

Akustičke promene tona harfe pri različitim pozicijama i načinima okidanja

Tatjana Miljković
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički
fakultet
Beograd, Srbija
tm@etf.rs

Dragana Šumarac Pavlović
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički
fakultet
Beograd, Srbija
dsumarac@etf.rs

Jelena Čertić
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički
fakultet
Beograd, Srbija
dsumarac@etf.rs

Abstract— Ovaj rad istražuje akustičke i perceptivne aspekte tonova harfe kroz analizu četiri karakteristična fenomena: inharmoničnost parcijala, vremenska promena osnovne frekvencije (*glide*), pojava fantomskih parcijala i njihov vremenski razvoj. Eksperimentalni korpus čine tonski snimci jedne iste žice harfe, pobuđivane u tri različita uslova: (1) višestrukim okidanjima istom jačinom na istoj poziciji, (2) promenom jačine na fiksnoj poziciji, i (3) promenom pozicije okidanja pri približno konstantnoj jačini. Poseban akcenat stavljen je na treći slučaj, kako bi se ispitali efekti mesta pobude na spektralnu strukturu i vremensku stabilnost tona. Analiza obuhvata praćenje amplitudne dinamike osnovnih i fantomskih parcijala kroz vreme, kao i promene osnovne frekvencije, sa ciljem da se utvrdi veza između fizičkih parametara pobude i rezultujućih karakteristika tona.

Ključne reči — *fantomski parcijali, inharmoničnost parcijala, pomeranje osnovne frekvencije, ton harfe, vremenska anvelopa tona*

I. UVOD

Kod žičanih instrumenata kao što su klavir, čembalo, harfa i gitara zvuk se proizvodi okidanjem žice. Ton koji nastaje posledica je složenih rezonantnih pojava koje se odvijaju prvenstveno u žici pričvršćenoj na oba kraja. U formiranju tona učestvuju kako sopstveni rezonantni modovi žice, tako i prinudne rezonance u rezonatorskom telu instrumenta, uz izraženu međusobnu spregu i nelinearnu interakciju ovih elemenata. Kao rezultat tih višestrukih mehaničkih procesa u različitim delovima instrumenta i njihove sprege, nastaju akustičke pojave koje u velikoj meri definišu zvučni karakter instrumenta, njegovu boju tona i izražajnost.

U literaturi su posebno identifikovane i analizirane tri grupe fenomena koje su karakteristične za žičane instrumente sa okidanjem:

- inharmoničnost parcijala, koja utiče na boju tona, kao i na perceptivnu konsonantnost i disonantnost muzičkih intervala [1-7];
- pojava fantomskih parcijala — dodatnih komponenti koje se ne uklapaju u očekivani spektar tona, ali se mogu percipirati kao deo njegove zvučne strukture [1,2,8,9],
- karakteristično pomeranje osnovne frekvencije (f_0) u početnoj fazi tona (tzv. *glide*), koje može uticati na stabilnost intonacije [10,11].

Važan faktor koji utiče na izraženost ovih pojava jeste način i mesto okidanja žice. Promenom pozicije pobude menja se raspodela energije između modova vibracije, što utiče na amplitudu pojedinih parcijala, vremensku dinamiku tona i prisustvo dodatnih komponenti. Tako tehnička kontrola mesta okidanja postaje i interpretativno sredstvo kojim izvođač može

oblikovati nijanse boje i karaktera tona u zavisnosti od muzičkog konteksta.

U ovom radu analizirani su navedeni fenomeni na primeru koncertne harfe, sa fokusom na zavisnost njihovog ispoljavanja od mesta i jačine okidanja. Snimci pojedinačnih tonova, izvedenih sa različitim tehničkim varijantama okidanja iste žice, analizirani su u domenu vremena i frekvencije, a rezultati su razmatrani u svetlu formiranja budućih perceptivnih testova.

II. INHARMONIČNOST, FANTOMSKI PARCIJALI I POMERANJE f_0

A. Inharmoničnost

Karakteristična akustička osobina tonova žičanih instrumenata kod kojih se žica pobuđuje okidanjem kao što su klavir, čembalo, harfa i gitara jeste inharmoničnost parcijala. Ova pojava označava odstupanje frekvencija parcijala od idealnog harmonijskog niza, tj. umesto da budu tačno celobrojni umnošci osnovne frekvencije f_0 , viši parcijali se nalaze na nešto višim frekvencijama.

