

Modelovanje oscilovanja zvona snimanjem zvuka u bliskom polju

Iva Salom, Miomir Mijić, and Vladimir Čelebić

Sadržaj — Analiza modova oscilovanja i modelovanje zvona primenom numeričkih metoda tema su mnogih radova. U ovom radu je opisana mogućnost primene merenja zvuka u bliskom polju zvona za ispitivanje modova oscilovanja zvona.

Ključne reči — analiza konačnih elemenata, blisko polje, geometrijsko modelovanje, modovi oscilovanja, zvono.

I. UVOD

ZVONO predstavlja veoma specifičan izvor zvuka. Iako se u crkvama koristi više od šest vekova, akustičko ponašanje zvona i njegov uticaj na subjektivnu percepciju zvuka još uvek nisu sasvim objašnjeni. Vekovima su se praktična iskustva livaca o “dobro naštimovanom zvonu” prenosila sa kolena na koleno. Tek danas sa razvojem tehnike i mogućnosti savremenih računara moguće je detaljnije analizirati složeni zvuk zvona.

Softverski paketi za geometrijsko modelovanje, koji koriste analizu konačnih elemenata (*Finite Element Analysis*), pokazali su se kao vrlo interesantni za primenu na zvonima i određivanje frekvencija modova oscilovanja zvona [1 – 7]. Na Sl. 1c prikazano je prvih pet modova oscilovanja zvona dobijenih modelovanjem u softverskom paketu LS-DYNA [6]. Međutim, na spektralni sastav zvuka zvona imaju uticaj razni parametri, kao što su odstupanja u geometrijskom obliku, ukrasi na zvonu, neujednačenost legure po zapremini i razne druge nepravilnosti i oštećenja, tako da se dobijeni rezultati uvek moraju verifikovati spektralnom analizom snimljenog zvuka zvona.

Za analizu modova oscilovanja zvona primenu je našla i interferometrija, [1], [8] – [10]. Pošto se spektralnom analizom prethodno snimljenog zvuka zvona odrede frekvencije modova oscilovanja, zvono se pobuđuje tačno jednom frekvencijom analiziranog moda, a na fotografskoj ploči se dobija slika zvona sa jasno istaknutim čvorovima (Sl. 1d).

U radovima [6] i [7] vršeno je modelovanje oscilovanja zvona merenjem akcelerometrom u velikom broju tačaka po površini zvona.

U ovom radu opisana je metoda kojom se ispituju položaji čvorova i vrši utvrđivanje modova oscilovanja zvona snimanjem zvuka zvona u bliskom polju.

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

Iva Salom, Institut Mihajlo Pupin, Volgina 15, 11050 Beograd, Srbija; (e-mail: iva.salom@institutepupin.com).

Miomir Mijić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Srbija (e-mail: emijic@etf.rs).

Vladimir Čelebić, Institut Mihajlo Pupin, Volgina 15, 11050 Beograd, Srbija; (e-mail: vladimir.celebic@institutepupin.com).

II. KARAKTERISTIKE ZVUKA ZVONA

Zvuk klasičnih muzičkih instrumenata sastoji se od diskretnih komponenata čije su frekvencije u harmonijskom odnosu. Za razliku od muzičkih instrumenata, gde zvuk nastaje oscilovanjem elastičnog medija sa jednim efektivnim stepenom slobode (žica ili vazdušni stub), zvuk zvona nastaje vibriranjem trodimenzionalne osnosimetrične mase. Udarom zvona pobuđuju se normalni modovi oscilovanja zvona, čije se frekvencije oscilovanja uočavaju u spektru nastalog zvuka kao neharmonijske diskretne komponente, takozvani parcijali.

Svaki od modova oscilovanja zvona karakterišu linije na zvonu (čvorovi) duž kojih nema oscilovanja. Svaki mod zvona se može označiti sa dva broja (k, m), gde k predstavlja polovinu broja čvorova u horizontalnoj ravni, a m predstavlja broj čvorova u vertikalnoj ravni [11] – [14].

