

Koeficijent inharmoničnosti tonova harfe – Specifičnost i problemi automatske procene

Tatjana Miljković, Miloš Bjelić, Jelena Čertić, Dragana Šumarac Pavlović

Apstrakt—Ovaj rad bavi se karakterizacijom tona harfe i predstavlja nastavak istraživanja vezanih za karakterizaciju tonova žičanih instrumenata. Karakterizacija tona harfe bazirana je pre svega na proceni koeficijenta inharmoničnosti. Inharmoničnost je svojstvo tonova žičanih instrumenata i ogleda se u odstupanju frekvencija parcijala od vrednosti celobrojnih umnožaka osnovne frekvencije. Preciznost automatskog određivanja koeficijenta inharmoničnosti B otežano je postojanjem „fantomskih“ parcijala koji su posledica različitih fizičkih procesa koji zavise od konstrukcije instrumenta, načina pobude, kao i materijala od kojih su žice napravljene. Kao posledica konstrukcije instrumenta i načina zatezanja žice, kod harfe su veoma izraženi višestruki pikovi u spektru koji otežavaju automatsko izračunavanje koeficijenta inharmoničnosti. Koeficijent B je procenjen uz pomoć PFD algoritma i upoređen sa vrednostima koje su procenjene uz pomoć namenski napravljenog alata za manuelnu procenu. Vrednosti koeficijenata B za harfu upoređeni su sa vrednostima koeficijenta B kod klavira i čembala.

Ključne reči—Inharmoničnost parcijala, harfa, procena spektra, „fantomski“ parcijali

I. UVOD

Muzički ton karakteriše diskretni spektar sa harmonijskim raspoređenim komponentama na celobrojnim umnošcima osnovne frekvencije. Jedna od specifičnosti tonova žičanih instrumenata je pojava inharmoničnosti parcijala koja se ogleda u odstupanju frekvencija parcijala od harmonijskog niza. Ovo svojstvo je prisutno kod svih žičanih instrumenata, ali je kod nekih manje ili više izraženo. Konstrukcija instrumenta, dužina žice, materijal od koga je žica napravljena, način okidanja žice, kao i način pričvršćivanja i zatezanja dovode do različitih fizičkih procesa koji za posledicu imaju odstupanje frekvencija modova od pravilnog harmonijskog niza.

Druga osobina spektra tonova žičanih instrumenata je prisustvo parazitnih diskretnih komponenti koji su posledica više različitih faktora: sprežanja oscilovanja susednih žica, sprežanja oscilovanja žice sa drugim rezonantnim sistemima, kao i nelinearne pojave koje prouzrokuju pojavu takozvanih „fantomskih“ parcijala [1-3]. U slučaju harfe koja je predmet

analize u ovom radu, veoma su izraženi skoro svi nabrojani faktori koji kao posledicu imaju dodatne komponente u spektru tonova koje su tema brojnih istraživanja [1-5].

Usled transversalnih vibracija javljaju se nelinearnosti u procesu oscilovanja koji kao posledicu imaju pojavu takozvanih „fantomskih“ parcijala [3, 6]. Fantomski parcijali se pojavljuju kao zbrovi inharmoničnih parcijala nižeg reda ili kao dvostruke vrednosti parnih harmonika. Posledica dodatnih pikova u spektru u okolini inharmoničnih modova prouzrokuje amplitudsku modulaciju anvelope harmonika koja utiče na boju zvuka. Kod različitih žičanih instrumenata postoje manje ili više izraženi pojedini efekti koji utiču na formiranje prepoznatljive boje zvuka određenog instrumenta. Navedeni artefakti spektra dodatno usložnjavaju njegovu prirodu, što za posledice ima komplikacije prilikom procene koeficijenta inharmoničnosti.

U cilju karakterizacije tonova žičanih instrumenata na osnovu koeficijenta inharmoničnosti neophodno je obuhvatiti ceo registar instrumenta. S obzirom da se registri instrumenata razlikuju, kao i da ih čini mnoštvo tonova uglavnom od 80 do 100, potrebno je izvršiti automatizaciju procesa procene koeficijenta inharmoničnosti. U literaturi postoje različite metode i algoritmi za procenu koeficijenta inharmoničnosti [7,8,9]. Uglavnom se automatska procena koeficijenta inharmoničnosti zasniva na proceni diskretnih inharmonijskih parcijala u spektru. Procena takvih parcijala iz spektra tona često je otežana zbog prisustvu brojnih izraženih spektralnih komponenti u blizini inharmoničnih parcijala. U ovom radu razmatrani su specifičnosti automatske procene koeficijenata inharmoničnosti, kao i problemi koji su doveli do otežane realizacije automatske procene.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju rada prikazana je konstrukcija i način proizvodjenja tonova različitih tonskih visina, kao i karakteristike spektra i vremenskog razvoja pojedinih parcijala tonova harfe. U trećem poglavlju prikazana su dva postupka za procenu koeficijenta inharmoničnosti. Jedan postupak zasniva se na automatskoj proceduri zasnovanoj na PFD (*Partial Frequency Deviation*) algoritmu sa procenom spektra na bazi AR (*Auto Regressive*) modela, a drugi postupak baziran je na manuelnoj proceni na bazi namenski napravljenog alata. U IV poglavlju prikazani su i diskutovani eksperimentalni rezultati proračuna koeficijenta inharmoničnosti za kompletan registar tonova harfe. Procena je izvršena za sve tri pozicije pedala kao i uporedna analiza automatskog i manuelnog postupka procene. Procenjene vrednosti koeficijenta inharmoničnosti za harfu upoređene su sa vrednostima dobijenim za klavir i čembalo koji su analizirani u prethodnim istraživanjima.