Inharmoničnost se kvantitativno opisuje pomoću tzv. koeficijenta inharmoničnosti B, koji predstavlja meru odstupanja od harmonijskog niza. Njegova vrednost zavisi od fizičkih osobina žice: dužine, napetosti, prečnika i modula elastičnosti. Frekvencija n-tog parcijala kod idealno napete ali savitljive žice (sa inharmoničnošću) računa se prema formuli:

$$f_n = nf_0 \left(1 + n^2 B\right)^{0.5}$$

gde je:

f_n — frekvencija n-tog parcijala,

f_0 — osnovna frekvencija,

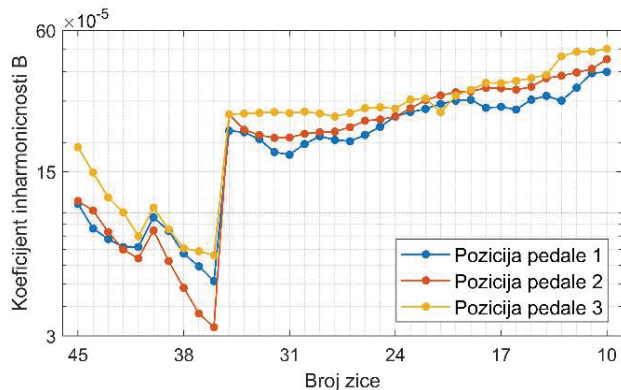
B — koeficijent inharmoničnosti (bezdimenzioni broj, tipično reda veličine 10^{-4} do 10^{-2}).

U praktičnom smislu, veća vrednost B dovodi do bržeg „širenja“ parcijala na frekvencijskoj osi, čime se smanjuje sličnost sa idealnim harmonijskim spektrom i utiče na percepciju visine i boje tona.

Kod harfe se koriste tri vrste žica sa različitim mehaničkim i akustičkim osobinama: metalne, crevne i najlonske žice. Zbog razlika u gustini, elastičnosti i prečniku, svaka od ovih grupa žica generiše različitu vrednost koeficijenta inharmoničnosti B. Veće vrednosti B karakteristične su za kraće i kruće žice viših tonova, dok su duže i fleksibilnije žice dubljeg registra u pravilu bliže harmonijskom spektru.

Pored toga, svaka pojedinačna žica na harfi može proizvesti tri različita tona, zahvaljujući mehanizmu pedala koji menja efektivnu dužinu žice skraćivanjem njene vibracione zone. Time se indirektno utiče i na koeficijent inharmoničnosti, jer je on proporcionalan kvadratu prečnika i obrnuto proporcionalan četvrtom stepenu dužine žice.

Tipična zavisnost koeficijenta B duž tonskog opsega koncertne harfe prikazana je na slici 1, gde se jasno uočava povećanje inharmoničnosti u višim registrima.



Slika 1. Tipična karakteristika zavisnosti koeficijenta inharmoničnosti B za različite pozicije pedala

B. Fantomski parcijali

Fantomski parcijali predstavljaju dodatne frekvencijske komponente koje se javljaju u zvuku žičanih instrumenata, a koje ne pripadaju standardnom harmonijskom nizu osnovne frekvencije. Njihova pojava rezultat je nelinearnih mehaničkih interakcija unutar samog instrumenta, pre svega geometrijske nelinearnosti žice pri velikim amplitudama vibracija i kontaktne nelinearnosti u spojevima sa rezonantnom pločom. Frekvencije fantomskih parcijala odgovaraju zbiru dva regularna parcijala (neparni fantomski parcijali) ili dvostrukoj vrednosti nekog parcijala (parni fantomski parcijali) (Conclin), što ih čini jasno prepoznatljivim u spektralnoj analizi. Fantomski parcijali mogu imati amplitudu koje su niže ali i više od najbližih inharmoničnih parcijala, što zavisnosti sprege rezonantnih pojava u žici i ostalim delovima instrumenta.

Obzirom da fantomski parcijali nastaju kao zbir nižih parcijala njihova amplituda kao i vremenski razvoj ne prati vremenski razvoj najbližeg parcijala. Prisustvo fantomskih parcijala doprinosi kompleksnosti boje zvuka i može uticati na perceptivne karakteristike tona, poput njegovog bogatstva, jasnoće ili prisustva disonantnih nijansi. Harfa je, pored klavira, instrument sa izraženim fantomskim parcijalima.

C. Pomeranje f_0

Pomeranje osnovne frekvencije (f_0), poznato i kao glajd (*glide*), predstavlja karakterističan fenomen kod žičanih instrumenata, koji se najčešće javlja u ranoj fazi tona, neposredno nakon pobude žice. Ova pojava ogleda se u blagom, prolaznom pomaku visine tona, najčešće naviše, koji se zatim postepeno stabilizuje ka nominalnoj frekvenciji. Glavni uzrok takve pojave je u privremenom povećanju napetosti žice usled njenog velikog početnog pomeranja. Kada se žica snažno trzne ili udari, njena efektivna dužina se povećava, što izaziva povećanje napetosti i samim tim promenu osnovne frekvencije.