Na Sl. 1 za date modove oscilovanja zvona prikazani su načini oscilovanja u horizontalnoj (Sl. 1a) i vertikalnoj (Sl. 1b) ravni. Za svaki mod dat je i naziv koji nosi u standardnoj terminologiji koja se koristi pri analizi zvona. Modovi na Sl.1 poređani su redosledom kojim su poređane frekvencije modova u spektru.

Vrlo česta pojava kod zvona je odstupanje od osne simetrije u odnosu na vertikalnu osu koja prolazi kroz centar zvona, koja dovodi do razdvajanja frekvencije moda na dve bliske frekvencije (en. *doublets*).

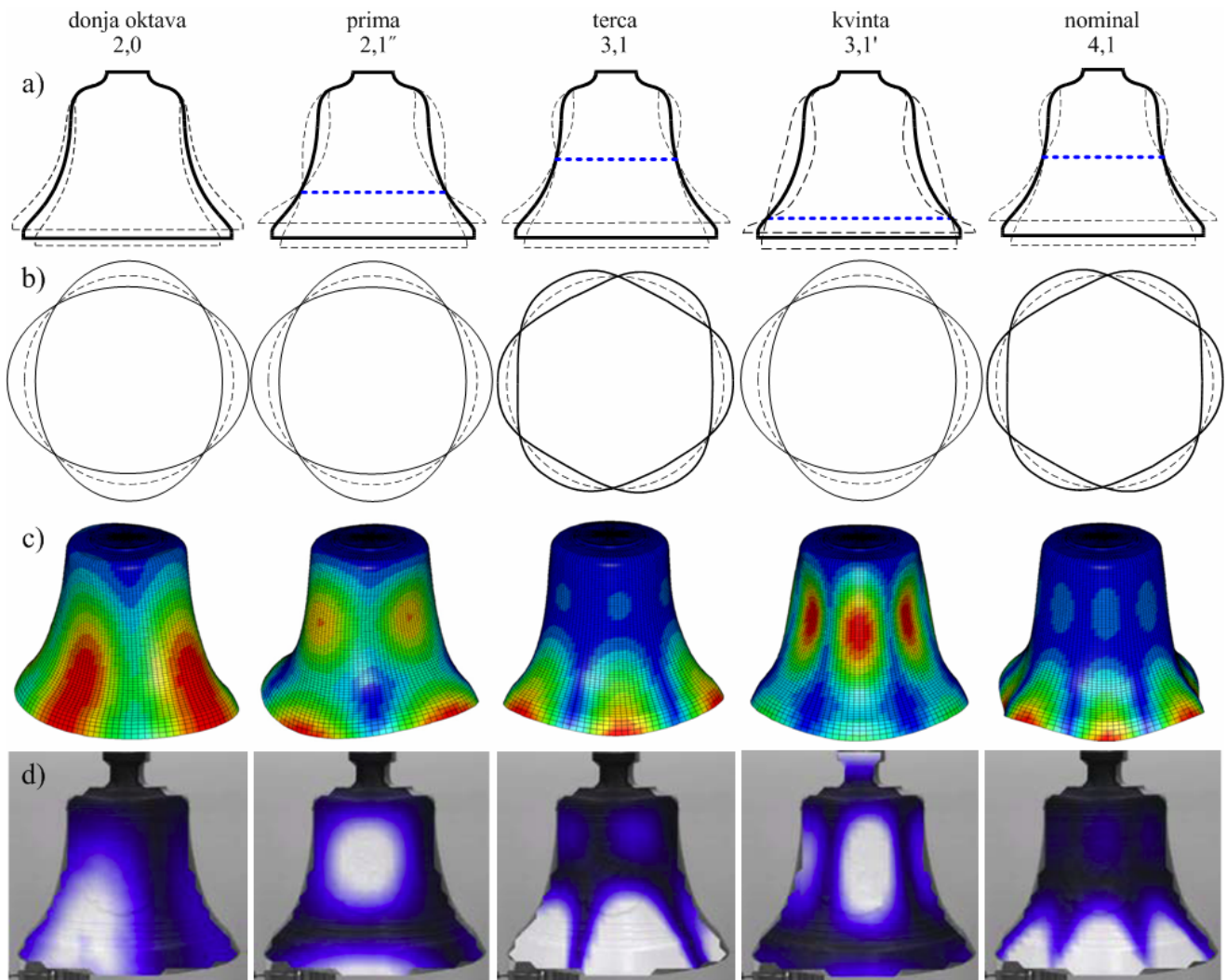
III. OPIS METODE MODELOVANJA MERENJEM ZVUKA U BLISKOM POLJU