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: tm@etf.bg.ac.rs).

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.bg.ac.rs).

Jelena Čertić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: certic@etf.bg.ac.rs).

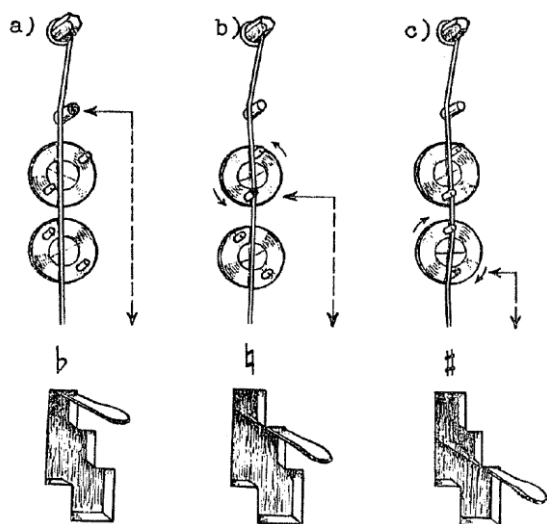
Dragana Šumarac Pavlović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.bg.ac.rs).

II. OSNOVNE KARAKTERISTIKE HARFE

A. Konstrukcija harfe

Harfa je instrument u obliku trostranog okvira, visokog oko 180 cm, sa nizom žica razapetih u uspravnoj ravni. Okvir harfe se sastoji iz 5 osnovnih delova. Osnovu instrumenta čini postolje, koje se još naziva pedalijera, jer su u njegovim stepenastim prorezima smešteni pedale za preštimanje žica. Uspravno na postolju stoji šuplji stub, kroz čiju unutrašnjost prolaze čelične poluge koje povezuju pedale sa gornjim delom mehanizma za preštimanje. Drugi krak okvira čini rezonantno telo, koje je takođe šuplje. Zaobljena strana rezonatora je okrenuta nadole i uglavom se izgrađuje od bukovog ili javorovog drveta.

Treću stranu okvira čini drveni vrat. Kroz vrat su provučene čivije – metalni zavrtnji koji drže gornje krajeve žica. Same žice su zakačene s leve strane, a sa desne strane se čivije mogu, posebnim ključem, zatezati ili otpustiti, čime se podešava osnovno štimovanje žica. Zajednicu sa vratom čini most, u kome se između dve mesingane ploče, nalazi gornji deo mehanizma za preštimanje žica. Poluge ovog mehanizma, koje su kroz stub harfe povezane s pedalama u postolju, pokreću 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 žicu zahvataju po dva takva koturića [10]. Najniže dve do tri žice nemaju ove koturiće. Njihovi tonovi su vrlo retko u upotrebi, pa se pre sviranja štimovanje ključem podesi na onu tonsku visinu koja će biti potrebna. Na slici 1 prikazan je opisani sistem za preštimanje žica na harfi. Takođe, na slici 1 se može uočiti kako se u postolju harfe nalaze 3 stepenasta proreza, koje označavaju da se pedale harfe mogu postaviti u 3 različita položaja.



Sl. 1 Sistem preštimanja žice na harfi; a) položaj 1 – otvorena žica, b) položaj 2 – jedanput skraćena žica, c) položaj 3 – dvaputa skraćena žica [10]

U gornjem položaju pedala je opuštена i ne deluje na gornji mehanizam, tako da klinovi koturića ne dotiču žicu i ona slobodno osciluje celom svojom dužinom. Ako se pedala pritisne i zakači u srednji položaj, taj se pritisak polugama prenosi do gornjeg od dva koturića i okreće ga za toliko, da njegovi klinovi zahvate žicu. U tom slučaju, njena aktivna

dužina je skraćena, pa žica daje ton viši od osnovnog štimovanja za pola stepena. Pomeranjem u donji položaj, pedala pokreće, posredstvom poluga, i donji koturić, pa njegovi klinovi još više skrate dužinu žice i povise joj ton još za pola stepena. Opisanim postupkom, se iz svake žice mogu izvući po 3 tona različite visine. Time se postiže znatna ušteda u broju žica, što je za spretnost sviranja od velike važnosti.

Jedna pedala mehanizmom zahvata istovremeno žice istoimenih tonova u svim oktavama (npr. G1, G2, G3, G4 itd.) i zahvaljujući preštivanju njihove hromatske varijante. Time je broj pedala sveden na 7. Oni su raspoređeni naspram leve i desne noge svirača i nose ime žica, koje kroz sve oktave, zahvataju [10]. 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 može da da i bilo koju drugu lestvicu, osim naravno hromatske.