Kako vibracija opada, napetost se smanjuje, a f_0 se vraća ka stabilnoj vrednosti. Ovaj efekat je naročito izražen kod instrumenata sa okidanjem žice kao što su harfa, gitara i čembalo, dok je kod klavira prisutan u blažoj formi usled kompleksnijeg mehanizma pobude.

III. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

U cilju ispitivanja zavisnosti uočenih fenomena, kao što su pojava fantomskih parcijala, inharmoničnost i pomeranje osnovne frekvencije (f_0) tokom trajanja tona, sprovedena su tri eksperimenta. Svi eksperimenti realizovani su na koncertnoj harfi, koristeći istu žicu koja proizvodi ton A_{44} (osnovna frekvencija 415,3 Hz pri referentnom kamertonu $A = 440$ Hz). Sva merenja obavljena su na Fakultetu muzičke umetnosti Univerziteta umetnosti u Beogradu.

U prvom eksperimentu žica je pobuđivana standardnom tehnikom okidanja, normalno na ravan u kojoj se nalaze žice, tačno na sredini dužine, ujednačenom jačinom, sa ukupno deset ponavljanja. Cilj ovog postupka bio je da se ispita stabilnost tonskih karakteristika pri kontrolisanim uslovima pobude.

U drugom eksperimentu, žica je takođe okidana na sredini, ali sa variranjem jačine pobude kako bi se ispitali efekti amplitudne razlike na raspodelu parcijala i promene osnovne frekvencije.

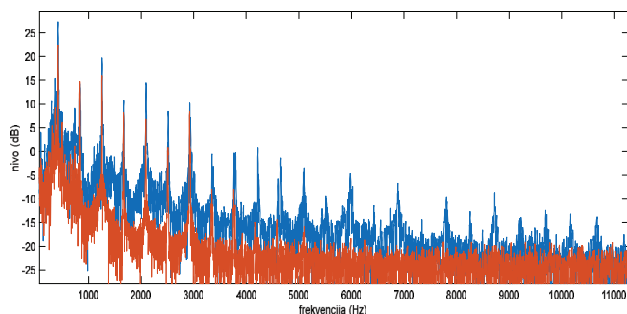
U trećem eksperimentu, analiziran je uticaj mesta pobude. Žica je okidana približno jednakom jačinom na sedam različitih pozicija duž dužine — na rastojanjima od gornje tačke vešanja koje odgovaraju 1/8, 2/8, 3/8, 4/8, 5/8, 6/8 i 7/8 ukupne dužine žice. Ovaj eksperiment omogućava uvid u ulogu mesta okidanja u oblikovanju spektralne strukture i vremenske dinamike tona.

A. Ponovljivost akustičkih karakteristika tona

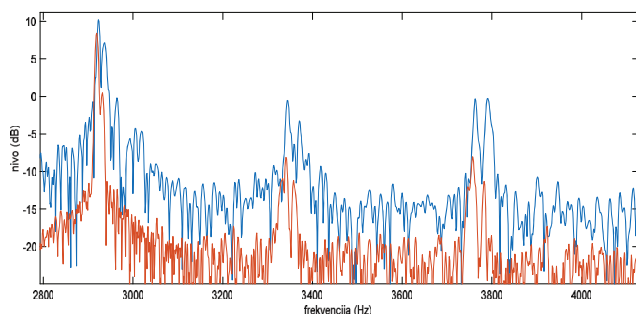
U prvom delu eksperimentalnih merenja analiziran je ton A_{44} koji proizvodi slobodna žica harfe. Žica je bila pobuđena na sredini, srednjom jačinom. Za potrebe analize snimljeno je ukupno deset sukcesivnih izvođenja istog tona. Budući da je tonove izvodila profesorka sa dugogodišnjim i aktivnim izvođačkim iskustvom, može se smatrati da su tonovi proizvedeni pod ujednačenim uslovima, sa istom tehnikom i približno jednakom jačinom sviranja, u meri u kojoj je to moguće u uslovima živog izvođenja.

Na slici 2 prikazan je spektar tona A_{44} u prva 250 ms i u naredna 250 ms nakon nastanka tona. Na slici 3 prikazan je detalj spektra koji obuhvata 7, 8. i 9. harmonik. Sa slike je uočljivo da se fantomski parcijali duže održavaju u odnosu na najbliže inharmonične regularne parcijale. Na slici 4 prikazan je vremenski razvoj 7. harmonika i susednog fantomskog parcijala.

