.4 Hz	0.2799	13	11	10	15	14	15	14	13	13	14	12	12
14		515.7 Hz	0.2356	15	16	16	16	13	16	16	15	16	16	14	14
15	velika terca	523.3 Hz	0.1962	16	14	11	13	10	14	15	14	15	13	15	16
16		530.9 Hz	0.1636	14	13	9	12	9	8	13	16	14	12	6	10

Slika 7.11 Matrica rezultata za test stimulusa grupe 2 (Tonovi harfe, B_1=0, B_2=$2\cdot10^{-3}$)

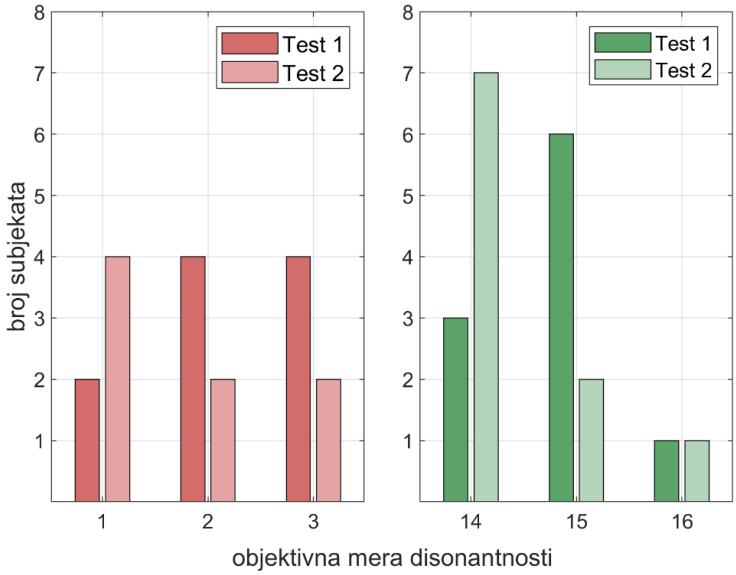
redni broj	interval	frekvencije	formula	Sub 01	Sub 02	Sub 03	Sub 04	Sub 05	Sub 06	Sub 07	Sub 08	Sub 09	Sub 10	Sub 11	Sub 12
1		427.5 Hz	3.9204	15	6	3	15	10	4	3	5	1	9	5	8
2		433.7 Hz	3.2810	12	4	2	4	8	6	4	1	2	1	4	1
3	mala sekunda	440 Hz	2.9957	13	2	6	3	6	3	2	2	3	4	3	4
4		446.4 Hz	2.6368	2	1	5	1	5	1	1	3	5	3	1	3
5		452.9 Hz	2.5017	1	3	1	2	1	2	5	4	4	2	2	2
6		459.5 Hz	2.1295	5	5	4	7	4	5	6	6	6	5	6	9
7	velika sekunda	466.2 Hz	1.9598	3	9	14	5	3	7	7	8	7	7	8	6
8		472.9 Hz	1.9643	4	8	9	8	2	9	8	7	10	6	9	5
9		479.8 Hz	1.6896	8	7	8	6	7	8	9	9	9	8	7	7
10		486.8 Hz	1.5222	10	11	10	9	15	13	10	10	8	10	14	12
11	mala terca	493.9 Hz	1.3527	9	14	15	16	16	12	11	15	13	13	15	13
12		501.1 Hz	1.3499	6	12	11	12	13	10	12	12	11	14	11	10
13		508.4 Hz	1.2498	7	10	7	11	11	14	13	11	12	15	10	14
14		515.7 Hz	1.3066	11	15	13	13	14	16	15	13	16	16	16	16
15	velika terca	523.3 Hz	1.1272	16	16	16	14	12	15	16	16	14	12	12	15
16		530.9 Hz	1.0459	14	13	12	10	9	11	14	14	15	11	13	11

Slika 7.12 Matrica rezultata za test stimulusa grupe 3 (Tonovi čembala, B_1=B_2=0)

redni broj	interval	frekvencije	formula	Sub 01	Sub 02	Sub 03	Sub 04	Sub 05	Sub 06	Sub 07	Sub 08	Sub 09	Sub 10	Sub 11	Sub 12
1		427.5 Hz	2.7095	9	4	3	4	8	5	4	5	1	8	4	4
2		433.7 Hz	2.7650	8	3	2	3	6	4	2	1	2	1	2	1
3	mala sekunda	440 Hz	2.4230	5	2	1	2	7	3	1	2	3	2	5	5
4		446.4 Hz	2.3424	2	1	10	1	4	2	5	3	4	4	1	2
5		452.9 Hz	2.1761	1	5	6	5	1	1	3	4	5	3	3	3
6		459.5 Hz	1.9455	3	7	14	7	3	7	6	7	6	5	7	8
7	velika sekunda	466.2 Hz	1.7570	4	6	7	8	2	8	7	6	7	6	6	6
8		472.9 Hz	1.6782	6	9	5	6	5	6	8	8	10	7	10	7
9		479.8 Hz	1.4765	7	8	11	13	16	9	9	9	9	9	8	10
10		486.8 Hz	1.1674	12	11	15	14	14	11	10	12	8	11	13	11
11	mala terca	493.9 Hz	1.2310	11	14	13	16	12	8	11	11	12	15	14	15
12		501.1 Hz	1.4011	10	13	9	15	9	13	12	10	11	10	11	13
13		508.4 Hz	1.1119	14	12	12	11	13	12	14	13	13	12	15	12
14		515.7 Hz	1.0878	15	16	16	12	15	16	15	15	16	13	16	14
15	velika terca	523.3 Hz	1.0263	16	15	8	10	11	14	16	14	15	16	12	16
16		530.9 Hz	0.8410	13	10	4	9	10	10	13	16	14	14	9	9

Slika 7.13 Matrica rezultata za test stimulusa grupe 4 (Tonovi čembala, B_1=0, B_2=2·10^{-3})

Radi lakšeg sagledavanja matrica rezultata četiri grupe testova prikazanih na slikama od 7.10 do 7.13, napravljen je uprošćen prikaz rezultata na slikama 7.14 i 7.15. Postupak uprošćavanja matrice rezultata biće objašnjen kroz rezultate Testa 1 (slika 7.10). Iz kolone „Formula“ matrice sa slike 7.10 izabrane su tri najdisonantnije vrednosti, odnosno 1.1048, 1.0934 i 1.0663. Za te tri vrednosti posmatrani su odgovori subjekata i brojano je koliko puta su subjekti rekli da je takav interval najdisonantniji, odnosno ocenili ga sa ocenom 1. U slučaju vrednosti 1.1048 - 2 ispitanika su ocenila taj interval najdisonantnijim, u slučaju vrednosti 1.0934 - 4 ispitanika i u slučaju vrednosti 1.0663 – 4 ispitanika. Ovakva raspodela odgovora ispitanika za tri najdisonantnija objektivna rezultata prikazana je na slici 7.14 stubovima crvene boje. Isti postupak je primenjen i za najkonsonantnije rezultate dobijene objektivnom merom. Odnosno iz kolone „Formula“ izabrane su najkonsonantnije vrednosti, tj. 0.2422, 0.2021 i 0.172. Za te tri vrednosti posmatrani su odgovori subjekata i brojano je koliko puta su subjekti rekli da je takav interval najkonsonantniji, odnosno ocenili ga sa ocenom 16. U slučaju vrednosti 0.2422 – 3 subjekta su ocenila taj interval najkonsonantnijim, u slučaju vrednosti 0.2021 – 6 ispitanika i u slučaju vrednosti 0.172 – 1 ispitanik. Ovakva raspodela odgovora ispitanika za tri najkonsonantnija objektivna rezultata prikazana je na slici 7.14 stubovima zelene boje. Po istom principu izvršeno je uprošćavanje rezultata za preostala tri testa.

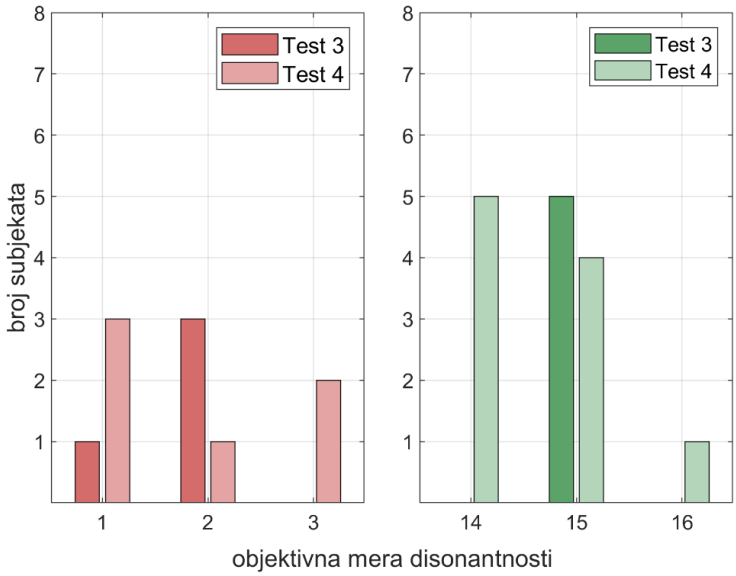


Slika 7.14 Uprošćeni prikaz rezultata subjektivnih testova 1 i 2

Na slici 7.14 prikazani su uprošćeni rezultati za subjektivne testove 1 i 2, kada su stimulusi intervala predstavljali tonove harfe. Test 1 predstavlja stimuluse intervala, gde su oba tona intervala bila sintetisana bez inharmoničnosti, dok je u slučaju Testa 2 viši ton intervala sintetisan sa koeficijentom inharmoničnosti B=2·10^{-3}. Ukoliko se posmatra levi deo slike koji odgovara disonantnim vrednostima, brojem 1 je označena najveća vrednost iz kolone „Formula“ i kao takva predstavlja

prema objektivnoj meri najdisonantniji interval. Taj interval predstavlja malu sekundu (440 Hz). Brojem 2, označena je sledeća najveća disonantna vrednost, koja obeležava interval malo manji od male sekunde (443.7 Hz), dok je brojem 3 obeležen interval koji je malo veći od male sekunde (446.4 Hz). Imajući to u vidu, može se uočiti kako koeficijent inharmoničnosti utiče da ispitanici interval manji ili veći od male sekunde doživljaju manje disonantno u odnosu na temperovanu malu sekundu. Za razliku od toga kada inharmoničnost nije prisutna, temeperovana mala sekunda ispitanicima deluje manje disonantno u odnosu na intervale malo manje ili malo veće od male sekunde.

Ukoliko se posmatra desni deo slike koji odgovara konsonantnim vrednostima, brojem 16 je označena najmanja vrednost iz kolone „Formula“ i kao takva predstavlja prema objektivnoj meri najkonsonantniji interval. Taj interval predstavlja interval malo veći od temperovane velike terce (530.9 Hz). Brojem 15, označena je sledeća po veličini konsonantna vrednost, koja obeležava interval temperovane velike terce (523.3 Hz), dok je brojem 14 obeležen interval koji je malo manji od velike terce (515.7 Hz). Imajući to u vidu, može se uočiti da su, kada inharmoničnost nije prisutna (Test1 tamnije zeleni stubovi) ispitanici glasali da je najkonsonantniji interval temperovana velika terca, čak polovina njih (6 od 12). Uticaj inharmoničnosti se u ovom slučaju ogleda tako što izbor konsonance prebacuje sa temperovane velike terce na interval malo manji od velike terce (515.7 Hz). Tada se 7 ispitanika odlučilo da je interval malo manji od velike terce konsonantniji u odnosu na veliku tercu, za koju je glasalo samo 2 ispitanika. Iako je broj od 12 ispitanika mali da bi se mogli izvesti generalizovani i statistički validni rezultati, u slučaju harfe i rezultata Testa 1 i 2 može se izvesti zaključak o uticaju inharmoničnosti na percepciju intervala. Za slučaj disonance, temperovana mala sekunda je subjektivnim testiranjem prikazana kao najdisonantniji interval u slučaju kada je inharmoničnost prisutna. Uvođenjem inharmoničnosti, prema stavu ispitanika disonantnost se smanjuje, odnosno intervali malo manji ili malo veći od male sekunde mogu delovati konsonantnije u odnosu na temperovanu malu sekundu. Za slučaj konsonance, situacija je obrnuta. Kada inharmoničnost nije prisutna, najkonsonantniji interval prema glasovima ispitanika je temperovana velika terca. Uvođenjem inharmoničnosti, prema stavu ispitanika konsonantnost velike terce se smanjuje, odnosno interval manji od temperovane velike terce postaje konsonantniji.