A. Ideja

Osnovna ideja predložene metode merenja zvuka u bliskom polju zvona jeste da se praćenjem promene energije na frekvenciji jednog parcijala duž vertikalne i duž horizontalne ose utvrdi na kom mestu na zvonu se za posmatrani parcijal nalaze čvorovi. Na osnovu rasporeda čvorova moguće je utvrditi (na osnovu Sl. 1) koji mod zvona se analizira.

B. Mereno zvono i merne tačke

Mereo zvono je mase 800 kg i izliveno je u livnici Kremenović. Zvono je visine 94 cm, od dna do poslednjeg prevoja. Prečnik otvora zvona je 106 cm. U vertikalnoj ravni merenje je vršeno u 12 tačaka (5.5 cm, 11 cm, 20 cm, 29 cm, 38 cm, 47 cm, 56 cm, 65 cm, 74 cm, 83 cm, 94 cm, 100 cm – poslednja tačka je iznad poslednjeg prevoja). U horizontalnoj ravni merenje je vršeno u 5 tačaka – za uglove od 0°, 22.5°, 30°, 45° i 90° u odnosu na mesto pobude. Uglovi su određeni na osnovu položaja čvorova za prva tri moda oscilovanja u horizontalnoj ravni (Sl. 1b).



Sl. 1 Modovi oscilovanja zvona: a) u horizontalnoj ravni, b) u vertikalnoj ravni, [11] – [13], c) slike dobijene geometrijskim modelovanjem [6], d) slike dobijene primenom interferometrije [8]

C. Postavka merenja i oprema

Za potrebe merenja napravljen je nosač sa držačima za četiri mikrofona, koji je pričvršćen za nosač zvona sa gornje strane (Sl. 2). Sa donje strane je naslonjen na zvono gumenim osloncem presvučenim sunderom da bi se izbeglo prenošenje vibracija na nosač. Držači mikrofona mogu se pomerati po vertikalnoj i horizontalnoj osi kako bi svaki mikorfon bio postavljen u približno istu poziciju u odnosu na zvono za svako merenje. S obzirom da bi bilo neprecizno pomerati nosač za svako merenje u horizontalnoj ravni, pomerana je pobuda zvona. Minijaturni merni mikrofoni su preko četvorokanalnog mikrofonskog multipleksera (*USL Inc. MMP 10B*) povezani na jedan kanal četvorokanalne audio kartice (*Digigram VXPocket 440*). Referentni mikrofoni (*Nti MiniSPL*) postavljeni su sa strane (Sl. 2) i povezan na drugi kanal audio kartice. Snimanje je vršeno dvokanalno, frekvencija odabiranja 44.1 kHz. Za svaku mernu tačku posebno je pobuđivano zvono udarom bata.