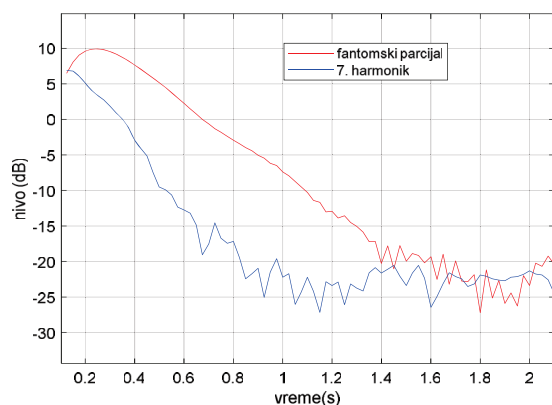
Na slici 4 mogu se uočiti dve važne razlike između harmonijskih i fantomskih parcijala. Prvo, način na koji se uspostavljaju u vremenu značajno se razlikuje — harmonijski parcijali se pojavljuju odmah nakon pobude tona, dok se fantomski parcijali razvijaju postepeno, što ukazuje na različite mehanizme njihovog nastanka. Drugo, brzina njihovog amplitudnog opadanja je različita: fantomski parcijali često imaju sporiju dinamiku opadanja i zadržavaju energiju duže u vremenu. U nekim slučajevima, fantomski parcijali mogu imati i veću energiju od pojedinih inharmoničnih harmonika, što dodatno potvrđuje njihov značajan doprinos ukupnim karakteristikama tona.



Slika 2. Spektralni prikaz tona u prvih 250 ms (plava kriva) i u narednih 250 ms (crvena kriva) nakon uspostavljanja tona.



Slika 3. Spektralni prikaz 7., 8. i 9. harmonika tona u prvih 250 ms (plava kriva) i u narednih 250 ms (crvena kriva) nakon uspostavljanja tona.



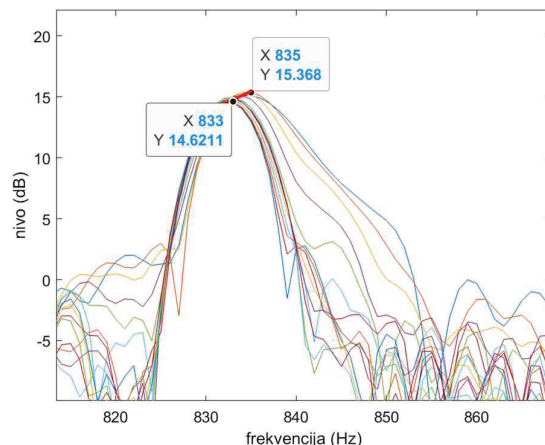
Slika 4. Vremenski razvoj 7. harmonika i njemu najbližeg fantomskog parcijala.

Na slikama 5 i 6 prikazano je pomeranje frekvencije na primeru 2. harmonika i 7. harmonika. U slučaju 7. harmonika do pomeranja dolazi i kod osnovnog (inharmoničnog) parcijala i kod susednog fantomskog parcijala. Na grafikonima su prikazani spektri izračunati za segmente od po 250 ms, počev od trenutka uspostavljanja tona. Segmenti su analizirani sa pomakom od 25 ms.

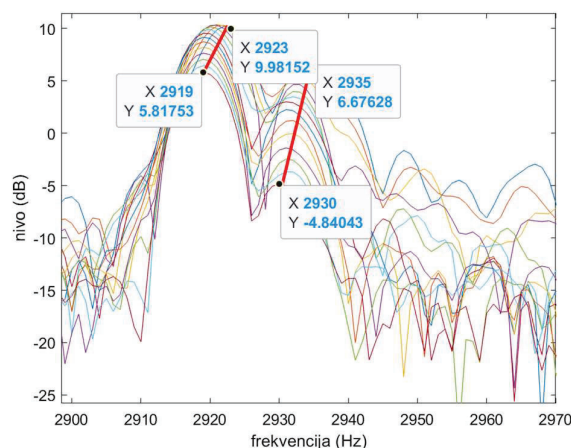
Na slici 7 prikazan je spektrogram 4. harmonika u prvih 500 ms, na kojem se vidi da je potrebno oko 150 ms da bi se frekvencija parcijala stabilizovala. Na slici 14 prikazan je slučaj 7. harmonika i njegovog susednog fantomskog parcijala.

Na slici 9 prikazani su tonovi As4 sukcesivno odsvirani sa pobudom na sredini žice i jednakom jačinom. Uočljivo je da svi tonovi imaju gotovo identičnu vremensku anvelopu, što ukazuje

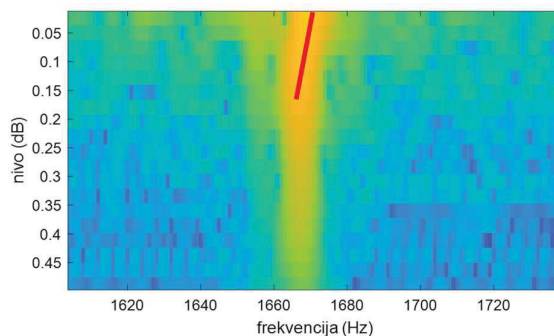
na dosledan spektralni sadržaj. Na slici 10 prikazani su spektri tonova As4 dobijeni iz 10 ponovljenih merenja na istoj poziciji i sa istim intenzitetom, kao i detalji spektra koji obuhvataju 7, 8, 9. i 10. harmonik sa karakteristično izraženim fantomskim parcijalima.