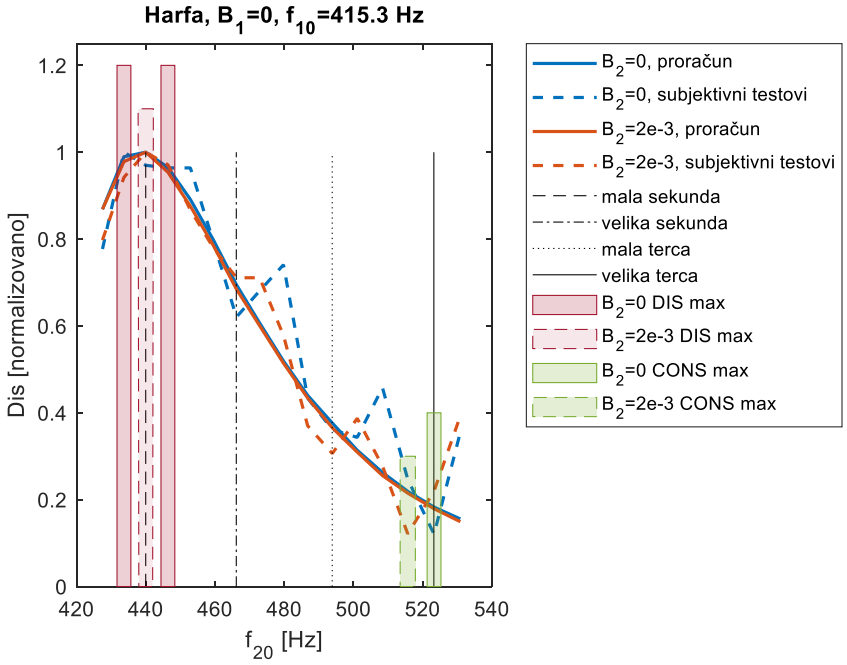


Slika 7.15 Uprošćeni prikaz rezultata subjektivnih testova 3 i 4

Na slici 7.15 prikazani su uprošćeni rezultati za subjektivne Testove 3 i 4, kada su stimulusi intervala predstavljali tonove čembala. Test 3 predstavlja stimuluse intervala, gde su oba tona intervala bila sintetisana bez inharmoničnosti, dok u slučaju Testa 4 viši ton intervala sintetisan je sa koeficijentom inharmoničnosti $B=2\cdot10^{-3}$. Ukoliko se posmatra levi deo slike koji odgovara disonantnim vrednostima, brojem 1 je označena najveća vrednost iz kolone „Formula“ i kao takva predstavlja

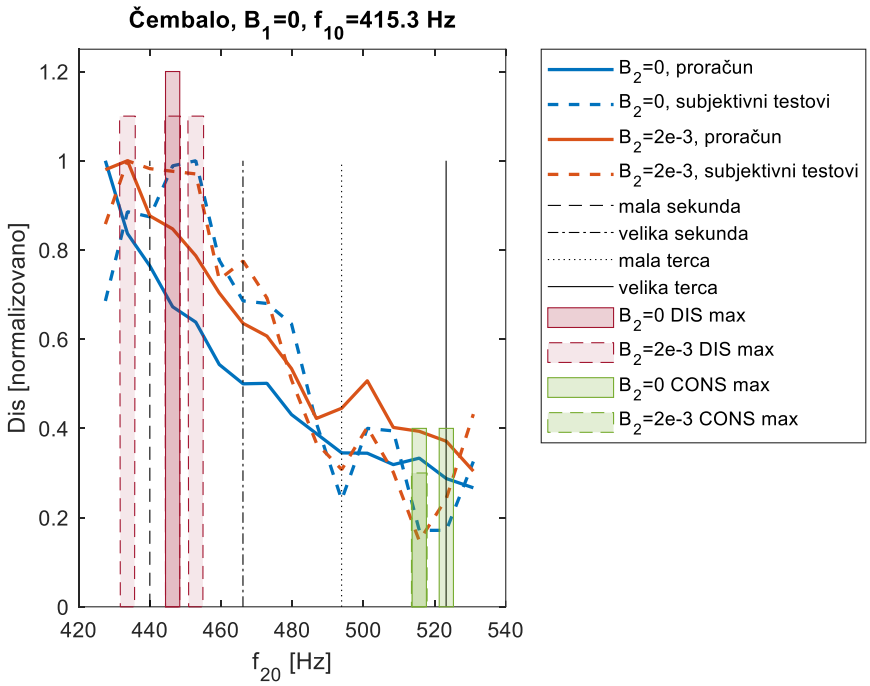
prema objektivnoj meri najdisonantniji interval. Taj interval predstavlja za dva pomaka manji interval od male sekunde (427.5 Hz). Brojem 2, označena je sledeća najveća disonantna vrednost, koja obeležava interval malo manji od male sekunde (443.7 Hz), dok je brojem 3 obeležen interval predstavlja temperovanu malu sekunde (440 Hz). Za razliku od harfe, objektivne vrednosti disonance su frekvencijski pomerene. Ukoliko se posmatra temperovana mala sekunda napravljena bez uticaja inharmoničnosti nema glasova ispitanika. Dok za slučaj kada je inharmoničnost uračunata, interval male sekunde dobija 3 glasa kao najdisonantniji interval. U slučaju konsonance, najmanja vrednost dobijena objektivnom merom predstavlja interval malo veći od velike terce. Taj slučaj na slici desno odgovara broju 16. Uočava se da nijedan ispitanik nije glasao da je taj interval najkonsonantniji u slučaju kada nije prisutna inharmoničnost kod stimulusa. Dok u prisustvu inharmoničnosti, samo 1 ispitanik se izjasnio da je takav interval najkonsonantniji. Sledeća veća vrednost objektivne mere pripada intervalu velike terce, koja je na grafiku desno obeležena brojem 15. U ovom slučaju uočava se da inharmoničnost ne utiče drastično na promenu percepcije konsonantnosti intervala, s obzirom da je razlika u glasu samo jednog ispitanika u korist kada inharmoničnost nije prisutna.

Da bi se rezultati kvantifikovali i uporedili sa teorijskim modelom, svaka ocena o iz matrice rezultata (broj iz intervala [1 16]) je invertovana i skalirana $o \rightarrow (17-o)/16$, čime su dobijene ocene iz intervala [1/16 1]. Konačna ocena dobijena je usrednjavanjem po ispitanicima. Kao dodatna mera, za svaki skup, detektovani su intervali koje je naveći broj ispitanika izabrao za najdisonantnije i najkonsonantnije. Na slikama 7.16 i 7.17 prikazane su korelacije rezultata subjektivnog testa sa teorijskim modelom krive disonantnosti, u slučaju tonova harfe (Test 1 i 2) i tonova čembala (Test 3 i 4). Prikazani su rezultati dobijeni na osnovu formula 7.5 i 7.7 i prosečne ocene dobijene na opisan način. Koncept testa podrazumeva poređenje isključivo unutar iste testne grupe, bez upoređivanja rezultata između različitih grupa. Shodno tome, krive je bilo moguće skalirati na maksimalnu vrednost. Pune linije predstavljaju krive disonantnosti dobijene iz teorijskih modela, a isprekidane linije rezultate subjektivnih testova. Plava linija (puna i isprekidana) označava slučajeve u kojima viši ton intervala nema inharmoničnost, dok narandžasta linija (puna i isprekidana) označava slučajeve sa izraženom inharmoničnošću višeg tona B=2·10^{-3}. Crvenim stubovima prikazani su intervali koje je najveći broj ispitanika prepoznao kao najdisonantnije, dok su zelenim stubovima prikazani intervali koje je najveći broj ispitanika prepoznao kao najkonsonantnije. U istom maniru, stubovi označeni punim linijama odnose se na slučaj kada viši ton nije posedovao inharmoničnost, a stubovi označeni isprekidanim linijama na slučaj kada je viši ton posedovao izraženu inharmoničnost.



Slika 7.16 Korelacija rezultata subjektivnog testa sa teorijskim modelom krive disonantnosti (Test 1 i 2, tonovi harfe)

Slike 7.16 i 7.17 prikazuju na nešto drugačiji način rezultate date na slikama 7.10 do 7.15 pa su globalni zaključci isti kao što je već navedeno. Na slici 7.16 prikazane su četiri krive disonantnosti: teorijska i subjektivna za slučaj kada viši ton nema inharmoničnost(B=0) i teorijska i subjektivna za slučaj izražene inharmoničnosti višeg tona (B=2·10^{-3}). U oba slučaja uočava se dobro poklapanje teorijskih i subjektivnih rezultata i izostanak značajne razlike među parovima krivih, pa se za izabrane parametre može zaključiti da inharmoničnost višeg tona ne utiče značajno na percepciju disonantnosti. Fenomen se može objasniti spektralnom obvojnicom harfe, koju karakteriše relativno mali broj parcijala, pri čemu samo dva imaju amplitude dovoljne za značajan doprinos disonantnosti. Na osnovu slike 7.16 može se izvesti i globalan zaključak: promena inharmoničnosti (bez uvažavanja fantomskih parcijala) pre svega menja stepen konsonantnosti, dok na disonantnost utiče slabije. Izražena inharmoničnost dovodi do toga da temperovana velika terca postane manje konsonantna, pri čemu ulogu najkonsonantnijeg intervala preuzima interval neznatno manji od temperovane velike terce. Ovakav zaključak proizlazi iz položaja globalnih minimuma na plavoj i narandžastoj isprekidanoj krivi, kao i iz zelenih stubova na slici 7.16.



Slika 7.17 Korelacija rezultata subjektivnog testa sa teorijskim modelom krive disonantnosti (Test 3 i 4, tonovi čembala)

Na osnovu slike 7.17 može se uočiti da se kod čembala rezultati razlikuju, krive se ne poklapaju a ni globalni trendovi koji bi trebali da vode ka zaključcima nisu isti kao kod harfe. Ton čembala ima značajno veći broj izraženih parcijala čije su amplitude takve da značajnije doprinose disonantnosti. Prema teoriji, maksimum krive se pomera malo udesno sa promenom koeficijenta inharmoničnosti. Rezultati subjektivnih testova to ne prate u potpunosti, čak bi se moglo reći da se zona maksimuma donekle zaravnila pa čak i pomerila ulevo. Razlika bi mogla da ukaže na to da korišćeni teorijski model, ne uračunava dobro doprinose disharmoničnosti u situaciji kada su tonovi takvi da je prisutan veći broj značajnih parcijala. Za dalje istraživanje ostaje otvoreno pitanje na koji način amplitude parcijala treba uključiti u teorijski model.

7.3 Zaključak

U ovom poglavlju razvijen je i verifikovan metodološki okvir za perceptivnu analizu tonova i intervala žičanih muzičkih instrumenata, koji spaja objektivnu karakterizaciju i subjektivna ispitivanja. Najpre je pokazano da aditivina sinteza sa pridodatim atributima procenjenim iz realnih tonova (vremenska obvojnica parcijala, broj dominantnih parcijala N, koeficijent inharmoničnosti B, komponente ispod najnižeg r_l i iznad najvišeg r_h parcijala, potiskivanje obvojnica nedominantnih

parcijala) omogućava postizanje visokog stepena perceptivne prirodnosti. Subjektivno poređenje četiri varijante sinteze, dopunjeno objektivnim metrikama (PEAQ, RMSE i koeficijent korelacije), ukazalo je da se nijedna varijanta ne izdvaja statistički jednoznačno u svim poređenjima, ali da je varijanta 4 sinteze zahvaljujući dodatnom slabljenju viših nedominantnih parcijala, uz uvažavanje komponenti r_l i r_h najbliža originalnom tonu harfe. Postignuti rezultat je ključan jer obezbeđuje metod sinteze koji je pouzdan za sledeća perceptivna ispitivanja. U drugom delu poglavlja izvršena je objektivna karakterizacija disonantnosti intervala putem krivih disonantnosti i koncepta kritičnih opsega, kao i subjektivna provera hipoteza na stimulusima sintetisanim varijantom 4. Analize su pokazale da na oblik i nivo krive disonantnosti presudno utiču: osnovna frekvencija nižeg tona f_0, broj parcijala N i spektralna obvojnica. Inharmoničnost menja frekvencijske položaje parcijala i time remeti interakcije parcijala unutar kritičnih opsega, koje predstavljaju osnov konsonantnih odnosa. Pokazano je da izrazito velika vrednost koeficijenta inharmoničnosti utiče na meru teorijske disonantnosti, dok male vrednosti B ne proizvode izražene pomake globalnih minimuma i maksimuma krive disonantnosti. Takođe, pokazano je da inharmoničnost posredno utiče na disonantnost intervala. Jedna od posledica inharmoničnosti jeste pojava fantomskih parcijala. Fantomski parcijali, s obzirom da su frekvencijski jako bliski inharmoničnim parcijalima, značajno uvećavaju broj parcijala koji upadaju i isti kritični opseg i samim tim doprinose porastu disonantnosti. U okviru ovog poglavlja tvrdnje o uticaju fantomskih parcijala na disonantnost intervala, proverene su samo sa teorijskog aspekta posmatranjem broja parova parcijala koji se nalaze unutar istog kritičnog opsega. U sprovedenom subjektivnom testu efekti fantomskih parcijala nisu bili eksplicitno uključeni. U budućim istraživanjima biće sprovedeni dodatni subjektivni testovi u kojima će se, pored neposrednog uticaja inharmoničnosti, ispitati i udruženo delovanje inharmoničnosti i fantomskih parcijala na perceptivni doživljaj disonantnosti.