Tonski opseg harfe zahvata šest i po oktava: to je pri gornjem položaju pedala, od Ces1 do Ges7. Sa po 7 žica u okviru oktave, ukupan broj žica iznosi 46 ili 48. Orijentacija svirača u tolikom nizu žica olakšana je time, što su sve C žice obojene crveno, a sve F žice plavo. Dvanaest najnižih (najdužih) žica do As2 koje se još nazivaju bas žice imaju čelično jezgro, omotano metalnom niti; sledeći opseg od As2 do Es6 su žice od creva, i na kraju opsega od Fes6 do Ges7 žice su izgrađene od najlona.

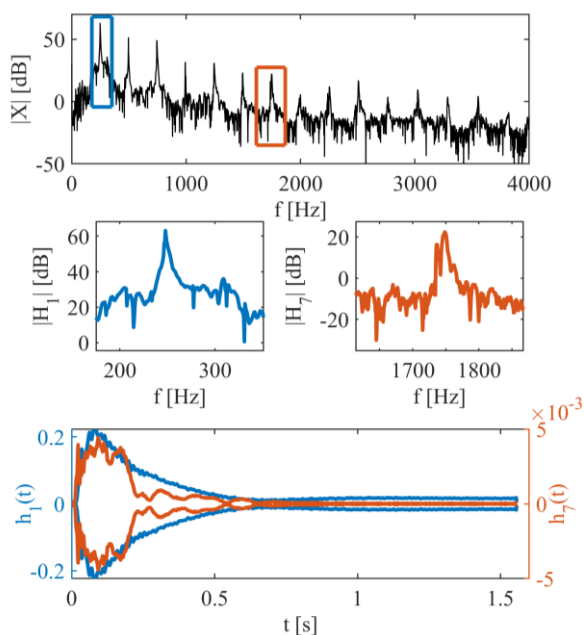
B. Vremenske i spektralne karakteristike tonova harfe

Harfa spada u žičane muzičke instrumente, gde se ton proizvodi trzanjem žice. Tako se i u spektru tonova harfe uočavaju pojave koje su karakteristične za žičane instrumente. Jedan od efekata je inharmoničnost koja se ogleda u odstupanju položaja parcijala od frekvencija koje su celobrojni umnožak osnovne frekvencije. Međutim, u spektru harfe, uočavaju se i druge pojave koje se ne mogu objasniti inharmoničnošću a koje otežavaju sistematsku, automatsku analizu karakteristika harfe kao tipa instrumenta i parametre koji bi opisali svaki pojedinačan instrument i omogućili objektivno poređenje instrumenata. Pojave kojima se može objasniti prisustvo artefakata u spektru signala harfe opisane su u literaturi i definišu se :

- kao posledice nelinearnosti [3,6] usled koje se javljaju komponente u spektru koje predstavljaju zbir harmonika.
- kao posledice pobuđivanja i drugih žica osim žice koja se okida [1,2] usled koje se „čuju“ i pri analizi spektra i vide komponente koje po frekvenciji odgovaraju parcijalima neke druge žice ili žica. Ova pojava opisana je posebno za hrafu i posledica je konstrukcije samog instrumenta.

Obe pojave mogu dovesti do toga da se u spektru signala pojave komponente, koje su po frekvenciji bliske nekom od osnovnih inharmoničnih parcijala. Pomenute komponente dovode do amplitudske modulacije parcijala. Na slici 2 prikazan je spektar jednog tona harfe sa detaljnijim prikazom spektra prvog i sedmog parcijala, kao i njihove vremenske obvojnice. Komponente su izdvojene primenom namenski napravljene banke filtera [11] na čijem su izlazu dostupni

uskopojasni signali pojedinačnih parcijala. Sa slike 2 se može uočiti da u okolini sedmog harmonika postoji izražena dodatna spektralna komponenta koja menja anvelopu pacijala i dovodi do toga da se anvelopa sedmog parcijala značajno razlikuje od tipične anvelope čiji je predstavnik anvelopa prvog parcijala. U okviru ovog rada, pojave dodatnih komponenti u spektru su razmatrane jer ograničavaju mogućnost za automatsku procenu koeficijenta inharmoničnosti, o čemu će biti više reči u poglavljima III i IV.



Sl. 2 Spektar tona Ces4 odsviranog na harfi sa prikazom vremenske obvojnice prvog i sedmog parcijala

III. METODOLOGIJA ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA INHARMONIČNOSTI

Nastanak zvuka kod žičanih instrumenata potiče od vibriranja žice. U zavisnosti od načina na koji se žica pobuđuje na vibriranje razlikujemo 3 podgrupe žičanih instrumenata (gudačke, trzane i udarne žičane instrumente). Bez obzira na različite podgrupe žičanih instrumenata, za sve tipove žičanih instrumenata kod kojih zvuk nastaje udarom žice ili njenim okidanjem, karakteristična je pojava inharmoničnosti parcijala. Izučavanjem prirode i fizičkih uzroka inharmoničnosti izvedena je zakonitosti po kojoj se može odrediti frekvencija inharmonijskih parcijala :

$$f_k = kf_0 \sqrt{1 + k^2 B}, \quad (1)$$

gde je k redni broj harmonika, f_0 osnovna frekvencija tona, a B koeficijent inharmoničnosti [12]. Za svaki ton postoji jedinstven koeficijent inharmoničnosti B koji u izvesnoj meri na istom instrumentu varira sa promenom tonskih visina.