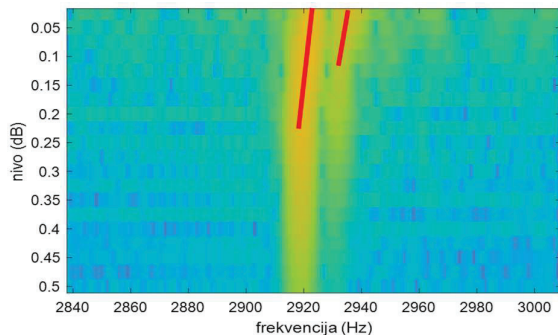
Slika 5. Spektralni prikaz 2. harmonika tona, izračunat na segmentima dužine 250 ms sa pomeranjem prozora od 25 ms.



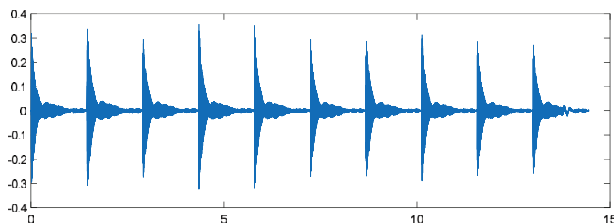
Slika 6. Spektralni prikaz 7. harmonika tona, izračunat na segmentima dužine 250 ms sa pomeranjem prozora od 25 ms.



Slika 7. Spektrogram 4. harmonika tona računat na segmentima od 250 ms sa pomeranjem od 25ms



Slika 8. Spektrogram sedmog harmonika tona i njegovog pridruženog fantomskog parcijala računat na segmentima od 250ms sa pomeranjem od 25ms

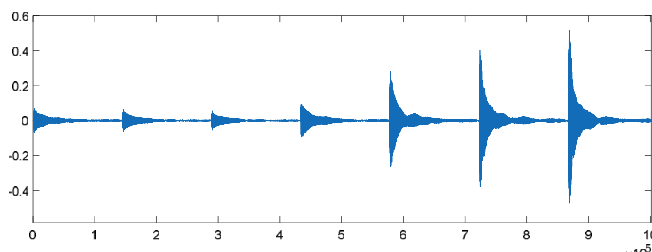


Slika 9. Vremenske anvelope 10 sukcesivnih tonova As4 odsviranih na isti način sa pobudom na sredini žice

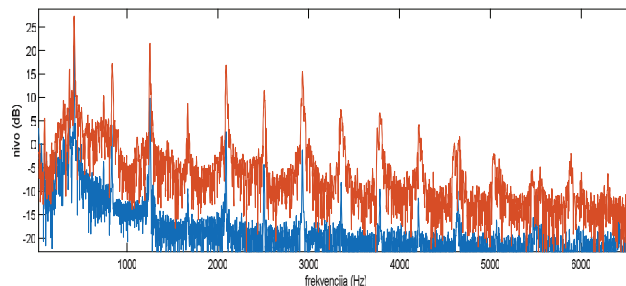
B. Karakteristike tonova sa različitim jačinama pobude

U drugom eksperimentalnom uzorku ispitivano je kako se menjaju karakteristike tonova kada se žica pobuđuje na istoj poziciji — u sredini svoje dužine — ali sa različitim intenzitetima. Cilj ovog eksperimenta bio je da se utvrdi u kojoj meri promene jačine pobude utiču na spektralni sastav i vremensku stabilnost tona. Na slici 10 prikazan je talasni oblik tonova dobijenih pri sedam različitim intenzitetima pobude, što omogućava direktno poređenje amplitudne dinamike i strukture napada u zavisnosti od primenjene sile.