Glavni zaključci ovog poglavlja su:

1. Dizajnirana je sinteza koja je perceptivno verodostojna i istovremeno parametarski kontrolabilna, što omogućava dobar osnov za buduća perceptivna ispitivanja.
2. Disonantnost intervala, iako su pokazana načelna poklapanja u rezultatima objektivne karakterizacije i subjektivnih ispitivanja, predstavlja jednu temu kod koje je sistematski uvezano više međusobno zavisnih faktora poput: frekvencije tona, broja i raspodele parcijala, inharmoničnosti, a samim tim i fantomskih parcijala, pa je veoma teško proceniti uticaj inharmoničnosti kao takve na disonantnost intervala.

8 Zaključak

Tema doktorske disertacije predstavlja spoj objektivne i perceptivne karakterizacije tonova muzičkih instrumenata. Predmet istraživanja bazira se na žičanim muzičkim instrumentima, gde su izabrani reprezentativni predstavnici te grupe instrumenata, kao što su klavir, čembalo i harfa. Fenomen koji je zajednički za ovu grupu instrumenata, i ima svoju kako objektivnu tako i perceptivnu komponentu, jeste inharmoničnost. Inharmoničnost nije izolovan fenomen, već dovodi do specifičnih posledica u spektru žičanih instrumenata. Nelinearna sprega transverzalnih i longitudinalnih vibracija u žicama i telu instrumenta generiše fantomske parcijale, čija se prisutnost zbog inharmoničnosti prepoznaje u spektru. Pregled literature pokazuje da su inharmoničnost i njene spektralne posledice, odnosno fantomski parcijali, uglavnom razmatrani iz perspektive klavira. Fokus disertacije usmeren je na harfu i čembalo, instrumente iste porodice, kod kojih se usled različite konstrukcije i načina pobuđivanja žice pojedini fenomeni ispoljavaju izraženije i sa drugačijim akustičko-perceptivnim posledicama.

Parametar koji kvantifikuje fenomen inharmoničnosti jeste koeficijent inharmoničnosti B i u okviru ove disertacija objektivna karakterizacija tonova klavira, čembala i harfe izvršena je upravo kroz njegovu prizmu. Polazeći od postojećeg PFD algoritma koji se odlikuje niskom računskom kompleksnošću i robusnošću, procenjeni su koeficijenti inharmoničnosti klavira, čembala i harfe u celokupnom frekvencijskom opsegu. Analizom trenda krive koeficijenta inharmoničnosti ustanovljeno je da za klavir tako dobijen trend ima monotoni rast, dok u slučaju čembala i harfe u trendu postoje odstupanja u vrednostima koja narušavaju monotonost. S obzirom da se PFD algoritam zasniva na estimaciji maksimalnih amplituda koje se nalaze u frekvencijskim okvirima inharmoničnih parcijala, činjenica da postoje neke dodatne spektralne komponente kao što su fantomski parcijali koji često mogu biti većih amplituda u odnosu na inharmonični parcijal narušava automatsku estimaciju koeficijenta inharmoničnosti. Te tako glavni doprinos ove disertacije sa stanovišta objektivne karakterizacije jeste razvoj modifikacije PFD algoritma, koja eksplicitno uzima u obzir fantomske parcijale. Modifikacija se zasniva na detekciji i eliminaciji fantomskih parcijala iz procesa procene koeficijenta inharmoničnosti. Takođe, još jedan od doprinosa modifikacije je što se u okviru estimacije koeficijenta inharmoničnosti koristi adaptivni broj parcijala N za razliku od PFD algoritma koji koristi fiksan broj parcijala za ceo frekvencijski opseg od interesa. Predložena modifikacija algoritma verifikovana je na kontrolisanom skupu sintetizovanih signala gde su varirane vrednosti B, broj i raspored fantomskih parcijala. Pokazano je značajno smanjenje greške procene u odnosu na PFD, pri čemu srednja relativna greška iznosi oko 0.45% za mPFD naspram 6.11% za PFD. Takođe je potvrđeno robusno ponašanje mPFD algoritma i u uslovima nepovoljnog odnosa broja fantomskih parcijala i ukupnog broja parcijala, kao i pri njihovom grupisanju. Na realnim snimcima, mPFD je obezbedio ujednačeniji profil krive koeficijenta inharmoničnosti u odnosu na PFD. Kod harfe su uklonjene lokalne diskrepance u trendu toka krive povezane sa fantomskim parcijalima. Za sva tri instrumenta na osnovu mPFD algoritma postignuto je procentualno smanjenje greške u odnosu na PFD algoritam. U slučaju klavira, srednja greška pri proceni PFD algoritmom iznosi 8.9%, dok pri proceni mPFD algoritmom iznosi 3%. U slučaju čembala, procenti su sledeći: PFD algoritam (srednja greška 9.5%), mPFD algoritam (srednja greška 4.8%), dok u slučaju harfe PFD algoritam ima srednju grešku od 15.4%, a mPFD algoritam od 4.9%. Na osnovu mPFD algoritma postignuto je da se trendovi krive koeficijenta inharmoničnosti ponašaju monotono u skladu sa zakonima fizičkog modela žice. Takvo ponašanje doprinelo je da se na osnovu oblika krive koeficijenta inharmoničnosti reflektuju fizičke karakteristike instrumenata, poput materijala, prečnika i dužine žice, kao i njihove tenzije, što omogućava jasnu distinkciju među žičanim muzičkim instrumentima.

S obzirom na ustanovljenu važnost inharmoničnosti sa perceptivnog aspekta, koeficijent inharmoničnosti B postao je nezaobilazan parametar sinteze tonova žičanih instrumenata. Da bi se razvio metod za što verodostojniju sintezu tonova žičanih instrumenata sa inkorporiranim uticajem koeficijenta inharmoničnosti, u okviru ove disertacije razvijana je aplikacija MuPI. Ideja MuPI aplikacije je da napravi most između objektivne i perceptivne karakterizacije tonova žičanih muzičkih

instrumenata. Aplikacija se sastoji od tri modula: MuPI_S (inicijalna predobrada i vizualizacija signala), MuPI_B (izračunavanje parametara signala) i MuPI_A (obrada signala u podopsezima i sinteza signala). Okosnicu ove aplikacije predstavlja dvostruko komplementarna banka filtara sa faznom korekcijom, pomoću koje je obezbeđena idealna rekonstrukcija prilikom sinteze. Ovako dizajnirana filtarska banka, čiji se parametri podešavaju u skladu sa koeficijentom inharmoničnosti analiziranog signala, omogućava da se izvrši dekompozicija signala na parcijale. To predstavlja jedan od benefita ovog alata, jer se uticaji fenomena poput inharmoničnosti i fantomskih parcijala, mogu sagledati globalno, posmatrajući ceo ton ili lokalno analizom pojedinačnih parcijala tona. Takođe, u okviru trećeg modula MuPI_A, moguće je izvršavati različite manipulacije nad pojedinačnim obvojnicama parcijala, te je tako aproksimacijom vremenskih obvojnica parcijala moguće umanjiti uticaj fantomskih parcijala. S obzirom na postojanje fazne korekcije, omogućena je idealna rekonstrukcija signala, nakon dekompozicije i manipulacije nad pojedinim delovima signala. Mogućnost da u okviru alata može da se sluša rekonstruisan i sintetisan signal sa inkorporiranim koeficijentom inharmoničnosti predstavlja olakšicu ka generisanju stimulusa za subjektivna testiranja. MuPI omogućava tačniju analizu tonskih signala zahvaljujući specijalizovanom dizajnu banke filtara koji nije prisutan u aplikacijama slične namene. Za razliku od drugih alata, fokus je na inharmoničnosti i rekonstrukciji, što aplikaciju čini pogodnom za analizu žičanih instrumenata.

Uz pomoć MuPI alata dizajnirani su stimulusi za prvi subjektivni test gde je ispitana prirodnost različitih varijanti sinteze tonova harfe, polazeći od aditivne sinteze sa dodatim atributima iz realnih signala kao što su: vremenska obvojnica i broj dominantnih parcijala, koeficijent inharmoničnosti B, komponente ispod najnižeg (r_l) i iznad najvišeg (r_h) parcijala, kao i manipulacija nad obvojnicama nedominantnih parcijala. Subjektivni test nije izdvojio jednu od varijanti sinteze kao statistički superiornu, već su se formirala tri moguća subjektivna ranga. Korelacijom rangova dobijenih subjektivnim testom i na osnovu objektivnog ranga dobijenog na osnovu parametara PEAQ, RMSE i koeficijenta korelacije može se izvući nekoliko zaključaka. Princip sinteze u ovoj disertaciji, koji se zasniva na aditivnoj sintezi sa pridodatim atributima estimiranim iz realnih signala harfe, je dobar. Izborom tonova za stimulus sinteze, pokazano je da je sinteza primenjiva kroz ceo frekvencijski registar muzičkog instrumenta, kao i da na sintezu ne utiču ostali objektivni parametri poput broja harmonika i koeficijenta inharmoničnosti. Najlošija sinteza na osnovu subjektivnog testa pokazuje da nije dovoljno u sintetisani zvuk uključiti samo predefinisani broj harmonika sa njima pridruženim obvojnicama. Utisak "prirodnosti" signala zavisi od komponente signala koje se nalaze iznad najvišeg (r_h) i ispod najnižeg (r_l) parcijala. Energetsko opadanje viših harmonika u vremenu utiče na prirodnost sinteze, jer podjednako trajanje viših harmonika kao i nižih sugeriše slušaocima da se radi o sintetizovanom stimulusu, a ne o stimulusu koji predstavlja ton odsviran na instrumentu. Postignuti rezultat je ključan jer obezbeđuje metod sinteze koji je pouzdan za sledeća perceptivna ispitivanja.

Uticaj inharmoničnosti na percepciju disonantnosti intervala ispitivan je na načelima prethodno sprovedene objektivne karakterizacije, a zatim kroz drugi subjektivni test. Objektivna karakterizacija intervala, izvršena kombinovanjem teorijskih modela krive disonantnosti, kritičnog opsega i opsega izbijanja, dala je zaključke koji su omogućili formulisanje hipoteze drugog subjektivnog testa. Pokazano je da porast osnovne frekvencije tona sužava zonu maksimalne interferencije parcijala, te tako isti interval nema jednaku disonantnu vrednost u različitim registrima. Takođe, pokazano je da uključivanje amplituda koje prate energetsko opadanje parcijala tonova smanjuje ukupnu disonantnost intervala i ublažava lokalne pregibe krive disonantnosti između pojedinih intervala (velike sekunde i male terce, velike terce i kvinte), dok globalni minimumi (velika terca, čista kvinta, velika seksta, oktava) ostaju izraženi. Varijacijom vrednosti koeficijenta inharmoničnosti pokazano je da izražene vrednosti mogu uticati na promenu disonantnosti intervala, na način što se frekvencijskim pomerajem parcijala dovodi do njihovog pregrupisavanja unutar kritičnih opsega. Pokazano je da posredni uticaj inharmoničnosti preko fantomskih parcijala ima veliki uticaj na objektivnu ocenu disonantnosti, jer njihovim uključivanjem broj parcijala koji interaguju u okviru istog kritičnog opsega raste što pospešuje percepciju grubosti tona. Na osnovu navedenih zaključaka

objektivne karakterizacije glavno pitanje drugog subjektivnog testa bilo je da li inharmoničnost, sama po sebi nezavisno od ostalih faktora, neposredno utiče na doživljaj disonantnosti intervala? Stimulusi drugog subjektivnog testa predstavljali su intervale u rasponu od male sekunde do velike terce, sintetizovane za tonove harfe i čembala. Sinteza pojedinačnih tonova sprovedena je varijantom sinteze 4 koja predstavlja rezultat prvog subjektivnog testa. Na osnovu rezultata subjektivnog testa izveden je globalni zaključak da iako postoje korelacije između objektivnih karakterizacija disonantnosti intervala sa rezultatima subjektivnog testa, nije jednostavno utvrditi tačan razlog njihove korelacije. Na pitanje subjektivnog testa da li je moguće govoriti o neposrednom uticaju inharmoničnosti na doživljaj disonantnosti intervala, zaključak je da to nije moguće. Disonantnost intervala predstavlja temu kod koje je povezano više međusobno zavisnih faktora poput: frekvencije tona, broja i raspodela parcijala, inharmoničnosti, a samim tim i fantomskih parcijala, te je veoma teško proceniti uticaj inharmoničnosti kao takve na disonantnost intervala.