D. Obrada rezultata

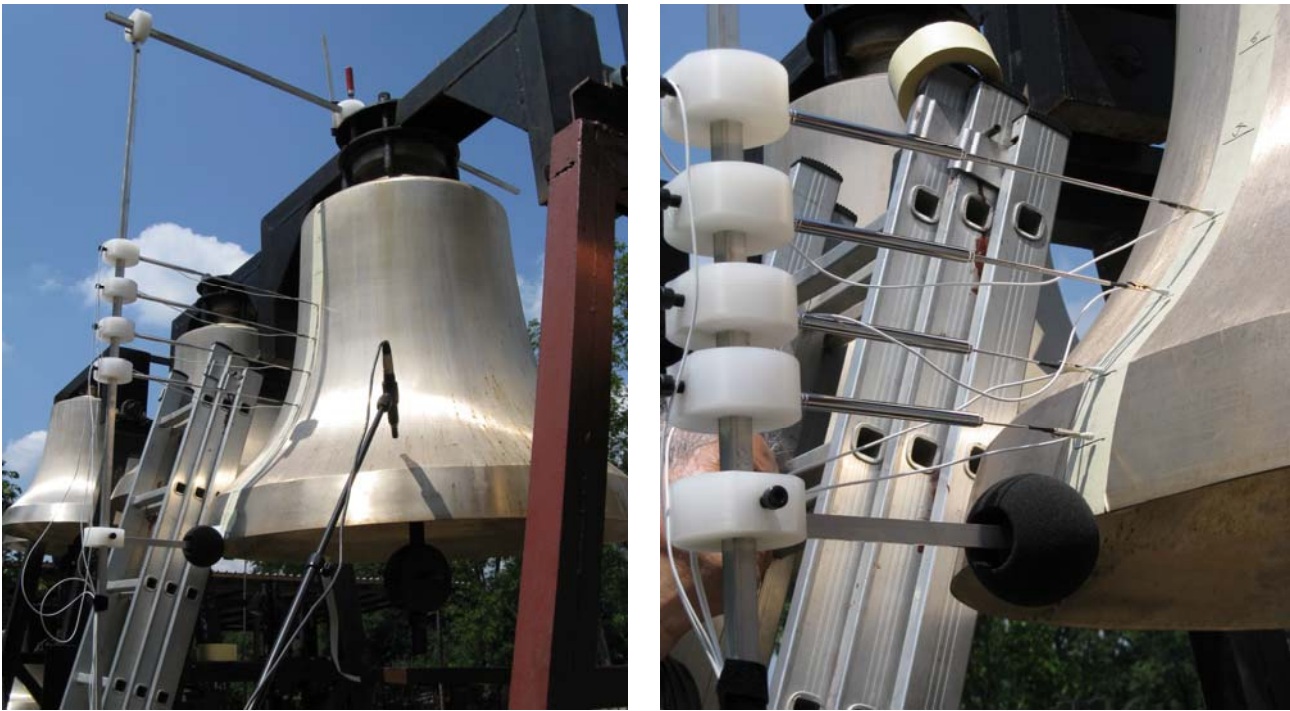
Snimljeni signali su obrađeni u programskom paketu MATLAB™ [15] u nekoliko koraka. Prvi korak je bio učitavanje dvokanalnih snimaka i generisanje po dva signala iste dužine (215000 odbiraka, tj. oko 4.8 s): signala za analizu i referentnog signala. Sledeći korak je

bio spektralna analiza snimljenih signala i utvrđivanje frekvencija na kojima se nalaze parcijali analiziranog zvona. Na kraju je za ukupno 13 frekvencija (9 prvih parcijala, od kojih su 4 bili udvojeni) izvršeno određivanje amplitude u FFT spektru za svaki snimak, normiranje amplitude u odnosu na referentni snimak i crtanje grafika zavisnosti amplitude u odnosu na položaj po vertikali.

Analizom snimljenih referentnih signala dobile su se značajne razlike u odnosima pojedinih parcijala u spektru za različite uglove pobude. Zaključak je da je položaj udara bitno uticao na referentni snimak, tako da bi trebalo referentni mikrofoni više udaljiti od zvona ili bi trebalo da relativni položaj mesta udara i referentnog mikrofona za svako merenje bude isti. S obzirom na ovaj zaključak nije bilo moguće precizno analizirati promene u horizontalnoj ravni.

IV. REZULTATI

Na Sl. 4 prikazan je spektar snimljenog zvuka analiziranog zvona u dalekom polju. U spektru se uočavaju istaknute komponente, koje predstavljaju frekvencije modova oscilovanja zvona. Analizirano je prvih 9 parcijala. Uočeno je da je kod određenih parcijala došlo do udvajanja frekvencije, kao posledica nesavršenosti osne simetrije zvona. Za takve parcijale vršena je analiza za obe komponente.