Procena B zasniva se na proceni spektra i u literaturi su predloženi različiti algoritmi za njegovu automatsku procenu. [7,8,9]. U ovom radu za automatsku procenu koeficijenta inharmoničnosti B razmatran je PFD algoritam [13]. Kako su automatskom procenom dobijene vrednosti B koje ne očekivano variraju sa promenom tonskih visina, paralelno

je izvršena procena B uz pomoć namenski napravljenog alata za manuelnu procenu.

A. Automatska procena koeficijenta inharmoničnosti na osnovu PFD algoritma

PFD algoritam se može razmatrati kao algoritam koji se izvršava u dve etape. U prvoj etapi algoritma je neophodno izvršiti procenu spektra signala i odrediti prvih k frekvencija parcijala analiziranog tona. Grupa Finskih naučnika koja je predložila PFD algoritam kao algoritam za automatsku procenu B , procenu spektra tona bazirala je na DFT (*Discrete Fourier Transform*) metodi [13].

U prethodnim radovima pokazani su nedostaci takve metode za procenu spektra tonova [14,15]. Zbog navedenih nedostataka kao metod za procenu spektra predložen je AR model [15].

AR modelovanje podrazumeva da se na osnovu segmenata signala procene koeficijenti modela. Znajući koeficijente modela, za signale kod kojih su spektralne komponente izražene moguće je izvršiti procenu frekvencija spektralnih komponenti. Detaljni opis primenjenog AR modela prikazan je u radovima [16]. Krajnji rezultat metode AR modelovanja je procenjivanje frekvencija spektralnih komponenti na osnovu položaja dominantnih polova.

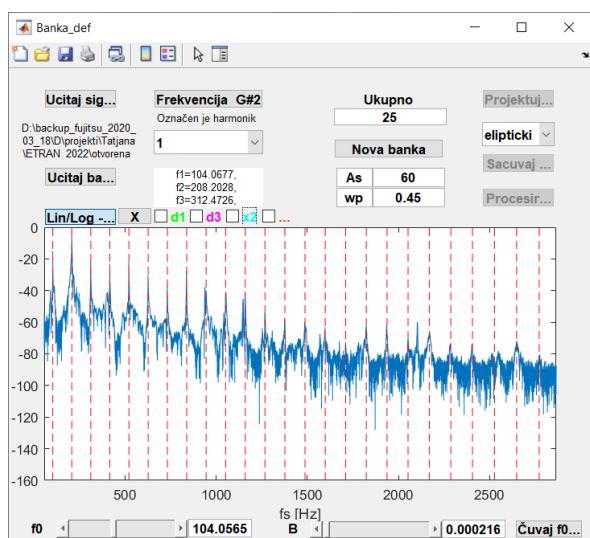
Druga etapa PFD je iterativni postupak koji se zasniva na izračunavanju devijacije frekvencije parcijala, gde se proračunava razlika niza frekvencija parcijala dobijenih iz procene spektra i odgovarajućeg niza frekvencija parcijala dobijenih na osnovu jednačine (1) za vrednost B u tekućoj iteraciji. Na osnovu trenda devijacije frekvencije, potrebno je doneti odluku da li se vrednost koeficijenta B smanjuje ili povećava [13]. Nakon određenog trenda devijacije moguće je modifikovati vrednost koeficijenta B polaznog tona. Minimizacijom krive devijacije postiže se konvergencija algoritma. Konačni rezultat cele procedure predstavlja jednobroja vrednost koeficijenta inharmoničnosti B za posmatrani ton.

B. Procena koeficijenta inharmoničnosti pomoću specijalizovanog alata

Sa ciljem da se detaljnije sagleda priroda spektra tonova realizovan je specijalizovani alat za analizu tonova muzičkih instrumenata. Alat je nastao kao unapređenje ranije realizovane komplementarne filterske banke [11]. Razvijanje alata je sprovedeno u MATLAB okruženju kao grafički interfejs (slika 3). Osnovne karakteristike alata koje su implementirane odnose se na sledeće kontrole: učitavanje signala, filtriranje namenski projektovanom bankom usklađenom sa karakteristikama spektra, određivanje osnovne frekvencije signala i definisanje pozicije parcijala u odnosu na zadatu vrednost B (prema formuli (1)), kao i uskopojasno filtriranje prema definisanim frekvencijama inharmonijskih parcijala. Uz pomoć dva klizača vrši se manuelno podešavanje koeficijenta inharmoničnosti B , za zadati broj parcijala.