8.1 Naučni doprinosi

Naučni rezultati predstavljeni u ovoj disertaciji predstavljaju pomak u oblasti muzičke akustike. Polazeći od koeficijenta inharmoničnosti kao specifičnog spektralnog obeležja tona razvijena je metodologija za objektivnu i perceptivnu ocenu kvaliteta tona. Metodologija počiva na primeni prilagođenih filtarskih banaka za dekompoziciju realnih signala, aditivnu sintezu sa mogućnošću kontrole koeficijenta inharmoničnosti i obvojnice parcijala. Verifikacija metodologije i karakterizacija muzičkih tonova i intervala zasnovana je na realizaciji dva subjektivna testa sa odabranim kategorijama slušalaca, statističkoj obradi i analizi dobijenih rezultata subjektivnih testova. U ostvarene naučne doprinose ove disertacije spadaju:

- Formiranje otvorene baze snimaka muzičkih instrumenata

Kreiran je audio portal, kao baza podataka otvorenog tipa, koji je postavljen na serveru Fakulteta, čime će se ostvariti njena globalna dostupnost drugim istraživačima. U kreiranoj bazi signali su klasifikovani po kategorijama, a baza ima mogućnost proširenja i sa drugim tipovima signala. Realizovani audio portal omogućava registrovanje korisnika, dodavanje novih audio snimaka od strane korisnika, pretrage po svim kategorijama, kao i preuzimanje *file*-ova koji odgovaraju rezultatima pretrage. U bazi se trenutno nalaze svi signali korišćeni u ovoj disertaciji, odnosno realni snimci klavira, čembala i harfe. Baza audio snimaka nastala u ovoj disertaciji može se koristiti i za druga istraživanja jer sadrži veliki broj metadata informacija o samim snimcima.

- Unapređenje algoritma koji omogućava preciznije određivanje vrednosti koeficijenta inharmoničnosti žičanih muzičkih instrumenata

Predložena je modifikacija PFD algoritma koji je namenjen proceni koeficijenta inharmoničnosti. Modifikacija PFD algoritma izvršena je tako da se uvažavaju fenomeni koji narušavaju tačnost algoritma, kao što su fantomski parcijali. Predloženi algoritam može se primeniti na signale bilo kog muzičkog instrumenta, bez izmena u svojoj strukturi. Verifikacija predloženog algoritma izvršena je u kontrolisanim uslovima, sa sintetizovanim signalima, ali i u realnim uslovima, sa realnim snimcima muzičkih instrumenata. U okviru ove disertacije pokazano je da se rezultati predloženog algoritma poklapaju sa teorijskim modelima zasnovanim na fizičkim parametrima žica muzičkih instrumenata, dok rezultati originalnog PFD algoritma odstupaju i za 50%.

- Algoritam za analizu i sintezu tonova sa mogućnošću kontrole relevantnih parametara

U okviru ove disertacije realizovana je aplikacija MuPI pomoću koje se kompleksni signal deli na niz manje kompleksnih signala, a dalja analiza svakog kanala se vrši istovremeno i u vremenskom i u frekvencijskom domenu. Dekompozicija signala se vrši pomoću neuniformne višekanalne filtarske banke sa dodatnom faznom korekcijom, čuvajući vremenska kašnjenja između kanala. Zbog relativno kratkih intervala kvazistacionarnosti u muzičkom signalu, izazovno je detektovati i precizno proveriti

prisustvo tih nepravilnosti. U predstavljenom pristupu, kombinacija vremenske i frekvencijske analize svakog kanala i analize ukupnog signala poboljšava analizu. MuPI omogućava precizniju analizu tonskih signala zahvaljujući specijalizovanom dizajnu banke filtera koji nije prisutan u aplikacijama slične namene. Za razliku od drugih alata, fokusiran je na parametre poput inharmoničnosti i rekonstrukcije, što ga čini pogodnim za analizu žičanih instrumenata.

- Formiranje različitih tipova subjektivnih testova za karakterizaciju signala muzičkih instrumenata

U okviru disertacije realizovana su dva subjektivna testa. Prvi subjektivni test imao je za cilj utvrđivanje prirodnosti različitih modela sinteze muzičkih signala. Rezultati ovog testa pokazali su koja od sinteza može da se koristi za naredne, složenije, subjektivne testove. Zaključeno je da na utisak "prirodnosti" signala utiču komponente signala koje se nalaze iznad najvišeg i ispod najnižeg parcijala. Pokazano je i da broj bita kojim će se sintetizovati stimulus za naredna istraživanja nije od presudnog značaja sa aspekta percepcije prirodnosti. Saznanje da je jedna varijanta sinteze najprirodnija ima suštinski značaj jer se njenom primenom u narednim subjektivnim testovima otklanja pitanje prirodnosti sinteze, a fokus istraživanja premešta se isključivo na uticaj inharmoničnosti na percepciju tonova i muzičkih intervala žičanih instrumenata. U drugom subjektivnom testu ispitivan je uticaj inharmoničnosti na percepciju disonantnosti intervala. Testovi su sprovedeni sa školovanim muzičarima koji su rangirali parove tonova prema disonantnosti. Za razliku od rezultata koji su dostupni u literaturi, testiranje je sprovedeno sa kompleksnim signalima, odnosno muzičkim tonovima harfe i čembala, kojima je menjana inharmoničnost.

- Određivanje veze između vrednosti koeficijenta inharmoničnosti muzičkih instrumenata za različite instrumente sa subjektivnom percepcijom kod ljudi.

Dobijeni rezultati subjektivnog testa, kao i objektivne analize, smatraju se polaznom instancom istraživanja uticaja inharmoničnosti na percepciju konsonantnosti. Na osnovu rezultata korelacije subjektivnih testova utvrđen je uticaj koeficijenta inharmoničnosti muzičkih tonova na percepciju intervala. Prema ispitanicima, uvođenje inharmoničnosti smanjuje doživljaj disonantnosti, pa intervali malo manji ili malo veći od male sekunde mogu zvučati konsonantnije od temperovane male sekunde. Bez inharmoničnosti najkonsonantnija je temperovana velika terca, dok sa inharmoničnošću njena konsonantnost opada i konsonantnijim se doživljava interval nešto manji od temperovane velike terce. Međutim, iako postoje korelacije između objektivnih karakterizacija disonantnosti intervala sa rezultatima subjektivnog testa, nije jednostavno utvrditi tačan razlog njihove korelacije. Zaključak je da nije moguće govoriti izolovano o uticaju inharmoničnosti na percepciju intervala. Disonantnost intervala predstavlja temu kod koje je sistematski povezano više međusobno zavisnih faktora poput: frekvencije tona, broja i raspodela parcijala, inharmoničnosti a samim tim i fantomskih parcijala.

8.2 Buduća istraživanja

Rezultati prikazani u ovoj doktorskoj disertaciji otvorili su nekoliko daljih pravaca za istraživanja u ovoj oblasti. Jedan od mogućih pravaca daljeg istraživanja je unapređenje razvijene aplikacije za analizu i sintezu muzičkih signala. Pošto aplikacija ima modularnu strukturu moguće je implementirati dodatne module. Može se razviti blok za obradu koji se oslanja na interpolaciju signala kao alat za poboljšanje STFT rezolucije. Budući rad će se takođe fokusirati na pronalaženje brzog i jednostavnog alata za detekciju kanala sa više od jednog frekvencijskog maksimuma. Predloženi algoritam za određivanja koeficijenta inharmoničnosti mogao bi da bude primenjen i na drugim žičanim instrumentima koji nisu obrađeni u literaturi. To bi omogućilo karakterizaciju i drugih instrumenata sa stanovišta koeficijenta inharmoničnosti i uticaja na percepciju zvuka tih instrumenta. Dalji pravci istraživanja u delu subjektivnih testova razmatrali bi zbirni uticaj inharmoničnosti i fantomskih parcijala na percepciju intervala. Fantomski parcijali, kao važna pojava kod nekih muzičkih instrumenata, mogu imati veliki uticaj na proces percepcije kako pojedinačnih muzičkih tonova tako i muzičkih intervala.

9 Literatura

[1] G. Abraham, *The concise Oxford history of music Gerald Abraham*, Reprinted. in Oxford paperbacks. Oxford: Oxford Univ. Pr, 1991.

[2] E. Garber, *The language of physics: the calculus and the development of theoretical physics in Europe, 1750 - 1914*. Boston, Mass. Berlin: Birkhäuser, 1999.

[3] G. Anfilov and B. Kuznetsov, *Physics and music*. Honolulu, Hawaii: University Press of the Pacific, 2001.

[4] J. W. Strutt, *The Theory of Sound: Volume 1*. in Cambridge library collection. Physical Sciences. Cambridge: Cambridge University Press, 1877. doi: 10.1017/CBO9781139058087.

[5] R. W. Young, "Inharmonicity of Plain Wire Piano Strings," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 24, no. 3, pp. 267–273, May 1952, doi: 10.1121/1.1906888.

[6] H. Fletcher, "Normal Vibration Frequencies of a Stiff Piano String," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 36, no. 1, pp. 203–209, Jan. 1964, doi: 10.1121/1.1918933.

[7] B. E. Anderson and W. J. Strong, "The effect of inharmonic partials on pitch of piano tones," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, no. 5, pp. 3268–3272, May 2005, doi: 10.1121/1.1882963.

[8] H. Järveläinen, V. Välimäki, and M. Karjalainen, "Audibility of the timbral effects of inharmonicity in stringed instrument tones," *Acoust. Res. Lett. Online*, vol. 2, no. 3, pp. 79–84, July 2001, doi: 10.1121/1.1374756.

[9] H. Järveläinen, T. Verma, and V. Välimäki, "The effect of the inharmonicity on pitch in string instruments sounds," presented at the Proc. Int. Computer Music Conf. (ICMC'00), Berlin, Germany, 2000.

[10] A. Galembo, A. Askenfelt, L. Cuddy, and F. Russo, "Perceptual relevance of inharmonicity and spectral envelope in the piano bass range," *Acta Acoust. United Acust.*, vol. 90, no. 3, pp. 528–536, 2004.

[11] H. Fletcher, E. D. Blackham, and R. Stratton, "Quality of Piano Tones," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 34, no. 6, pp. 749–761, June 1962, doi: 10.1121/1.1918192.

[12] J. Bensa, D. Dubois, R. Kronland-Martinet, and S. Ystad, "Perceptive and Cognitive Evaluation of a Piano Synthesis Model," in *Computer Music Modeling and Retrieval*, vol. 3310, U. K. Wiil, Ed., in Lecture Notes in Computer Science, vol. 3310. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 232–245. doi: 10.1007/978-3-540-31807-1_18.

[13] R. Plomp and W. J. M. Levelt, "Tonal Consonance and Critical Bandwidth," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 38, no. 4, pp. 548–560, Oct. 1965, doi: 10.1121/1.1909741.

[14] J. M. Geary, "Consonance and dissonance of pairs of inharmonic sounds," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 67, no. 5, pp. 1785–1789, May 1980, doi: 10.1121/1.384307.

[15] E. A. Cohen, "Some Effects of Inharmonic Partials on Interval Perception," *Music Percept.*, vol. 1, no. 3, pp. 323–349, Apr. 1984, doi: 10.2307/40285264.

[16] R. Marjieh, P. M. C. Harrison, H. Lee, F. Deligiannaki, and N. Jacoby, "Timbral effects on consonance disentangle psychoacoustic mechanisms and suggest perceptual origins for musical scales," *Nat. Commun.*, vol. 15, no. 1, p. 1482, Feb. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-45812-z.

[17] B. C. J. Moore, R. W. Peters, and B. R. Glasberg, “Thresholds for the detection of inharmonicity in complex tones,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 77, no. 5, pp. 1861–1867, May 1985, doi: 10.1121/1.391937.

[18] J. Jaatinen and J. Pätynen, “Effect of inharmonicity on pitch perception and subjective tuning of piano tones,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 152, no. 2, pp. 1146–1157, Aug. 2022, doi: 10.1121/10.0013572.

[19] N. Giordano, “Explaining the Railsback stretch in terms of the inharmonicity of piano tones and sensory dissonance,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 138, no. 4, pp. 2359–2366, Oct. 2015, doi: 10.1121/1.4931439.