Sl. 2 Postavka merenja

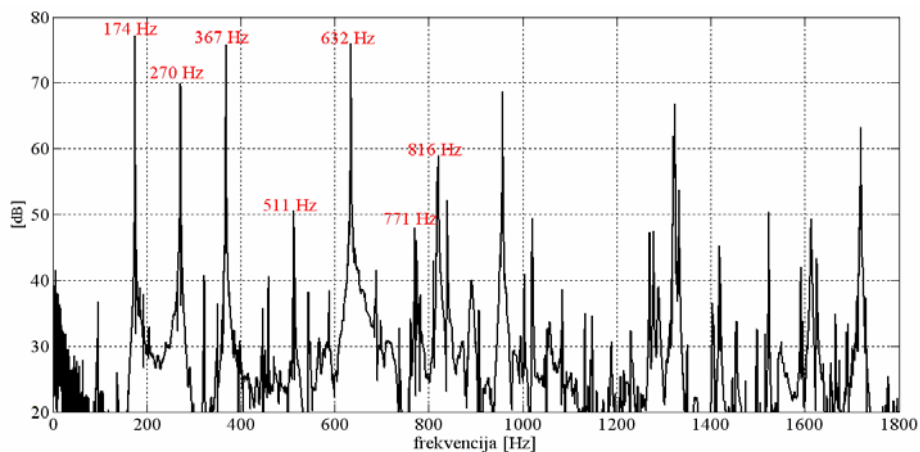
Na Sl. 3 crvenom bojom označeno je 7 parcijala čije su promene amplituda duž vertikalnih osa, za svih 5 pomeraja po horizontalnoj osi, prikazane na Sl. 4 i označeni su po modovima koje bi trebalo da predstavljaju po redosledu frekvencija. Za većinu parcijala može se uočiti vrlo dobra konzistentnost rezultata i jasno isticanje maksimuma i minimuma oscilovanja – čvorova. Na pojedinim parcijalima dolazi do odstupanja od rezultata u pojedinim merenjima, što je verovatno posledica činjenice da je merenje u vertikalnoj ravni izvršeno u okolini čvora za posmatranu frekvenciju. Do odstupanja dolazi i na jednoj od dve duplirane frekvencije jednog parcijala (na primer, na frekvenciji udvojenog prvog parcijala, 175.0 Hz, odstupanje u merenju za uglove od 0° i 90° i na frekvenciji udvojenog drugog parcijala, 270.0 Hz, odstupanje u merenju za ugao od 22.5°), što ukazuje na to da je vertikalna osa merenja postavljena na mestu oscilovanja jedne od udvojenih komponenti.

Analizom rezultata i poređenjem sa mogućim položajima čvorova u horizontalnoj ravni na Sl. 1, zaključuje se da su položaji čvorova na visinama 20 cm,