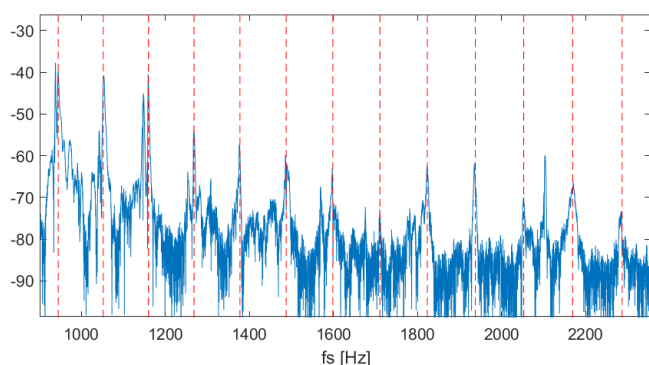
Na slici 3 dat je prikaz interfejsa specijalizovanog alata, gde je učitani signal ton As2 odsviranog na harfi. Na prikazanom logaritamskom spektru, isprekidanim crvenim linijama čiji je

broj određen brojem upisanim u polje „ukupno“ obeležene su pozicije parcijala tona. Pomeranjem klizača f_0 i B menjaju se pozicije isprekidanih crvenih linija. U cilju što bolje procene koeficijenta B neophodno je pozicionirati isprekidane crvene linije tako da odgovaraju vrhovima spektralnih komponenti parcijala analiziranog tona. Vrednosti f_0 i B za koje se isprekidane linije najbolje poklapaju sa spektralnim komponentama tona proglašavamo za procenjene vrednosti osnovne frekvencije i koeficijenta inharmoničnosti analiziranog tona.



Sl. 3 Prikaz interfejsa alata za analizu pojedinačnih tonova muzičkih instrumenata

Detaljnijim uvidom u spektar posmatranog tona (slika 4) u opsegu od 1000 do 2000 Hz, može se uočiti postojanje spektralnih komponenti veoma frekvencijski bliskih parcijalima odsviranog tona. Pored postojanja udvojenih parcijala, još jedan od neregularnih spektralnih artefakta tona As2 jeste pojava veoma amplitudski izražene spektralne komponente između 2000 i 2200 Hz, koji se nalazi tačno na polovini između 19og i 20og harmonika tona As2. Navedeni fenomeni koji se pomoću specijalizovanog alata mogu uočiti u spektru tona otežavaju automatizaciju procene koeficijenta inharmoničnosti za ceo opseg tonova harfe.



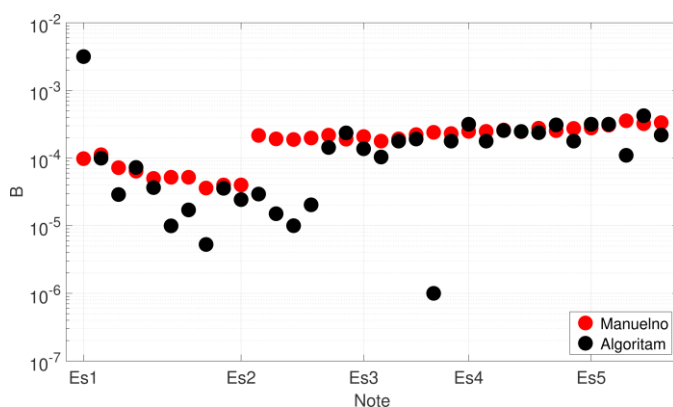
Sl. 4 Deo spektra tona As2 odsviranog na harfi

IV. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA

U prethodnom poglavlju izložene su dve metodologije za određivanje koeficijenta inharmoničnosti, automatska procena na osnovu PFD algoritma i procena pomoću specijalizovanog alata. Krajnji rezultat obe metodologije jeste vrednost koeficijenta inharmoničnosti za celokupni opseg harfe. Bazu čini 141 snimak tonova odsviranih na harfi. Snimljeni tonovi pokrivaju celokupni registar harfe, odnosno svih 47 žica su pobuđene za sva 3 položaja pedale. Tonovi harfe snimljeni su u prostorijama Fakulteta muzičke umetnosti u Beogradu.

A. Komparacija rezultata koeficijenta inharmoničnosti algoritmom i pomoću alata

Uticao dve metodologije na procenu koeficijenta inharmoničnosti najbolje se može uočiti poređenjem trenda krive koeficijenta B . Na slici 5 dat je grafik koeficijenta inharmoničnosti B za tonove harfe odsvirane za položaj 1 pedale, odnosno za slučaj kada je žica otvorena. Koeficijenti inharmoničnosti su dobijeni na osnovu dve metodologije, pomoću PFD algoritma i manualno, odnosno pomoću specijalizovanog alata. Za tonove iz srednjeg i višeg registra harfe koeficijenti B procenjeni na osnovu dve metodologije se ne razlikuju previše, dok za slučaj tonova iz nižeg registra dolazi do uočljivog razilaženja u vrednostima i to za red veličine. Glavni razlog za lošiju procenu koeficijenta inharmoničnosti na osnovu algoritma leži u kompleksnosti spektra tona harfe koji se odlikuje sa udvojenim parcijalima čije su vrednosti i frekvencijski i amplitudski veoma bliske, te se sam algoritam u odabiru spektralnih komponenti parcijala tona odlučio za pogrešan.