[20] J. Lattard, “Influence of inharmonicity on the tuning of a piano—Measurements and mathematical simulationa),” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 94, no. 1, pp. 46–53, July 1993, doi: 10.1121/1.407059.

[21] J. Jaatinen, J. Pätynen, and K. Alho, “Octave stretching phenomenon with complex tones of orchestral instruments,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 146, no. 5, pp. 3203–3214, Nov. 2019, doi: 10.1121/1.5131244.

[22] B. Capleton, “False beats in coupled piano string unisons,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, no. 2, pp. 885–892, Feb. 2004, doi: 10.1121/1.1636461.

[23] F. Scalcon, D. Rocchesso, and G. Borin, “Subjective evaluation of the inharmonicity of synthetic piano tones,” presented at the Internetional Computer Music Conference ICMC ’98, Ann Arbor, Michigan, USA, pp. 53–56.

[24] H. Järveläinen, V. Välimäki, and M. Karjalainen, “Audibility of inharmonicity in string instrument sounds,and implications to digital sound synthesis,” presented at the Internetional Computer Music Conference, Beijing, China, 1999, pp. 359–362.

[25] E. Kottick, K. Marshall, and T. Hendrickson, “The Acoustics of the Harpsichord,” *Sci. Am.*, vol. 264, no. 2, pp. 110–115, 1991.

[26] J. Woodhouse, “The acoustics of a plucked harp string,” *J. Sound Vib.*, vol. 523, p. 116669, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jsv.2021.116669.

[27] B. Bank and H.-M. Lehtonen, “Perception of longitudinal components in piano string vibrations,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 128, no. 3, pp. EL117–EL123, Sept. 2010, doi: 10.1121/1.3453420.

[28] T. R. Moore, L. M. Neldner, and E. Rokni, “Structural contributions to phantom partial generation in the piano,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 144, no. 3, pp. 1564–1571, Sept. 2018, doi: 10.1121/1.5055225.

[29] E. Rokni, L. M. Neldner, C. Adkison, and T. R. Moore, “The production of phantom partials due to nonlinearities in the structural components of the piano,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 142, no. 4, pp. EL344–EL349, Oct. 2017, doi: 10.1121/1.5006351.

[30] H. A. Conklin, “Piano strings and ‘phantom’ partials,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 102, no. 1, pp. 659–659, July 1997, doi: 10.1121/1.419713.

[31] H. A. Conklin, “Generation of partials due to nonlinear mixing in a stringed instrument,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 105, no. 1, pp. 536–545, Jan. 1999, doi: 10.1121/1.424589.

[32] B. Bank and L. Sujbert, “Generation of longitudinal vibrations in piano strings: From physics to sound synthesis,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, no. 4, pp. 2268–2278, Apr. 2005, doi: 10.1121/1.1868212.

[33] T. D. Rossing and N. H. Fletcher, *Principles of vibration and sound*, Corrected 2. printing. New York, NY: Springer, 1999.

[34] J. Woodhouse, “Influence of Damping and Nonlinearity in Plucked Strings: Why Do Light-Gauge Strings Sound Brighter?,” *Acta Acust. United Acust.*, vol. 103, no. 6, pp. 1064–1079, Nov. 2017, doi: 10.3813/AAA.919135.

[35] J. Woodhouse, “Plucked Guitar Transients: Comparison of Measurements and Synthesis,” *Acta Acust. United Acustina*, vol. 90, 2004.

[36] T. D. Rossing, *The Science of String Instruments*. in SpringerLink Bücher. New York, NY: Springer New York, 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-7110-4.

[37] D. Chadefaux, J.-L. Le Carrou, B. Fabre, and L. Daudet, “Experimentally based description of harp plucking,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 131, no. 1, pp. 844–855, Jan. 2012, doi: 10.1121/1.3651246.

[38] N. Lynch-Aird, and Woodhouse, “The sound of a harp string,” in *Euphonics – The science of musical instruments*, 2023.

[39] A. Galembo and A. Askenfelt, “Signal representation and estimation of spectral parameters by inharmonic comb filters with application to the piano,” *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, vol. 7, no. 2, pp. 197–203, Mar. 1999, doi: 10.1109/89.748124.

[40] A. P. Klapuri, “Multiple fundamental frequency estimation based on harmonicity and spectral smoothness,” *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, vol. 11, no. 6, pp. 804–816, Nov. 2003, doi: 10.1109/TSA.2003.815516.

[41] S. Godsill and M. Davy, “Bayesian computational models for inharmonicity in musical instruments,” in *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2005.*, New Paltz, NY, USA: IEEE, 2005, pp. 283–286. doi: 10.1109/ASPAA.2005.1540225.

[42] F. Rigaud, B. David, and L. Daudet, “A parametric model and estimation techniques for the inharmonicity and tuning of the piano,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 133, no. 5, pp. 3107–3118, May 2013, doi: 10.1121/1.4799806.

[43] S. Dixon, M. Mauch, and D. Tidhar, “Estimation of harpsichord inharmonicity and temperament from musical recordings,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 131, no. 1, pp. 878–887, Jan. 2012, doi: 10.1121/1.3651238.

[44] J. Rauhala, H.-M. Lehtonen, and V. Välimäki, “Fast automatic inharmonicity estimation algorithm,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 121, no. 5, pp. EL184–EL189, May 2007, doi: 10.1121/1.2719043.

[45] J. Rauhala and V. Välimäk, “F0 estimation of inharmonic piano tones using partial frequencies deviation method,” presented at the International Computer Music Conference ICMC, 2007.

[46] T. Miljković, J. Damnjanović, J. Ćertić, and D. Šumarac Pavlović, “Uticaj estimacije frekvencija harmonika na procenu koeficijenta inharmoničnosti čembala,” Etno selo Stanišić: Društvo za Etran, 2021.

[47] T. Miljković, M. Bjelić, J. Ćertić, and D. Šumarac Pavlović, “Koeficijent inharmoničnosti tonova harfe- Specifičnost i problemi automatske procene,” presented at the 66. Konferencije ETRAN, Novi Pazar, Srbija, 2022.

[48] T. Miljković, M. Bjelić, D. Šumarac Pavlović, and J. Ćertić, “Analiza algoritma za procenu koeficijenta inharmoničnosti različitih klavira,” in *Zbornik radova 64. Konferencije ETRAN*, Beograd, 2020.

[49] D. Despić, *Muzički instrumenti*. Univerzitet umetnosti Beograd, Beograd.

[50] N. H. Fletcher, T. D. Rossing, and R. M. Williamson, “*The Physics of Musical Instruments*,” *Am. J. Phys.*, vol. 59, no. 10, pp. 959–959, Oct. 1991, doi: 10.1119/1.16685.

[51] V. Bucur, *Handbook of Materials for String Musical Instruments*. Cham: Springer International Publishing AG, 2016.

[52] “Press photos.” Accessed: Sept. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.bechstein.com/en/press-area/press-photos/

[53] H. A. Conklin, “Design and tone in the mechanoacoustic piano. Part I. Piano hammers and tonal effects,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 99, no. 6, pp. 3286–3296, June 1996, doi: 10.1121/1.414947.

[54] J. Ćertić, D. Šumarac Pavlović, and I. Salom, “Softverski paket za obradu i analizu audio signala,” presented at the Telfor, Društvo za Telekomunikacije, 2010, pp. 1269–1272.

[55] *Specification for Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and Digital Filters*, ANSI S1.11-2004. [Online]. Available: https://webstore.ansi.org/standards/asa/ansis1112004?srsltid=AfmBOor13Q-phFW2q75Jx-_KeBV-BEfckG7gfFHiGPeAMmXpjtx6d7qn

[56] A. Bond, *A guide to the harpsichord*. Portland (Or.): Amadeus press, 1997.

[57] H. Fletcher, “Analysis of the design and performance of harpsichors,” *Acustica*, vol. 3, 1977.

[58] “Aoyama | Affairs of the Harp.” Accessed: Sept. 22, 2025. [Online]. Available: https://affairsoftheharp.com/aoyama-49/

[59] J.-L. Le Carrou, F. Gautier, and E. Foltête, “Experimental study of A0 and T1 modes of the concert harp,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 121, no. 1, pp. 559–567, Jan. 2007, doi: 10.1121/1.2384842.

[60] J.-L. Le Carrou, F. Gautier, and R. Badeau, “Sympathetic String Modes in the Concert Harp,” *Acta Acust. United Acust.*, vol. 95, no. 4, pp. 744–752, July 2009, doi: 10.3813/AAA.918202.

[61] J.-L. Le Carrou, F. Gautier, N. Dauchez, and J. Gilbert, “Modelling of sympathetic string vibrations,” *Acta AcusticaAcustica*, vol. 91, no. 277–288.

[62] D. Chadefaux, J.-L. Le Carrou, and B. Fabre, “A model of harp plucking,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 133, no. 4, pp. 2444–2455, Apr. 2013, doi: 10.1121/1.4792249.

[63] J. Chabassier and M. Duruflé, “Physical parameters for piano modeling,” RT-0425, 2012.

[64] *Standard Specification for Steel Wire, Music Spring Quality*, A 228/A 228M – 02, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

[65] “Original Instrument Report: DOUBLE-MANUAL HARPSICHORD, Jacob and Abraham Kirckman, London 1775,” 2022. [Online]. Available: https://hpschd.nu/index.html?nav/nav-1.html&t/welcome.html&https://hpschd.nu/cln/kirckman-1775.html

[66] "Music Wire." Accessed: Sept. 23, 2025. [Online]. Available: https://www.suhm.net/wp-content/uploads/2015/09/Music_Wire-EN-US_v2.html?utm_source=chatgpt.com

[67] P. L. Søndergaard, B. Torrésani, and P. Balazs, "THE LINEAR TIME FREQUENCY ANALYSIS TOOLBOX," *Int. J. Wavelets Multiresolution Inf. Process.*, vol. 10, no. 04, p. 1250032, July 2012, doi: 10.1142/S0219691312500324.

[68] D. Bogdanov *et al.*, "ESSENTIA: an open-source library for sound and music analysis," in *Proceedings of the 21st ACM international conference on Multimedia*, Barcelona Spain: ACM, Oct. 2013, pp. 855–858. doi: 10.1145/2502081.2502229.

[69] O. Lartillot, P. Toiviainen, and T. Eerola, "A Matlab Toolbox for Music Information Retrieval," in *Data Analysis, Machine Learning and Applications*, C. Preisach, H. Burkhardt, L. Schmidt-Thieme, and R. Decker, Eds., in Studies in Classification, Data Analysis, and Knowledge Organization. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 261–268. doi: 10.1007/978-3-540-78246-9_31.

[70] T. Miljković, J. Ćertić, M. Bjelić, and D. Š. Pavlović, "Digital Signal Processing of the Inharmonic Complex Tone," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 15, p. 8293, July 2025, doi: 10.3390/app15158293.

[71] J. O. Smith, *Spectral Audio Signal Processing*. Accessed: Sept. 21, 2025. [Online]. Available: http://ccrma.stanford.edu/~jos/sasp/

[72] J. O. Smith, *Introduction to Digital Filters: With Audio Applications*. Accessed: Sept. 21, 2025. [Online]. Available: https://ccrma.stanford.edu/%7Ejos/filters/

[73] J. D. Ćertić and L. D. Milić, "Investigation of computationally efficient complementary IIR filter pairs with tunable crossover frequency," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 65, no. 5, pp. 419–428, May 2011, doi: 10.1016/j.aeue.2010.05.004.

[74] B. Ország and L. Sujbert, "A Novel Nonuniform Filter Bank Design Method," in *2024 25th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Krynica Zdrój, Poland: IEEE, May 2024, pp. 01–04. doi: 10.1109/ICCC62069.2024.10569348.

[75] J. Ćertić, D. Šumarac Pavlović, and I. Salom, "Nonuniform complementary filter bank for analysis of audio signals," presented at the Forum Acusticum, Alborg, Denmark, 2011.

[76] B. Djokic, M. Popovic, and M. Lutovac, "A new improvement to the Powell and Chau linear phase IIR filters," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 46, no. 6, pp. 1685–1688, June 1998, doi: 10.1109/78.678492.

[77] S. R. Powell and P. M. Chau, "A technique for realizing linear phase IIR filters," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 39, no. 11, pp. 2425–2435, Nov. 1991, doi: 10.1109/78.97998.

[78] J. Kormylo and V. Jain, "Two-pass recursive digital filter with zero phase shift," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, vol. 22, no. 5, pp. 384–387, Oct. 1974, doi: 10.1109/TASSP.1974.1162602.

[79] R. G. Lyons, *Understanding digital signal processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2011.