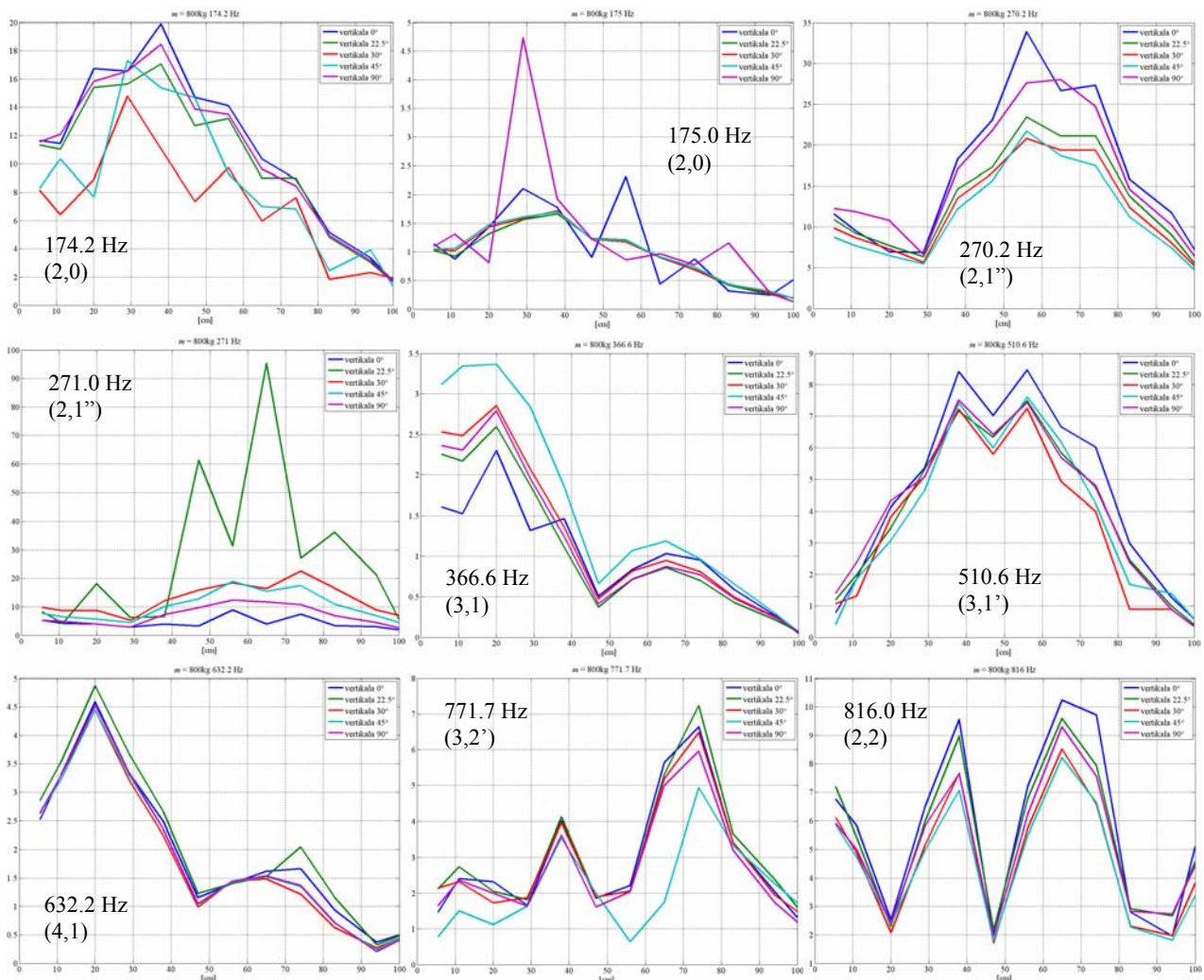
29 cm i 47 cm, srazmerno rezoluciji merenja. Prvi parcijal (oko 174 Hz) nema čvorova u vertikalnoj ravni, a najjače zračenje je u donjoj polovini zvona, što se poklapa sa teorijskim očekivanjima. Drugi parcijal ima minimum zračenja na visini od oko 29 cm, za obe udvojene komponente (sem u slučaju pomenutog merenja sa velikim odstupanjem). Čvor na oko 47 cm se sasvim dobro uočava na trećem (367 Hz) i petom (632 Hz) parcijalu i odgovara očekivanom položaju. U slučaju četvrtog parcijala (511 Hz), iako veoma konzistentan za sva merenja, rezultat ne odgovara očekivanom (čvor je očekivan ispod 29 cm, dok je jedino u sredini zvona pri velikom zračenju dobijen lokalni minimum na 47 cm). Šesti parcijal (4,1'), koji bi trebalo da ima čvor na istom mestu kao i četvrti parcijal, ne može se uočiti u spektru. Sedmi (771 Hz) i osmi (816 Hz) parcijal imaju po 2 jasno izdvojena čvora.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu su predstavljena preliminarna istraživanja mogućnosti primene modelovanja oscilovanja zvona snimanjem zvuka u bliskom polju. Na osnovu izloženih rezultata analize zvuka zvona snimanog u bliskom polju i