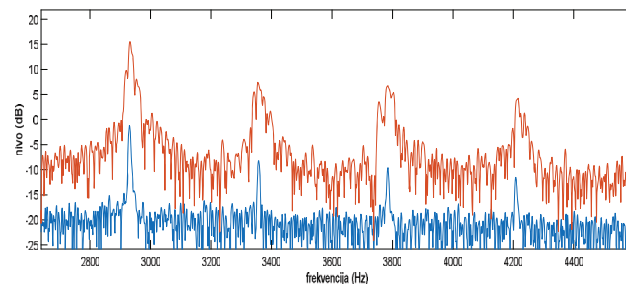
Na slikama 11 i 12 prikazani su spektri tonova As4 dobijenih pri najslabijem (plava boja) i najjačem intenzitetu pobude (crvena boja). Slika 11 prikazuje deo spektra u kojem su jasno izraženi osnovni parcijali, dok je na slici 12 fokusiran prikaz sedmog, osmog, devetog i desetog parcijala — frekvenzijskog opsega u kojem su identifikovani karakteristični fantomski parcijali. Sa prikazanih grafikona jasno se vidi da su fantomski parcijali prisutni samo pri jačoj pobudi, dok su pri slabijoj pobudi praktično odsutni. Ova razlika ukazuje na to da se pojava fantomskih parcijala dovodi u vezu sa izraženijim nelinearnim efektima, koji se ispoljavaju tek pri višim nivoima pobude.



Slika 10. Vremenske anvelope 7 sukcesivnih tonova As4 odsviranih na različitim jačinama pobude



Slika 11. Spektri tonova As4 sa pobudom na sredini dužine žice sa najslabijom (plava boja) i najjačom pobudom (crvena boja)



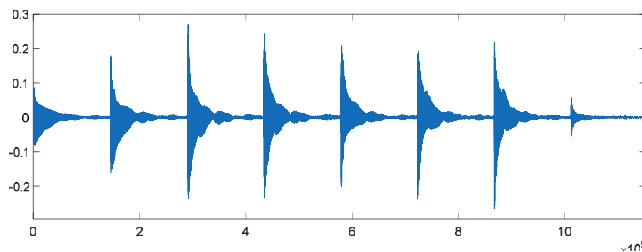
Slika 12. Deo spektra koji obuhvata sedmi, osmi, deveti i deseti harmonik sa najslabijom (plava boja) i najjačom pobudom (crvena boja)

C. Karakteristike tonova sa različitim pozicijama pobude

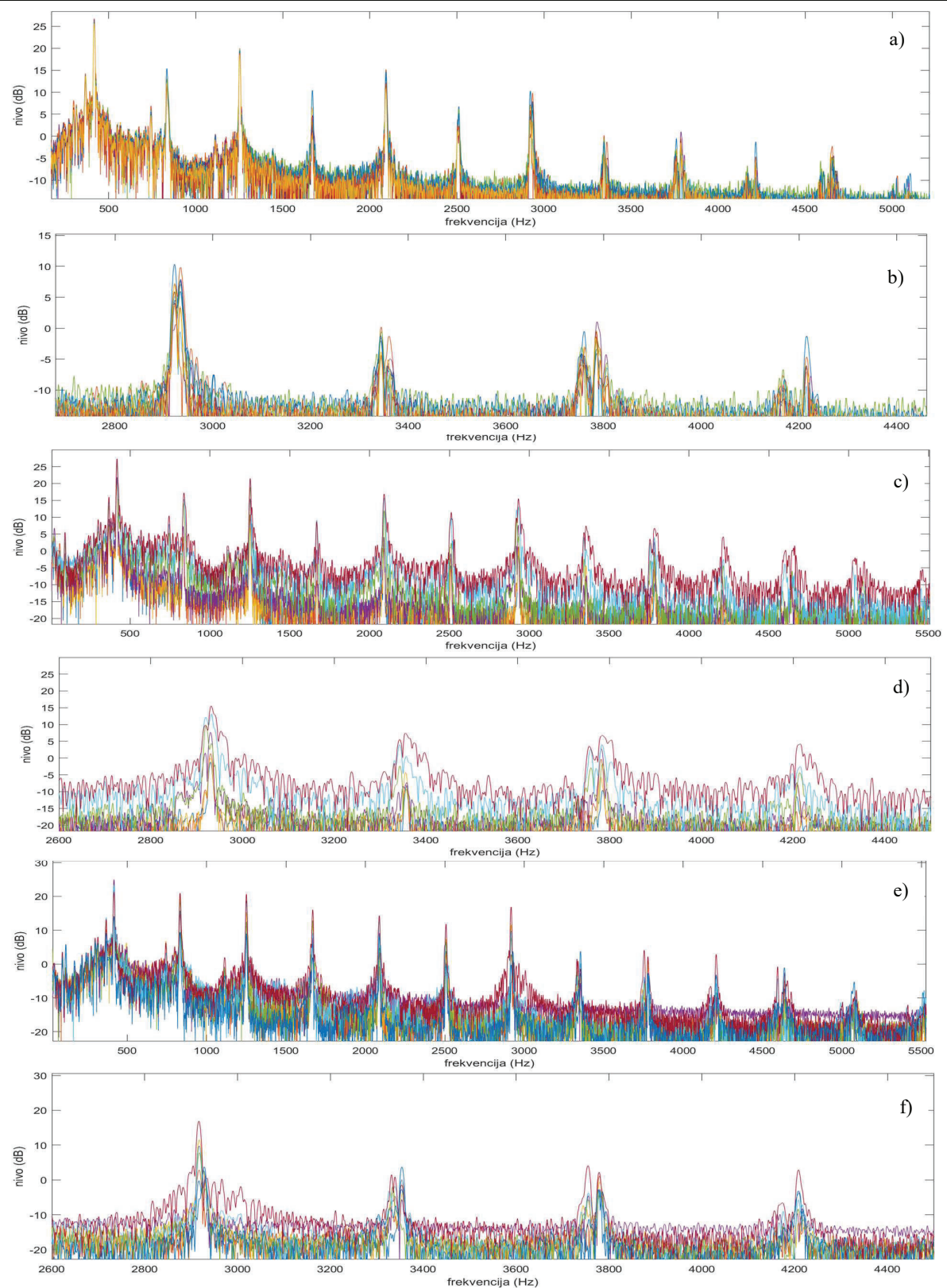
Da bi se utvrdilo kolike razlike u kvalitetu tona nastaju promenom pozicije pobude, pri relativno stabilnoj jačini okidanja žice, izveden je eksperiment u kome je ista žica pobuđivana na unapred definisanim tačkama duž svoje dužine. Žica je okidana na pravilnim razmacima — na pozicijama 1/8, 2/8, 3/8, 4/8, 5/8, 6/8 i 7/8 u odnosu na gornji kraj (tačku vešanja). Ovakva postavka omogućila je sistematsko ispitivanje uticaja položaja pobude na spektralnu strukturu, pojavu i intenzitet fantomskih parcijala, kao i na stabilnost osnovne frekvencije.