[80] L. Milic, S. Damjanovic, and M. Nikolic, "Frequency Transformations of IIR Filters with Filter Bank Applications," in *APCCAS 2006 - 2006 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*, Singapore: IEEE, Dec. 2006, pp. 1051–1054. doi: 10.1109/APCCAS.2006.342269.

[81] L. D. Milić and M. D. Lutovac, “Efficient Algorithm for the Design of High-Speed Elliptic IIR Filters,” *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 57, no. 4, pp. 255–262, Jan. 2003, doi: 10.1078/1434-8411-54100168.

[82] G. Jovanovic-Dolecek and IGI Global, Eds., *Multirate systems: design and applications*. Hershey, Pa: IGI Global (701 E. Chocolate Avenue, Hershey, Pennsylvania, 17033, USA), 2002. doi: 10.4018/978-1-93070-830-3.

[83] A. G. Constantinides, “Spectral transformations for digital filters,” *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 117, no. 8, p. 1585, 1970, doi: 10.1049/piee.1970.0281.

[84] M. Caetano and X. Rodet, “Improved estimation of the amplitude envelope of time-domain signals using true envelope cepstral smoothing,” in *2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Prague, Czech Republic: IEEE, May 2011, pp. 4244–4247. doi: 10.1109/ICASSP.2011.5947290.

[85] *MATLAB Fit Function*. Accessed: Sept. 21, 2025. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/curvefit/fit.html

[86] K. Jensen, “Envelope Model of Isolated Musical Sounds,” in *Proceedings of the 2nd COST G-6 Workshop on Digital Audio Effects (DAFx99)*, Trondheim, Norway, Dec. 1999.

[87] A. D. Bernstein and E. D. Cooper, “Piecewise-Linear Technique of Electronic Music Synthesis,” *AES J Audio Eng Soc*, vol. 24, pp. 446–454, 1976.

[88] J. Rauhala, H.-M. Lehtonen, and V. Välimäki, “Fast automatic inharmonicity estimation algorithm,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 121, no. 5, pp. EL184–EL189, May 2007, doi: 10.1121/1.2719043.

[89] K. H. Arehart, J. M. Kates, and M. C. Anderson, “Effects of noise, nonlinear processing, and linear filtering on perceived music quality,” *Int. J. Audiol.*, vol. 50, no. 3, pp. 177–190, Mar. 2011, doi: 10.3109/14992027.2010.539273.

[90] T. Miljković, M. Bjelić, D. Šumarac Pavlović, J. Cincović, and D. Drašković, “Open data portal for audio files based on microservice architecture,” presented at the 2th International Conference on Information Society and Technology, Kopaonik: Information Society of Serbia - ISOS, 2022, pp. 145–148.

[91] “Technical documents of the manufacturer.” Accessed: Sept. 21, 2025. [Online]. Available: https://www.nti-audio.com/en/products/measurement-microphones

[92] “Technical documents of the manufacturer.” Accessed: Sept. 21, 2025. [Online]. Available: https://download.steinberg.net/downloads_hardware/UR22/UR22_documentation/UR22_Operation Manual_en.pdf

[93] “Technical documents of the manufacturer.” Accessed: Sept. 21, 2025. [Online]. Available: https://usa.yamaha.com/products/musical_instruments/pianos/grand_pianos/index.html

[94] “Technical documents of the manufacturer.” Accessed: Sept. 21, 2025. [Online]. Available: https://www.lyonhealy.com/harps/style-23-bronze

[95] “Freesound audio dataset.” Accessed: Sept. 21, 2025. [Online]. Available: https://freesound.org/

[96] G. Blinowski, A. Ojdowska, and A. Przybylek, “Monolithic vs. Microservice Architecture: A Performance and Scalability Evaluation,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 20357–20374, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3152803.

[97] T. Miljković, M. Bjelić, J. Ćertić, and D. Šumarac Pavlović, “Estimation of harp string inharmonicity influenced by phantom partials,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 158, no. 4, pp. 3187–3202, Oct. 2025, doi: 10.1121/10.0039660.

[98] W. Waltham, “Harp design and construction,” presented at the ASA/CAA ‘05 Meeting, 2005.

[99] J. Woodhouse and N. Lynch-Aird, “Choosing Strings for Plucked Musical Instruments,” *Acta Acust. United Acust.*, vol. 105, no. 3, pp. 516–529, May 2019, doi: 10.3813/AAA.919333.

[100] T. Miljković, Ć. Jelena, and D. Šumarac Pavlović, “Subjektivna ocena različitih metoda sinteze muzičkih tonova sa izraženom inharmonič inharmoničnošću,” in *ZBORNIK RADOVA, LXVII KONFERENCIJA ETRAN*, Istočno Sarajevo.

[101] “Technical documents of the manufacturer.” Accessed: Sept. 26, 2025. [Online]. Available: https://www.akg.com/on/demandware.static/-/Sites-masterCatalog_Harman/default/dwca0895af/pdfs/AKG_K92_Cutsheet.pdf

[102] L. Leventhal and C. Huyn, “Analyzing listening tests with the directional two-tailed test,” *J. AUDIO Eng. Soc.*, vol. 44, no. 10, pp. 850–563, 1996.

[103] J. A. Gubner, *Probability and random processes for electrical and computer engineers*, 3. printing. Cambridge: Univ. Press, 2010.

[104] V. Voinov, *Chi-squared goodness of fit tests with applications*. Amsterdam: Academic Press, 2013.

[105] L. Leventhal, “Type 1 And Type 2 Errors In The Statistical Analysis Of Listening Tests,” *J. AUDIO Eng. Soc.*, vol. 34, pp. 437–453, 1986.

[106] D. D. Wackerly, W. Mendenhall, and R. L. Scheaffer, *Mathematical statistics with applications*, Seventh edition. Belmont, CA, Australia: Thomson Brooks/Cole ; Cengage, 2008.

[107] D. W. Hosmer and S. Lemesbow, “Goodness of fit tests for the multiple logistic regression model,” *Commun. Stat. - Theory Methods*, vol. 9, no. 10, pp. 1043–1069, 1980, doi: 10.1080/03610928008827941.

[108] *Method for objective measurements of perceived audio quality*, Recommendation BS.1387-2, 2023.

[109] J. Van Doorn, A. Ly, M. Marsman, and E.-J. Wagenmakers, “Bayesian rank-based hypothesis testing for the rank sum test, the signed rank test, and Spearman’s ρ,” *J. Appl. Stat.*, vol. 47, no. 16, pp. 2984–3006, Dec. 2020, doi: 10.1080/02664763.2019.1709053.

[110] l. Harris, and k. Holland, “Using statistics to analyse listening test data: some sources and advice for non-statisticians,” presented at the 25th Conference on Reproduced Sound: The Audio Explosion, Institute of Acoustics, Brighton, UK: Institute of Acoustics, Nov. 2009, pp. 294–309.

[111] H. von Helmholtz, H. Margenau, and H. von Helmholtz, *On the sensations of tone*, Unabr. and Unalt. republ. of the 2. (1885) ed. in Dover histories, biographies and classics of mathematics and the physical sciences. New York: Dover, 1954.

[112] H. Fastl, H. Fastl, and E. Zwicker, *Psychoacoustics: facts and models*, 3rd ed. in Springer series in information sciences, no. 22. Berlin New York: Springer, 2007.

[113] *Counterpoint, the polyphonic vocal style of the sixteenth century*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1965.

[114] E. Aldwell, C. Schachter, and A. C. Cadwallader, *Harmony & voice leading*, 4th ed. Boston, MA: Schirmer/Cengage Learning, 2011.

[115] W. Hutchinson and L. Knopoff, "The acoustic component of western consonance," *Interface*, vol. 7, no. 1, pp. 1–29, May 1978, doi: 10.1080/09298217808570246.

[116] E. Zwicker, G. Flottorp, and S. S. Stevens, "Critical Band Width in Loudness Summation," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 29, no. 5, pp. 548–557, May 1957, doi: 10.1121/1.1908963.

[117] W. A. Sethares, "Local consonance and the relationship between timbre and scale," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 94, no. 3, pp. 1218–1228, Sept. 1993, doi: 10.1121/1.408175.

[118] A. Bernini and F. Talamucci, "Consonance of Complex Tones with Harmonics of Different Intensity," *Open J. Acoust.*, vol. 04, no. 02, pp. 78–89, 2014, doi: 10.4236/oja.2014.42008.

[119] M. Mijić, *Audio sistemi*. Akademska misao, 2011.

[120] J. G. Roederer, *Introduction to the Physics and Psychophysics of Music*, 2nd ed. in Heidelberg Science Library. New York, NY: Springer New York, 1978.

[121] W. A. Sethares, *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale*, 2nd ed. Heidelberg Boulder: Physica-Verlag NetLibrary, Inc. [distributor].

[122] "Technical documents of the manufacturer." 2025. Accessed: Sept. 29, 2025. [Online]. Available: https://www.behringer.com/wing/wing-compact.html

[123] "Technical documents of the manufacturer." 2025. Accessed: Sept. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.focal.com/products/solo-6

10 Prilozi

P.1 Fizički parametri žica muzičkih instrumenata

Tabela 10.1. Fizički parametri žica klavira korišćeni za proračun

Ton	Osnovna frekvencija (Hz)	Dužina (m)	Debljina (mm)	Gustina (kg/m3)	Tenzija (N)	Young-ov moduo (Gpa)
01 - A0	27.5	2.049	1.650	78835.23	1130	202
02 -Ais0	29.135	2.049	1.650	71041.04	1404.78	202
03 - H0	30.867	2.048	1.650	63898.28	1597.18	202
04 - C1	32.85	2.007	1.620	57787	1722	202
05 - Cis1	34.73	1.997	1.600	52229	1788	202
06 - D1	36.79	1.981	1.550	47494	1798	202
07 - Dis1	38.98	1.981	1.506	47494	1773	202
08 - E1	41.3	1.938	1.460	39737	1703	202
09 - F1	43.75	1.911	1.419	36571	1618	202
10 - Fis1	46.35	1.879	1.370	33851	1515	202
11 - G1	49.1	1.842	1.316	31521	1404	202
12 - Gis1	52.03	1.805	1.262	29376	1297	202
13 - A1	55.13	1.762	1.207	27588	1190	202
14 - Ais1	58.4	1.709	1.148	26243	1083	202
15 - H1	61.88	1.655	1.096	25043	991	202
16 - C2	65.56	1.602	1.051	23919	915	202
17 - Cis2	69.45	1.548	1.012	22925	853	202
18 - D2	73.58	1.495	0.982	21997	807	202
19 - Dis2	77.96	1.442	0.960	21160	774	202
20 - E2	82.59	1.378	0.937	20738	741	202
21 - F2	87.51	1.837	1.117	7887	799	202
22 - Fis2	92.71	1.757	1.108	7734	791	202
23 - G2	98.22	1.66	1.091	7772	773	202
24 - Gis2	104.06	1.591	1.095	7589	783	202
25 - A2	110.25	1.482	1.071	7850	754	202
26 - Ais2	116.81	1.403	1.067	7850	754	202
27 - H2	123.75	1.329	1.065	7850	756	202
28 - C3	131.11	1.259	1.063	7850	759	202
29 - Cis3	138.9	1.192	1.061	7850	762	202
30 - D3	147.17	1.129	1.059	7850	764	202
31 - Dis3	155.91	1.07	1.057	7850	766	202
32 - E3	165.19	1.013	1.053	7850	767	202
33 - F3	175.01	0.960	1.049	7850	766	202
34 - Fis3	185.41	0.909	1.045	7850	765	202
35 - G3	196.45	0.861	1.039	7850	763	202
36 - Gis3	208.12	0.816	1.033	7850	759	202