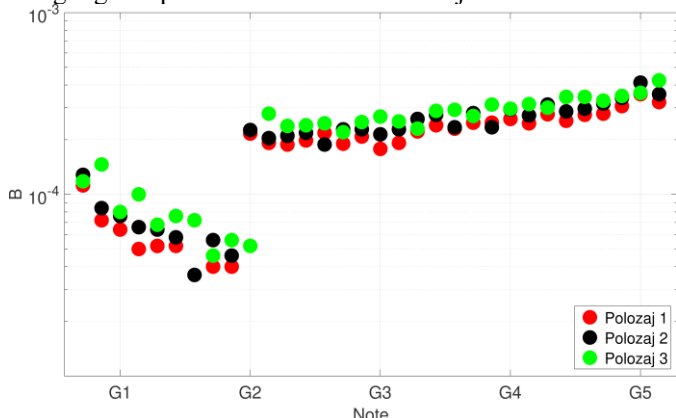


Sl. 5 Koeficijent inharmoničnosti B tonova harfe za položaj 1 pedale određen algoritmom i pomoću specijalizovanog alata

B. Procena koeficijenta inharmoničnosti za različite položaje pedala harfe

Na slici 6 prikazani su koeficijenti B tonova odsviranih na harfi za sva tri položaja pedale. Trend krive koeficijenta B očuvan je za sva tri položaja pedale. Za razliku od trenda krive koeficijenta B koji je očuvan razlike u vrednostima koeficijenta B za tonove iz nižeg registra u odnosu na vrednosti koeficijenta B za tonove iz srednjeg i višeg registra postoji. Procenjene vrednosti koeficijenta B kreću se u rasponu od $3 \cdot 10^{-4}$ do $2 \cdot 10^{-3}$. Veće vrednosti B označavaju veću inharmoničnost, odnosno veće odstupanje inharmonijskih frekvencija u odnosu na očekivane frekvencije harmonijskog niza. Na osnovu skoka u vrednosti koeficijenta

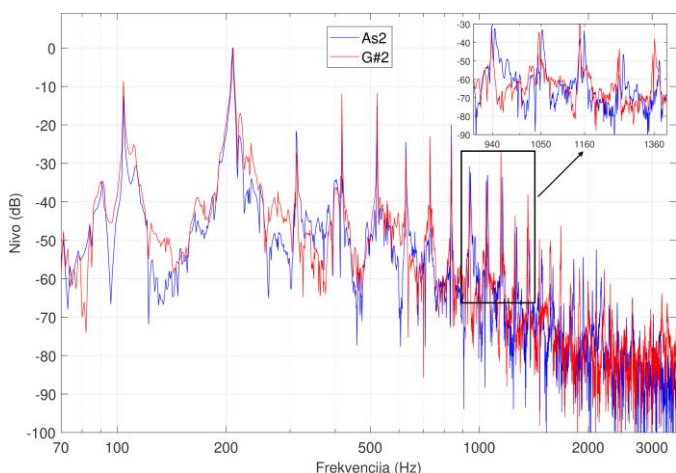
inharmoničnosti možemo zaključiti da na samu vrednost koeficijenta inharmoničnosti utiče značajno materijal od kojeg je žica napravljena, s obzirom da su tonovi iz nižeg registra proizvedeni na metalnim žicama, dok su tonovi iz srednjeg i višeg registra proizvedeni na crevnim i najlonskim žicama.



Sl. 6 Koeficijent inharmoničnosti B tonova harfe za tri različita položaja pedale

Još jedan od fenomena harfe kao muzičkog instrumenta se može uočiti iz krive koeficijenta inharmoničnosti prikazanog na slici 6. Iako postoje tonovi koji su enharmonski parovi (tonovi jednakih tonskih visina, ali različite notacije npr. Gis i As) njihovi koeficijenti inharmoničnosti se međusobno razlikuju. Razlog za razlike u vrednostima koeficijenta B se krije upravo u fizici nastanka tona. Iako su to tonovi istih osnovnih frekvencija, da bi se na harfi dobio ton As pedala se nalazi u položaju 1, žica je otvorena i kao takva osciluje, dok za slučaj tona Gis pedala se nalazi u položaju 3 i pomoću mehanizma sa dva koturića žica je skraćena na dva mesta za razliku od žice kada se pedala nalazi u položaju 1. S obzirom na fizičko skraćivanje žice, menjaju se i granični uslovi oscilovanja žice. Opisane razlike za enharmonski par tonova As2 i Gis2 mogu se uočiti i u prikazima njihovih spektara. Na slici 7 dat je prikaz tonova As2 i Gis2 odsviranih na harfi. Sa slike se može uočiti da na frekvencijama od 1000 Hz parcijali tonova As2 i Gis2 se razilaze za par Hz, što za posledicu ima različite vrednosti koeficijenta inharmoničnosti.

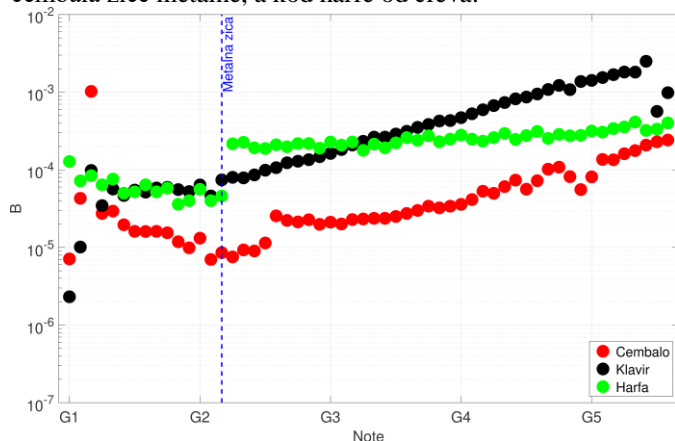
Osim razilaženja u frekvenciji inharmonijskih parcijala dolazi do pomeranja i „fantomskih“ parcijala koji su zavisni od osnovnih inharmonijskih parcijala.