Uvidom u talasne oblike i spektre dobijenih tonova uočeno je da se značajne razlike javljaju pretežno u slučajevima kada se žica pobuđuje veoma blizu krajnjim tačkama vešanja. U tim slučajevima dobijaju se tonovi sa znatno manjom amplitudom i sa slabije izraženom modulacijom obvojnice, što ukazuje na odsustvo izraženih fantomskih parcijala.

Na slici 13 prikazani su talasni oblici tonova dobijenih na različitim pozicijama pobude. Na slici 14 prikazani su njihovi spektri, uključujući detaljan prikaz frekvenzijskog opsega u kojem se nalaze sedmi, osmi, deveti i deseti harmonik.



Slika 13. Vremenske anvelope 8 sukcesivnih tonova As4 odsviranih na različitim pozicijama koje sukvizitantno raspoređene duž žice



Slika 14. Spektralne karakteristike signala snimljenih u tri eksperimenta. a) spektri tona As 4 iz više ponovljenih merenja sa pobudom na sredini žice , b) detalj spectra pod a) koji pokazuje 7.,8., 9. i 10. harmonik, c) spektri tona As4 sa pobudom na sredini žice sa različitom jačinom pobude, d) detalj spectra pod c) koji pokazuje 7.,8., 9. i 10., e) spektri tona As 4 iz više ponovljenih merenja sa pobudom iste jačine na raznim delovima žice, f)) detalj spectra pde) koji pokazuje 7.,8., 9. i 10. harmonik

IV. ZAKLJUČAK

U okviru tri eksperimenta analizirani su uticaji načina dobijanja tona na otvorenoj žici koncertne harfe. U eksperimentu sa višestrukim okidanjem žice na središnjoj poziciji pokazano je da se dobijaju konzistentne i ponovljive spektralne karakteristike. Uočen je stabilan raspored harmonika, sa jasno izraženom inharmoničnošću, kao i postojana pozicija fantomskih parcijala. Takođe je registrovano karakteristično početno pomeranje osnovne frekvencije (*glajd*), koje se ponavlja sa malim varijacijama između sukcesivnih uzoraka. Energetski balans među parcijalima ostaje sličan u svim snimcima, što ukazuje na visok stepen kontrole pri pobudi i potvrđuje stabilnost tonova u uslovima standardizovanog izvođenja.

Promenom jačine pobude ne dolazi do značajnih pomeranja pozicija parcijala, što implicira da osnovna struktura vibracionih modova ostaje stabilna. Međutim, pojava fantomskih parcijala pokazuje izraženu zavisnost od intenziteta pobude. Pri niskim nivoima pobude fantomski parcijali su uglavnom odsutni ili ispod praga detekcije, dok se pri višim intenzitetima jasno registruju u spektru. Povećanje intenziteta pobude takođe dovodi do uočljive varijacije frekvencija pojedinih parcijala, manifestovane kroz širenje spektralnog pika u njihovoj neposrednoj okolini, što je verovatno posledica izraženijih nelinearnih efekata u interakciji sistema žica–telo instrumenta.