37 -A3	220.49	0.773	1.027	7850	755	202
38 - Ais3	233.62	0.732	1.020	7850	751	202
39 - H3	247.52	0.694	1.013	7850	746	202
40 - C4	262.22	0.657	1.006	7850	741	202
41 - Cis4	277.81	0.622	0.999	7850	735	202
42 - D4	294.34	0.590	0.991	7850	730	202
43 - Dis4	311.82	0.559	0.984	7850	725	202
44 - E4	330.36	0.529	0.977	7850	720	202
45 - F4	350.05	0.501	0.970	7850	715	202
46 - Fis4	370.8	0.475	0.964	7850	711	202
47 - G4	392.87	0.450	0.958	7850	707	202
48 - Gis4	416.26	0.426	0.952	7850	704	202
49 - A4	441	0.404	0.947	7850	701	202
50 - Ais4	467.19	0.383	0.941	7850	699	202
51 - H4	494.96	0.363	0.937	7850	697	202
52 - C5	524.48	0.344	0.932	7850	696	202
53 - Cis5	555.6	0.326	0.928	7850	695	202
54 - D5	588.66	0.308	0.924	7850	694	202
55 - Dis5	623.69	0.292	0.921	7850	694	202
56 - E5	660.69	0.277	0.917	7850	694	202
57 - F5	699.91	0.262	0.914	7850	694	202
58 - Fis5	741.65	0.249	0.910	7850	695	202
59 - G5	785.63	0.236	0.907	7850	695	202
60 - Gis5	832.54	0.223	0.904	7850	696	202
61 - A5	882.06	0.211	0.901	7850	697	202
62 - Ais5	934.6	0.200	0.898	7850	697	202
63 - H5	990.2	0.190	0.894	7850	697	202
64 - C6	1048.83	0.180	0.891	7850	697	202
65 - Cis6	1111.06	0.171	0.887	7850	697	202
66 - D6	1177.66	0.162	0.883	7850	697	202
67 - Dis6	1247.25	0.153	0.879	7850	696	202
68 - E6	1321.31	0.145	0.875	7850	695	202
69 - F6	1399.97	0.138	0.870	7850	693	202
70 - Fis6	1483.31	0.130	0.866	7850	691	202
71 - G6	1571.35	0.124	0.860	7850	689	202
72 - Gis6	1665.41	0.117	0.855	7850	686	202
73 - A6	1764.21	0.111	0.850	7850	683	202
74 - Ais6	1869.22	0.105	0.844	7850	679	202
75 - H6	1980.57	0.100	0.837	7850	674	202
76 - C7	2098.32	0.095	0.831	7850	670	202
77 - Cis7	2222.39	0.090	0.824	7850	664	202
78 - D7	2355.34	0.085	0.817	7850	659	202
79 - Dis7	2494.63	0.081	0.810	7850	652	202
80 - E7	2643.17	0.076	0.802	7850	646	202

81 - F7	2801.35	0.072	0.795	7850	639	202
82 - Fis7	2965.15	0.069	0.787	7850	631	202
83 - G7	3142.89	0.065	0.778	7850	623	202
84 - Gis7	3330.76	0.062	0.770	7850	615	202
85 - A7	3528.57	0.058	0.761	7850	606	202
86 - Ais7	3735.94	0.055	0.752	7850	598	202
87 - H7	3959.63	0.052	0.743	7850	588	202
88 - C8	4186.01	0.049	0.736	7850	576	202

Tabela 10.2. Fizički parametri žica čembala za registar 1 korišćeni za proračun

Ton	**Osnovna frekvencija (Hz)**	**Dužina (m)**	**Debljina (m)**	**Gustina (kg/m3)**	**Tenzija (N)**	**Young-ov moduo (Gpa)**
01 - F#1	43.62	1.826	0.635	8746	60.27	100
02 - G1	46.22	1.803	0.635	8746	76.9	100
03 - G#1	48.96	1.780	0.635	8746	94.16	100
04 - A1	51.88	1.758	0.635	8746	108.1	100
05 - A#1	54.96	1.735	0.559	8746	78.05	100
06 - H1	58.23	1.714	0.559	8746	95.42	100
07 - C2	61.69	1.692	0.508	8746	77.25	100
08 - C#2	65.36	1.641	0.508	8746	91.53	100
09 - D2	69.24	1.591	0.457	8470	70.5	100
10 - D#2	73.36	1.543	0.457	8470	80.24	100
11 - E2	77.72	1.496	0.457	8470	89.18	100
12 - F2	82.35	1.450	0.457	8470	102.34	100
13 - F#2	87.24	1.406	0.406	8470	73.16	100
14 - G2	92.43	1.364	0.406	8470	85.83	100
15 - G#2	97.93	1.322	0.406	8470	92.69	100
16 - A2	103.75	1.282	0.356	8470	59.55	100
17 - A#2	109.92	1.243	0.356	8470	62.84	100
18 - H2	116.46	1.206	0.356	8470	66.32	100
19 - C3	123.38	1.169	0.356	8470	64.87	100
20 - C#3	130.72	1.117	0.356	7850	66.48	200
21 - D3	138.49	1.067	0.330	7850	55.74	200
22 - D#3	146.72	1.020	0.330	7850	60.2	200
23 - E3	155.45	0.974	0.330	7850	64.69	200
24 - F3	164.69	0.931	0.305	7850	50.87	200
25 - F#3	174.49	0.890	0.305	7850	55.2	200
26 - G3	184.86	0.850	0.305	7850	56.57	200
27 - G#3	195.85	0.812	0.305	7850	57.98	200
28 - A#3	207.5	0.776	0.279	7850	56.92	200
29 - A3	219.84	0.742	0.279	7850	61.16	200
30 - H3	232.91	0.709	0.254	7850	43.33	200

31 - C4	246.76	0.677	0.254	7850	44.4	200
32 - C#4	261.43	0.640	0.254	7850	44.52	200
33 - D4	276.98	0.605	0.254	7850	44.64	200
34 - D#4	293.45	0.572	0.254	7850	44.76	200
35 - E4	310.9	0.540	0.254	7850	44.88	200
36 - F4	329.39	0.511	0.254	7850	45	200
37 - F#4	348.97	0.483	0.254	7850	45.12	200
38 - G4	369.72	0.456	0.229	7850	36.65	200
39 - G#4	391.71	0.431	0.229	7850	36.75	200
40 - A4	415	0.407	0.229	7850	36.85	200
41 - A#4	439.68	0.385	0.229	7850	36.95	200
42 - H4	465.82	0.364	0.229	7850	37.05	200
43 - C5	493.52	0.344	0.229	7850	37.14	200
44 - C#5	522.87	0.325	0.229	7850	37.22	200
45 - D5	553.96	0.307	0.229	7850	37.29	200
46 - D#5	586.9	0.290	0.229	7850	37.36	200
47 - E5	621.8	0.274	0.229	7850	37.43	200
48 - F5	658.77	0.259	0.229	7850	37.5	200
49 - F#5	697.94	0.245	0.229	7850	37.58	200
50 - G5	739.45	0.231	0.229	7850	37.65	200
51 - G#5	783.42	0.218	0.229	7850	37.72	200
52 - A5	830	0.206	0.229	7850	37.79	200
53 - A#5	879.35	0.195	0.229	7850	37.87	200
54 - H5	931.64	0.184	0.229	7850	37.94	200
55 - C6	987.04	0.174	0.203	7850	30.04	200
56 - C#6	1045.73	0.165	0.203	7850	30.46	200
57 - D6	1107.92	0.157	0.203	7850	30.89	200
58 - D#6	1173.8	0.149	0.203	7850	31.33	200
59 - E6	1243.59	0.142	0.203	7850	31.77	200
60 - F6	1317.54	0.135	0.203	7850	32.22	200
61 - F#6	1395.89	0.128	0.203	7850	32.67	200

Tabela 10.3. Fizički parametri otvorene žica harfe korišćeni za proračun

Ton	**Osnovna frekvencija (Hz)**	**Dužina (m)**	**Debljina (m)**	**Gustina (kg/m3)**	**Tenzija (N)**	**Young-ov moduo (Gpa)**
Es1	38.89	149.5	2.650	7400	551.88	6.0
Fes1	41.20	146.5	2.521	7400	538.19	5.8
Ges1	46.25	143.5	2.395	7400	587.25	5.8
As1	51.91	142.3	2.272	7400	654.66	7.8
B1	58.27	138	2.152	7400	696.10	8.8
Ces2	61.74	135	2.035	7400	668.92	13.8
Des2	69.30	131.5	1.922	7400	712.83	15.8

Es2	77.78	127	1.811	7400	743.99	16.5
Fes2	82.41	123	1.704	7400	693.26	16.2
Ges2	92.50	118.5	1.599	7400	714.47	15.8
As2	103.83	113.5	2.183	1320	274.50	7.2
B2	116.54	108.5	2.089	1320	289.37	7.5
Ces3	123.47	102.5	1.998	1320	265.10	7.1
Des3	138.59	96	1.909	1320	267.60	7.1
Es3	155.56	91	1.824	1320	276.34	8.0
Fes3	164.81	82.7	1.741	1320	233.40	7.2
Ges3	185.00	76.2	1.660	1320	227.21	7.6
As3	207.65	69	1.583	1320	213.34	7.2
B3	233.08	63.5	1.508	1320	206.69	7.5
Ces4	246.94	59.2	1.437	1320	182.89	7.0
Des4	277.18	53.5	1.367	1320	170.53	7.0
Es4	311.13	50.5	1.301	1320	173.33	7.9
Fes4	329.63	46.5	1.238	1320	149.25	7.2
Ges4	369.99	43.4	1.177	1320	148.11	8.1
As4	415.30	40	1.119	1320	143.29	8.1
B4	466.16	37.3	1.064	1320	141.89	8.8
Ces5	493.88	34.4	1.011	1320	122.44	7.8
Des5	554.37	31.8	0.962	1320	119.21	8.0
Es5	622.25	29.5	0.915	1320	116.97	8.2
Fes5	659.25	27.2	0.871	1320	101.12	7.5
Ges5	739.99	25	0.830	1320	97.67	7.5
As5	830.61	23.2	0.791	1320	96.36	8.1
B5	932.33	21.4	0.755	1320	94.17	8.1
Ces6	987.77	19.7	0.722	1320	81.93	7.8
Des6	1108.73	18	0.692	1320	79.13	8.8
Es6	1244.51	16.8	0.665	1320	80.10	10

P.2 Koeficijent inharmoničnosti za tonove muzičkih instrumenata

Tabela 10.4. Koeficijenti inharmoničnosti tonova klavira (PFD, mPFD i proračun)

Ton	PFD	Modifikovani PFD	Proračun	Broj harmonika
01 - A0	1.35E-04	1.40E-04	1.53E-04	60
02 -A#0	1.26E-04	1.26E-04	1.23E-04	60
03 - H0	1.01E-04	1.07E-04	1.08E-04	60
04 - C1	1.10E-04	9.57E-05	9.72E-05	60
05 - C#1	8.77E-05	9.01E-05	8.99E-05	60
06 - D1	8.50E-05	8.13E-05	8.01E-05	60
07 - D#1	7.37E-05	7.07E-05	7.24E-05	60
08 - E1	8.06E-05	7.23E-05	6.95E-05	60
09 - F1	7.13E-05	6.78E-05	6.72E-05	60
10 - F#1	7.52E-05	6.36E-05	6.45E-05	60
11 - G1	6.33E-05	5.94E-05	6.16E-05	60
12 - G#1	6.41E-05	5.74E-05	5.87E-05	60
13 - A1	6.75E-05	5.32E-05	5.62E-05	40
14 - A#1	7.02E-05	5.81E-05	5.37E-05	40
15 - H1	5.73E-05	5.41E-05	5.20E-05	40
16 - C2	6.74E-05	6.63E-05	5.08E-05	40
17 - C#2	7.02E-05	6.60E-05	5.02E-05	40
18 - D2	7.69E-05	7.52E-05	5.05E-05	40
19 - D#2	7.58E-05	7.58E-05	5.16E-05	40
20 - E2	7.72E-05	7.10E-05	5.36E-05	40
21 - F2	7.80E-05	7.80E-05	5.65E-05	40
22 - F#2	9.12E-05	9.29E-05	6.04E-05	40
23 - G2	9.36E-05	9.36E-05	6.51E-05	40
24 - G#2	7.74E-05	7.64E-05	7.10E-05	40
25 - A2	7.72E-05	7.72E-05	7.78E-05	40
26 - A#2	8.87E-05	8.78E-05	8.55E-05	40
27 - H2	9.92E-05	9.92E-05	9.43E-05	40
28 - C3	0.000108964	0.000108964	0.000104	40
29 - C#3	0.000120464	0.000116318	0.000115	40
30 - D3	0.000134548	0.000122511	0.000126	40
31 - D#3	0.000143907	1.38E-04	0.000139	40
32 - E3	0.000157746	0.000157204	0.000153	40
33 - F3	0.000169407	0.000169407	0.000168	40
34 - F#3	0.000191502	1.84E-04	0.000185	30
35 - G3	0.000200454	0.000200454	0.000202	30
36 - G#3	0.000222412	0.000222412	0.00022	30
37 -A3	0.000241941	0.000241941	0.000241	30
38 - A#3	0.000259626	0.000259626	0.000263	30
39 - H3	0.00029875	0.000285153	0.000287	30