Sl. 7 Prikaz spektra tonova As2 i Gis2 odsviranih na harfi

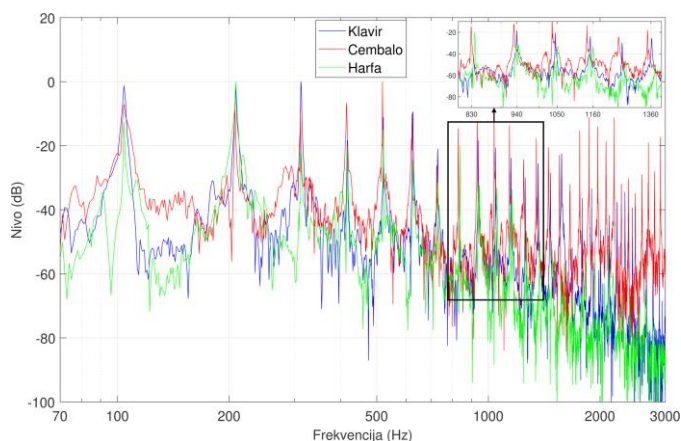
C. Poređenje procenje vrednosti koeficijenta inharmoničnosti za tonove harfe, klavira i čembala

Koeficijent inharmoničnosti predstavlja kako kvalitativan tako i kvantitativan atribut tona žičanih muzičkih instrumenata. Sa ciljem opisivanja razlike između različitih klasa žičanih instrumenata izvršeno je poređenje koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira, čembala i harfe. Na slici 8. prikazani su procenjeni koeficijenti inharmoničnosti za opseg tonova koji je zajednički za sva tri instrumenta, odnosno za tonove iz opsega od G1 do C6. S obzirom da se kod harfe ne može postići potpuna hromatika, kao kod klavira i čembala, pri izračunavanju koeficijenta inharmoničnosti tonova harfe, tonovi su birani tako da se njihove osnovne frekvencije slažu sa osnovnim frekvencijama tonova klavira i čembala. Takođe, koeficijenti B tonova harfe prikazani na grafiku određeni su pomoću specijalizovanog alata, a ne automatskom procedurom pomoću PDF algoritma. Na osnovu slike se može zaključiti da je trend krive koeficijenta inharmoničnosti za sva tri instrumenta očuvan. Vrednosti koeficijenta B tonova harfe iz nižeg registra se poklapaju sa vrednostima koeficijenta B klavira, što se objašnjava činjenicom da su žice od istog materijala, čak i poredive dužine. Takođe, činjenica da se u srednjem i višem registru vrednosti koeficijenata B harfe razlikuju i od koeficijenata B čembala i klavira može se opravdati različitim materijalom žice, gde su kod klavira i čembala žice metalne, a kod harfe od creva.



Sl. 8 Koeficijent inharmoničnosti B tonova harfe, čembala i klavira

Posledice različitih vrednosti koeficijenta inharmoničnosti za tonove klavira, čembala i harfe mogu se uočiti uporednom analizom spektra tonova pomenutih instrumenata. Na slici 9 dat je prikaz spektra tona iste frekvencije odsviranih na klaviru, čembalu i harfi. Na osnovu spektra signala može se uočiti da iako su tonovi istih frekvencija pozicije njihovih parcijala se razlikuju, što doprinosi različitim vrednostima koeficijenta inharmoničnosti. Takođe, poređenjem spektara tonova za tri navedena instrumenta može se zaključiti da je broj izraženih parcijala kod tona harfe manji u odnosu na broj izraženih parcijala klavira i čembala. Ta činjenica direktno utiče na vrednosti koeficijenata inharmoničnosti, s obzirom da se njegova vrednost procenjuje na osnovu frekvencija parcijala tonova, gde spektralno bogatstvo parcijala doprinosi niže procenjenoj vrednosti koeficijenta inharmoničnosti, a njihovo odsustvo utiče na povećanje procenjene vrednosti koeficijenta inharmoničnosti.