Sl. 3 Spektar analiziranog zvona



Sl. 4 Promene amplituda pojedinih parcijala u vertikalnoj ravni zvona

poređenja energije parcijala na različitim položajima u vertikalnoj ravni pokazano je da je na ovaj način moguće modelovati oscilovanje zvona. Dalja istraživanja treba usmeriti ka preciznijem merenju veće rezolucije, modelovanju oscilovanja u horizontalnoj ravni i detaljnijoj analizi uticaja dužine analiziranog signala.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju livnici Kremenović, koja je omogućila merenja zvona.

LITERATURA

- [1] Matthew J. Fisher, "Vibration Modes of a C4 Handbell: Holographic Interferometry and Finite Element Analysis," Proceeding of The National Conference On Undergraduate Research (NCUR) 2001, University of Kentucky, Lexington, March 15-17, 2001
- [2] H. Spiess, B. Lau, P. Wriggers, A. Schneider, R. Bader, M. Wiggenhagen, "Analysis of Bell Vibrations," Available: <http://gid.cimne.upc.es/2004/papers/p199.pdf>
- [3] I. Aldoshina, A. Nicaranov, "The Investigation of Acoustical Characteristics of Russian Bells," Audio Engineering Society, 108th Convention, Paris, Reprint 5117, February 19-22, 200
- [4] J. Bauer, L. Schmidt, "Einfluss der Glockenzier auf den Klang von Kirchenglocken"
- [5] J. Bauer, L. Schmidt, B. Kotterba, "Einfluss der Glockenzier auf den Klang von Kirchenglocken," 8. Forum Akustische Qualitätssicherung, pp. 12-1 – 12-6
- [6] G. Blankerhorn, I. Müller, A. Siebert, K. Schweizerhof, "On the numerical analysis of a carillon bell using LS-DYNA with a specific view on model validation," 5. LS-DYNA Anwenderforum, Ulm 2006
- [7] A. Siebert, G. Blankerhorn, K. Schweizerhof, "Investigating the Vibration Behavior and Sound of Church Bells Considering Ornaments and Reliefs Using LS-DYNA," 9th International LS-DYNA Users Conference, pp. 8-1 – 8-12
- [8] H. Fleischer, "Hörversuche mit Glockenklingen," Heft 1/07 der Reihe Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik, Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, ISSN 1430-936X
- [9] R. Perrin, "Normal modes of the elephant bell," *Proc. of the Stockholm Music Acoustics Conference*, August 6-9, 2003 (SMAC 03), Stockholm, Sweden
- [10] T. D. Rossing, D. S. Hampton, B. E. Richardson, H. J. Sathoff, A. Lehr., "Vibrational modes of Chinese two-tone bells," *J. Acoust. Soc. Am.* 83(1), pp369-373, Jan 1988
- [11] A. Lehr., "Partial Groups in the Bell Sound," *J. Acoust. Soc. Am.* 79(6), pp2000-2011, June 1986
- [12] A. Lehr, "The Designing of Swingin Bells and Carillon Bells in the Past and Present," Athanasius Kircher Foundation, Astén, Netherlands 1987
- [13] T. D. Rossing, R. Perrin, "Vibrations of Bells," *Applied Acoustics* 20 pp41-70, 1987
- [14] J. Wernisch, "Untersuchungen an Kirchenglocken," Dissertation an der Technischen Universität Wien
- [15] MATLAB™, Ver. 7.01.24704 (R14), Copyright 1984-2004, The MathWorks, Inc.

ABSTRACT

Analysis of bell vibrations and numerical modeling of a bell were subject of many recent papers. A new method of modeling of bell vibrations, based on near field sound measurements, is presented in this paper.

MODELING OF BELL VIBRATIONS USING NEAR FIELD SOUND MEASUREMENTS

Iva Salom, Miomir Mijić, Vladimir Čelebić