40 - C4	0.000329006	0.000317346	0.000313	15
41 - C#4	0.000325548	0.000335488	0.000343	15
42 - D4	0.000367564	0.000368273	0.000371	15
43 - D#4	0.000421097	0.000403032	0.000405	15
44 - E4	0.000471827	0.000448202	0.000443	15
45 - F4	0.000461789	0.000461789	0.000483	15
46 - F#4	0.000551773	0.000540358	0.000527	15
47 - G4	0.000560192	0.000560192	0.000576	12
48 - G#4	0.000605742	0.000623239	0.000629	12
49 - A4	0.000692384	0.000692384	0.000688	12
50 - A#4	0.000735523	7.40E-04	0.000748	12
51 - H4	0.000792721	0.000792721	0.000821	12
52 - C5	0.000907693	8.93E-04	0.000897	10
53 - C#5	0.000914608	0.000914608	0.000983	10
54 - D5	0.00100359	0.00100359	0.001084	8
55 - D#5	0.001228336	0.001228336	0.00119	8
56 - E5	0.001255432	0.001255432	0.0013	8
57 - F5	0.001352514	0.001352514	0.001434	8
58 - F#5	0.001437172	0.001437172	0.001557	8
59 - G5	0.001526728	0.001526728	0.001711	8
60 - G#5	0.001650477	1.92E-03	0.001888	6
61 - A5	0.00195544	1.98E-03	0.002078	6
62 - A#5	0.002030388	0.002030406	0.002283	6
63 - H5	0.002636363	0.002636363	0.002484	6
64 - C6	0.002601376	0.002601376	0.002731	6
65 - C#6	0.002863202	0.002953396	0.002972	6
66 - D6	0.002863202	0.003194214	0.003252	5
67 - D#6	0.003236009	3.64E-03	0.003586	5
68 - E6	0.003357974	0.003357974	0.003926	5
69 - F6	0.004749075	0.003916614	0.004248	5
70 - F#6	0.003986727	4.79E-03	0.004713	5
71 - G6	0.004991935	0.004991935	0.005053	5
72 - G#6	0.005087952	0.005087952	0.005569	5
73 - A6	0.006045937	0.006045937	0.006071	5
74 - A#6	0.00662867	0.00662867	0.006633	5
75 - H6	0.007277918	0.007277918	0.007126	4
76 - C7	0.008172186	0.008172186	0.007718	4
77 - C#7	0.008416598	0.008416598	0.008388	4
78 - D7	0.008862797	0.008862797	0.009158	4
79 - D#7	0.00935095	0.00935095	0.009848	4
80 - E7	0.008728065	0.009972899	0.010851	4
81 - F7	0.01147764	0.01147764	0.011801	4
82 - F#7	0.012455242	0.012455242	0.012497	3
83 - G7	0.012471006	0.013636144	0.013621	4

84 - G#7	0.012779728	0.012779728	0.014552	3
85 - A7	0.016628549	0.016628549	0.0161	3
86 - A#7	0.017515246	0.017515246	0.017301	3
87 - H7	0.020484379	0.019211519	0.018758	3
88 - C8	0.020899554	0.020899554	0.020764	3

Tabela 10.5. Koeficijenti inharmoničnosti tonova čembala (PFD, mPFD i proračun)

Ton	PFD	Modifikovani PFD	Proračun	Broj harmonika
01 - F#1	4.47E-05	4.27E-05	3.92E-05	100
02 - G1	4.37E-05	3.80E-05	3.15E-05	100
03 - G#1	3.14E-05	2.78E-05	2.64E-05	100
04 - A1	3.11E-05	3.01E-05	2.36E-05	100
05 - A#1	2.17E-05	2.03E-05	2.01E-05	100
06 - H1	2.19E-05	1.36E-05	1.69E-05	100
07 - C2	1.64E-05	1.45E-05	1.46E-05	100
08 - C#2	1.58E-05	1.28E-05	1.31E-05	100
09 - D2	1.53E-05	1.11E-05	1.18E-05	100
10 - D#2	1.56E-05	1.38E-05	1.11E-05	100
11 - E2	1.09E-05	1.09E-05	1.06E-05	100
12 - F2	1.14E-05	9.82E-06	9.82E-06	80
13 - F#2	1.20E-05	1.01E-05	9.10E-06	80
14 - G2	9.00E-06	8.28E-06	8.25E-06	80
15 - G#2	8.66E-06	8.18E-06	8.12E-06	80
16 - A2	8.72E-06	8.13E-06	7.95E-06	80
17 - A#2	9.13E-06	8.21E-06	8.01E-06	80
18 - H2	9.24E-06	8.29E-06	8.07E-06	80
19 - C3	9.21E-06	8.66E-06	8.78E-06	80
20 - C#3	2.31E-05	2.06E-05	1.88E-05	80
21 - D3	2.40E-05	1.78E-05	1.81E-05	80
22 - D#3	1.96E-05	1.81E-05	1.84E-05	80
23 - E3	2.17E-05	1.95E-05	1.87E-05	80
24 - F3	1.99E-05	1.87E-05	1.90E-05	80
25 - F#3	2.13E-05	2.04E-05	1.92E-05	60
26 - G3	2.19E-05	2.03E-05	2.05E-05	60
27 - G#3	2.38E-05	2.34E-05	2.19E-05	60
28 - A#3	2.01E-05	1.72E-05	1.71E-05	60
29 - A3	2.45E-05	2.19E-05	1.75E-05	60
30 - H3	2.42E-05	2.06E-05	1.85E-05	60
31 - C4	2.41E-05	2.13E-05	1.98E-05	60
32 - C#4	2.80E-05	2.17E-05	2.21E-05	60
33 - D4	2.91E-05	2.70E-05	2.47E-05	60
34 - D#4	3.26E-05	2.60E-05	2.76E-05	60
35 - E4	3.03E-05	3.12E-05	3.08E-05	60

36 - F4	3.44E-05	3.44E-05	3.44E-05	60
37 - F#4	3.86E-05	3.86E-05	3.84E-05	40
38 - G4	3.90E-05	3.90E-05	3.49E-05	40
39 - G#4	4.90E-05	4.73E-05	3.90E-05	40
40 - A4	5.37E-05	4.93E-05	4.36E-05	40
41 - A#4	5.90E-05	4.87E-05	4.86E-05	40
42 - H4	6.62E-05	6.20E-05	5.43E-05	40
43 - C5	6.24E-05	6.24E-05	6.06E-05	40
44 - C#5	6.21E-05	6.87E-05	6.78E-05	40
45 - D5	9.40E-05	8.74E-05	7.58E-05	40
46 - D#5	1.07E-04	1.07E-04	8.47E-05	40
47 - E5	9.04E-05	9.05E-05	9.48E-05	40
48 - F5	9.78E-05	9.94E-05	1.06E-04	40
49 - F#5	1.08E-04	1.19E-04	1.18E-04	40
50 - G5	1.29E-04	1.30E-04	1.32E-04	40
51 - G#5	0.000159555	0.000159555	1.48E-04	15
52 - A5	0.000213044	2.03E-04	1.66E-04	15
53 - A#5	0.000201566	0.000201566	1.85E-04	15
54 - H5	0.000222478	0.000222478	2.07E-04	15
55 - C6	0.000234314	2.34E-04	1.81E-04	15
56 - C#6	0.000240775	0.000240775	1.97E-04	15
57 - D6	0.000263668	2.42E-04	2.16E-04	15
58 - D#6	0.00029725	0.00029725	2.35E-04	15
59 - E6	0.000285928	0.000285928	2.57E-04	15
60 - F6	0.000322058	3.07E-04	2.80E-04	15
61 - F#6	0.00034591	3.46E-04	3.06E-04	15

Tabela 10.6. Koeficijenti inharmoničnosti tonova harfe (PFD, mPFD i proračun)

Ton	**PFD**	**Modifikovani PFD**	**Proračun**	**Broj harmonika**
Es1	1.09E-04	0.000109473	0.000116225	25
Fes1	1.03E-04	8.60E-05	9.82E-05	25
Ges1	6.85E-05	7.76E-05	7.64E-05	25
As1	7.17E-05	6.62E-05	7.59E-05	25
B1	7.38E-05	7.18E-05	6.90E-05	25
Ces2	9.59E-05	9.59E-05	9.41E-05	25
Des2	7.37E-05	8.42E-05	8.47E-05	25
Es2	3.06E-05	6.73E-05	7.17E-05	25
Fes2	4.38E-05	5.94E-05	6.30E-05	25
Ges2	5.14E-05	5.14E-05	4.99E-05	25
As2	0.000222953	0.000224158	0.000224092	25
B2	0.00022104	0.00022104	0.00020317	25
Ces3	0.000206621	0.000206621	0.000196742	25

Des3	0.000223265	0.000181945	0.000185356	25
Es3	0.000225522	0.000177291	0.000187292	25
Fes3	0.000156274	0.000196985	0.000200583	20
Ges3	0.000211828	0.000212537	0.000212148	20
As3	0.000195053	0.000205053	0.000215674	20
B3	0.00020232	0.00020232	0.000225704	20
Ces4	0.000255773	0.000215257	0.000225332	20
Des4	0.000243873	0.000233287	0.000242971	20
Es4	0.000317553	0.000258132	0.000248205	20
Fes4	0.000339367	0.000269367	0.000253649	20
Ges4	0.000323182	0.000277643	0.000269902	15
As4	0.000347646	0.000291913	0.00026836	15
B4	0.000304221	0.000301131	0.000276598	15
Ces5	0.000280089	0.000303609	0.000272905	15
Des5	0.000260793	0.000280793	0.00027509	15
Es5	0.000314339	0.000283585	0.000273473	15
Fes5	0.000517717	0.000276049	0.000279333	15
Ges5	0.000331949	0.00030405	0.000281897	15
As5	0.000255611	0.000315611	0.000296268	10
B5	0.000301121	0.000301121	0.000296128	10
Ces6	0.000337407	0.00034201	0.000323556	10
Des6	0.000519179	0.000393904	0.000381678	10
Es6	0.000408086	0.000399248	0.000418437	10

Biografija autora

Tatjana Miljković je rođena 1995. godine u Beogradu. Završila je osnovnu školu „Đura Daničić“ u Beogradu kao nosilac Vukove diplome 2009. godine. Nižu muzičku školu „Petar Konjević“ pohađala je od 2004. do 2009. godine i bila proglašena za đaka generacije. XII Beogradsku gimnaziju u Beogradu upisala je 2009. godine, a završila 2013. godine kao nosilac Vukove diplome. Srednju muzičku školu „Vatroslav Lisinski“ upisala je 2009. godine, a završila 2013. godine. Elektrotehnički fakultet upisala je 2013. godine. Diplomirala je na odseku za Telekomunikacije i informacione tehnologije 2017. godine. Master studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na Modulu za Audio i video tehnologije završila je u septembru 2018. Mentor prilikom izrade master rada pod nazivom “Analiza muzičkog sadržaja pomoću hromatograma” bila je Dragana Šumarac Pavlović. U novembru 2018. godine upisala doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

Od novembra 2018. do maja 2022. godine bila je zaposlena na Elektrotehničkom fakultetu, pri Katedri za Telekomunikacije, u zvanju istraživač pripravnik. Od maja 2022. zaposlena je u zvanju istraživač saradnik na Elektrotehničkom fakultetu. Angažovana je u izvođenju laboratorijskih vežbi na osnovnim i master akademskim studijama na predmetima: Električna merenja, Praktikum softverski alati 1 i 2, Elektroakustika, Osnovi govorne komunikacije, Obrada signala 1, Obrada signala 2, Adaptivna obrada signala, Audio sistemi i Analiza i sinteza muzičkih signala.

Autor je 5 radova u međunarodnim časopisima sa SCI liste, 3 rada u časopisima od nacionalnog značaja, 7 radova na konferencijama međunarodnog značaja, 24 rada na konferencijama nacionalnog značaja i 1 tehničkog rešenja. Prema *Google Scholar* bazi ima 54 citata i *h* indeks 3.

Učestvovala je u izradi 22 projekata i studija čiji je realizator Elektrotehnički fakultet u Beogradu. Projekti su iz kategorija naučni i komercijalni.

Na konferenciji ETRAN 2018. dobitnik je nagrade za najbolji rad mladog autora iz oblasti Akustika. Na konferencijama CIGRE 2019 i CIGRE 2021 dobitnik je nagrade za najbolji referat u studijskom komitetu C4 (Tehničke performanse EES). Koautor je rada koji je na konferenciji ETRAN 2022, dobio nagradu za najbolji rad u sekciji Akustika.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Татјана Миљковић

Број индекса 2018/5029

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Објективна и перцептивна карактеризација тона и тонских интервала генерисаних музичким инструментима

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 29.9.2025.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Татјана Миљковић

Број индекса 2018/5029

Студијски програм Електротехника и рачунарство

Наслов рада Објективна и перцептивна карактеризација тона и тонских интервала генерисаних музичким инструментима

Ментор Драгана Шумарац Павловић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 29.9.2025.

ТМиљковић

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Објективна и перцептивна карактеризација тона и тонских интервала генерисаних музичким инструментима

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 29.9.2025.

1. **Ауторство**. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално**. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада**. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима**. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада**. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима**. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.