Kod promena pozicije pobude, pri održavanju približno konstantnog intenziteta, dolazi do preraspodele energije među parcijalima, što ukazuje na zavisnost spektralne strukture od mesta okidanja. Promenom pozicije selektivno se pojačavaju ili prigušuju određeni vibracioni modovi, što direktno utiče na tonalnu boju. Uz to, uočava se i varijabilna pojava fantomskih parcijala čiji intenzitet i prisutnost zavise od mesta pobude, što dodatno potvrđuje složenu nelinearnu spregu između žice i rezonantne strukture instrumenta.

Rezultati analize uticaja pozicije i intenziteta pobude ukazuju na značajnu varijabilnost u spektralnoj strukturi tona, koja se može koristiti kao interpretativno sredstvo u izvođenju. Uočene razlike u prisustvu fantomskih parcijala, energetskoj raspodeli i stabilnosti osnovne frekvencije potvrđuju da promene tehnike sviranja mogu rezultirati akustički prepoznatljivim i perceptivno relevantnim efektima. Ovi nalazi pružaju čvrstu osnovu za nastavak istraživanja kroz subjektivne testove, kako sa sintetisanim, tako i sa realnim tonskim uzorcima, sa ciljem dubljeg razumevanja njihove percepcije i interpretativnog potencijala.

ZAHVALNICA

Zahvaljujemo se Fakultetu muzičke umetnosti Univerziteta umetnosti u Beogradu i profesorki Mileni Stanišić, koji su nam omogućili realizaciju snimaka neophodnih za ovo istraživanje.

LITERATURA

- [1] J. Woodhouse, "The acoustics of a plucked harp string", *Journal of Sound and Vibration* 523 (2022) 116669
- [2] I. M. Firth, "On the Acoustics of the Harp", *ACUSTICA*, Vol. 37 (1977)
- [3] Hanna Järveläinen, Matti Karjalainen, Perceptibility of Inharmonicity in the Acoustic Guitar, *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*, Vol. 92 (2006) 842 – 847
- [4] B. E. Anderson, and W. J. Strong, "The effect of inharmonic partials on pitch of piano tones," *J. Acoust. Soc. Am.* **117**, 3268–3272 (2005). <https://doi.org/10.1121/1.1882963>
- [5] Hanna Järveläinen, Vesa Välimäki, Matti Karjalainen, "Audibility of the timbral effects of inharmonicity in stringed instrument tones", *ARLO* 2(3), July 2001
- [6] Alexander Galembo, Anders Askenfelt, Lola L. Cuddy, Frank A. Russo, "Perceptual Relevance of Inharmonicity and Spectral Envelope in the Piano Bass" Range", *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA* Vol. 90 (2004) 528 – 536
- [7] Elisabeth A. Cohen, "Some Effects of Inharmonic Partial on Interval Perception", *Music Perception*, 1/3, (1984), 323–349.
- [8] H. A. Conklin, "Piano strings and "phantom" partials," *J. Acoust. Soc. Am.* **102**, 659 (1997). <https://doi.org/10.1121/1.419713>
- [9] H. A. Conklin, "Generation of partials due to nonlinear mixing in a stringed instrument," *J. Acoust. Soc. Am.* **105**, 536–545 (1999). <https://doi.org/10.1121/1.424589>
- [10] Hanna Järveläinen, Vesa Välimäki, Audibility of Initial Pitch Glides in String Instrument Sounds, Conference: Proc. Int. Computer Music Conf. (ICMC'01), pp. 282–285.
- [11] Nelson Lee, Julius O. Smith III, Jonathan Abel and David Berners, K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished. PITCH GLIDE ANALYSIS AND SYNTHESIS FROM RECORDED TONES, *Proc. of the 12th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-09)*, Como, Italy, September 1–4, 2009

ABSTRACT

This study investigates the acoustic and perceptual aspects of harp tones through the analysis of four characteristic phenomena: partial inharmonicity, temporal variation of the fundamental frequency (glide), the emergence of phantom partials, and their temporal development. The experimental corpus consists of audio recordings of a single harp string, plucked under three different conditions: (1) multiple plucks at the same position with constant intensity, (2) varying plucking intensity at a fixed position, and (3) changing the plucking position while keeping the intensity approximately constant. Special emphasis is placed on the third condition, in order to examine the effects of excitation point on the spectral structure and temporal stability of the tone. The analysis includes tracking the amplitude dynamics of both fundamental and phantom partials over time, as well as monitoring changes in the fundamental frequency, with the goal of identifying the relationship between physical excitation parameters and the resulting tone characteristics.

Acoustic Variations of Harp Tones with Different Plucking Positions and Techniques

Tatjana Miljković, Dragana Šumarac Pavlović, Jelena Čertić