Sl. 9 Prikaz spektra tonova iste frekvencije odsviranih na klaviru, čembalu i harfi

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu razmatran je koeficijent inharmoničnosti tonova harfe kroz prizmu automatske procene i specifičnosti koje prati data problematika. Formirana je baza snimaka koja se sastoji od 141 tonova odsviranih na harfi. Harfa je izabrana kao instrument u cilju proširivanja prethodnog istraživačkog rada i upotpunjavanja do sada formirane baze tonova žičanih muzičkih instrumenata. Koeficijent inharmoničnosti je računat na osnovu automatske procedure pomoću modifikovanog PFD algoritma. Pokazano je da za pojedine tonove iz nižeg registra harfe dobijene vrednosti koeficijenta inharmoničnosti na osnovu automatske procedure nisu dobro procenjene. Iz tog razloga realizovan je specijalizovani alat za analizu audio signala, pomoću koga se manuelnom inspekcijom može proceniti koeficijent inharmoničnosti tonova žičanih instrumenata. Novonastali specijalizovani alat otvara nove istraživačke mogućnosti, gde će nastavak istraživanja podrazumevati savladavanje problema automatske procene. Pored toga, kreirani alat otvara mogućnosti za proširivanje samog istraživanja dodavanjem mogućnosti ne samo analize tonova žičanih muzičkih instrumenata, već i njihove sinteze.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR36026 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Zahvaljujemo se profesorki dr um. Mileni Stanišić na pomoći pri formiranju baze snimaka neophodnoj za ovo istraživanje.

LITERATURA

- [1] J-L. Le Carrou, F. Gautier, E. Foltête, "Experimental study of A0 and T1 modes of the concert harp", *J.Acoust.Soc.Am.*, Vol. 121(1), pp.559-567, January 2007.
- [2] J-L. Le Carrou, F. Gautier, R. Badaeu, "Sympathetic String Modes in the Concert Harp", *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 95, pp. 744-752, 2009.
- [3] Harold A. Conklin, Jr., "Generation of partials due to nonlinear mixing in a stringed instrument", *J.Acoust.Soc.Am.*, Vol. 105(1), pp.536-545, January 1999.
- [4] V. Bucur, "About the acoustic and other non-destructive methods for the characterization of old historical string musical instruments – an

overview", 22nd International Congress on Acoustics, ICA 2016, Buenos Aires – 5 to 9 September, 2016.

- [5] V. Bucur, "Handbook of Materials for String Musical Instruments", ISBN: 978-3-319-32078-6 Springer, 2016.
- [6] Harold A. Conklin, Jr., "Piano strings and "phantom" partials", *J.Acoust.Soc.Am.*, Vol. 102(1), pp.536-545, July 1997.
- [7] A.S. Galembo, and A. Askenfelt, A. "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, 1999.
- [8] A. Askenfelt and A.S. Galembo, "Study of the spectral inharmonicity of musical sound," *Acoust. Phys.* vol. 46, no. 2, pp. 121–132, 2000.
- [9] A. Klapuri, "Multiple fundamental frequency estimation based on harmonicity and spectral smoothness," *IEEE Trans. Speech Audio Process*, vol. 11, no. 6, pp. 184–194, 2003.
- [10] D. Despić, *Muzički instrumenti*, Univerzitet umetnosti Beograd, 1979.
- [11] J. Čertić, D. Šumarac Pavlović, I. Salom, "Softverski paket za obradu i analizu audio signala", *TELFOR 2010*, pp. 1269-1272, Beograd, Nov., 2010
- [12] H. Fletcher, E. D. Blackham, and R. Stratton, "Quality of piano tones", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 34, no. 6, pp. 749–761, 1962.
- [13] J. Rauhala, H.M. Lehtonen, V. Välimäki, "Fast automatic inharmonicity estimation algorithm" *Acoust. Soc. Am.*, vol. 121, EL184, doi:10.1121/1.2719043, 2007
- [14] T. Miljković, M. Bjelić, D. Šumarac Pavlović, J. Čertić, "Analiza algoritma za procenu koeficijenta inharmoničnosti različitih klavira", *Zbornik radova 64. Konferencije ETRAN*, pp. AK1.2.1 - AK1.2.6, Beograd, Sep, 2020.
- [15] T. Miljković, J. Damjanović, J. Čertić, D. Šumarac Pavlović, "Uticaj estimacije frekvencija harmonica na procenu koeficijenta inharmoničnosti čembala", *Zbornik radova 65. Konferencije ETRAN*, pp. 9 -14, Etno selo Stanišići, Sep, 2021.
- [16] P.A.A. Esquef, M. Karjalainen, and V. Välimäki, "Frequency-Zooming ARMA Modeling for Analysis of Noisy String Instrument Tones", *EURASIP J. Adv. Signal Process*, pp. 953-967, 2003.

ABSTRACT

This paper deals with the characterization of harp tones and presents continuation of research related to the string instruments characterization. The characterization of the harp tone is based primarily on the estimation of the inharmonicity coefficient. Inharmonicity is a property of the tones of string instruments and is reflected in the deviation of the partial frequencies from the integer multiple of the fundamental frequency. The accuracy of the automatic determination of the inharmonicity coefficient B is hampered by the existence of "phantom" partials which are consequences resulting from different physical processes that depend on the construction of the instrument, the excitation method, as well as the materials from which the strings are made. As a consequence of the instrument construction and the way the string is tightened, in harp multiple peaks in the spectrum are very pronounced, which makes it difficult to automatically calculate inharmonicity coefficient. The coefficient B was estimated using the PFD algorithm and compared with the values estimated using a purpose-built tool for manual estimation. The coefficient B values of the harp were compared with the values of the coefficient B of piano and harpsichord.

Inharmonicity coefficient of harp tones - Specificity and problems of automatic estimation

Tatjana Miljković, Miloš Bjelić, Jelena Čertić, Dragana Šumarac Pavlović