

Uporedna analiza frekvencijskog spektra jednodelne C frule

Krstić V. Sonja, *Profesor, VŠER*, Drinčić G. Dragan, *Profesor, VŠER*, and Milošević B. Mirko, *Saradnik, VŠER*

Sadržaj — U radu je prezentovana uporedna analiza rezultata subjektivnog i objektivnog merenja jednodelne C frule. Frule su za potrebe eksperimenta podeljene u grupe prema vrsti drveta od koje je frula napravljena (frule sa istim unutrašnjim prečnikom) i prema unutrašnjem prečniku frule (frule izrađene od iste vrste drveta). Za potrebe merenja na svakoj od frula su pomoću aparature za dobijanje zvuka odsvirani tonovi osnovne i jedne preduvane oktave, velikim nivoom dinamike i pojedinačnim trajanjem tonova oko 2 sekunde. Svaki ton je posebno analiziran. Rezultati su pokazali da frekvencijski spektar frule zavisi i od vrste drveta od kojeg je napravljena i od veličine unutrašnjeg prečnika cevi frule. Rezultati su pokazali i da je ta zavisnost drugačija nego kod subjektivnog merenja. Iz rezultata eksperimenta zaključujemo da postoje karakteristične anomalije u spektru koje su zajedničke za sve ispitane frule, a i one koje su specifičnosti pojedinih frula.

Ključne reči — frula, frekvencijski spektar

I. UVOD

OKOM 2005. godine u saradnji sa Ministarstvom prosvete i Centrom za ranu muziku „Renesans“ iniciran je Projekat za uvođenje muzičkog instrumenta frula u plan i program predmeta Muzičko vaspitanje u osnovnim školama. Osmišljeno je da to bude C frula jer je najjednostavnija za učenje i sviranje. Zato su frule sa kojima su merenja urađena u C tonalitetu. S druge strane, neophodno je da se deci obezbede što kvalitetnije frule koje neće mnogo koštati. Zbog toga su uzete u razmatranje frule napravljene od različitih vrsta drveta.

Zvuk frule zavisi od brojnih parametara. Oblik i konstrukcija same frule mogu biti različiti - u ovom radu su razmatrane jednodelne frule. Intonacija frule može biti različita - u ovom radu su razmatrane C frule. Parametri koji su menjani u ovom radu su vrsta drveta od koje su frule pravljene i unu trašnji prečnik cevi frule. Da bi rezultati merenja bili što objektivniji, da bi se eliminisala subjektivna komponenta koja neminovno postoji kada svirač proizvodi tonove na fruli, osmislili smo aparaturu za proizvodnju zvuka na narodnim duvačkim instrumentima. Pomoću te aparature je uduvavan vazduh u frulu pod određenim pritiskom za svaki ton. Na taj način su za svaku merenu frulu odsvirane osnovna i preduvana oktava.

S. V. Krstić, Visoka škola elektrotehnike i računarstva, Vojvode Stepe 283, 11000 Beograd, Srbija (telefon: 381-63-8399810; faks: 381-11-2471099; e-mail: sonja.krstic@vets.edu.yu).

D. G. Drinčić, Visoka škola elektrotehnike i računarstva, Vojvode Stepe 283, 11000 Beograd, Srbija; (e-mail: dragan.drincic@vets.edu.yu).

M. B. Milošević, Visoka škola elektrotehnike i računarstva, Vojvode Stepe 283, 11000 Beograd, Srbija; (e-mail: mirko.milosevic@vets.edu.yu).

Analiza frekvencijskog spektra frula izvršena je sa aspekta proučavanja frekvencije pojedinih harmonika svakog tona, upoređivanjem izmerene frekvencije pojedinih harmonika sa idealnom frekvencijom pojedinih harmonika i upoređivanjem međusobnih nivoa pojedinih harmonika. Radi analize frekvencijskog spektra izvršeno je merenje navedenih parametara zvuka frula koje je izradio graditelj frula i izvođač na fruli Milorad Marić.

II. APARATURA

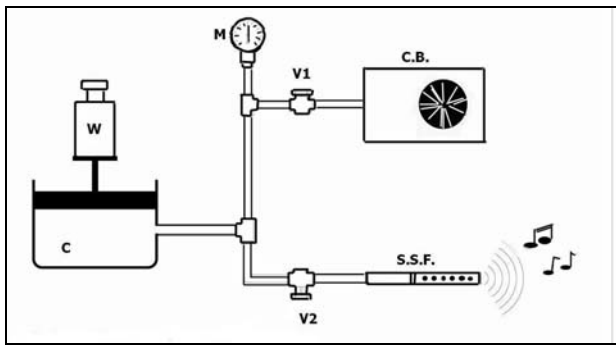
Aparatura je osmišljena prema polaznim pretpostavkama: potrebno je da postoji mogućnost regulacije pritiska za svaki odsvirani ton, pritisak uduvavanog vazduha u cev mora da bude konstantan tokom trajanja jednog tona, aparatura mora da bude bešumna da ne bi ometala snimanje zvuka frule. Osmišljeno je da se napravi komora u koju treba upumpati vazduh i stvoriti određeni nadpritisak. Zatim delovanjem tegova određene težine ispumpavati vazduh iz komore u frulu. Početna ideja da se vazduh upumpava u komoru pomoću aksijalnog ventilatora se pokazala neuspešnom jer je vazduh nakon dostizanja određenog nivoa pritiska u komori izlazio napolje kroz pera ventilatora. Rezultat je bio podjednako neuspešan i u slučaju upotrebljenog ventilatora male snage (25 mW) i velike snage (25 W). Tako smo osmislili da vazдушnu komoru zamenimo kombinovanom hidrauličnom komorom koja se sastoji od : cilindrične plastične cevi zatvorene s jedne strane unutrašnjeg prečnika 110 mm koja je otvorom naniže i smeštena u plastičnu cilindričnu cev otvorenu s jedne strane prečnika 160 mm. Unutrašnja cev je spojena preko tanke mesingane cevi unutrašnjeg prečnika 6 mm sa spoljašnjom sredinom. Pumpom se uduva va vazduh u unutrašnju cev do željenog pritiska. Kada je postignut maksimalni nadpritisak vazduh se iz cevi uduvava u frulu. Regulacija pritiska vazduha koji se uduvava u frulu vrši se izborom tegova različite težine. Regulacija smera protoka vazduha u cev i u frulu vrši se pomoću dva ventila. Pritisak se meri manometrom za niske pritiske (do 500 mB).

Na slici 1 dat je šematski prikaz napravljene aparature.

III. METODOLOGIJA

Pomoću aparature za uduvavanje vazduha odsvirani su tonovi C – dur lestvice od c^2 do c^4 na svakoj od 7 proučavanih frula ujednačenim nivoom. Tonovi su bili ujednačenog trajanja, oko 2 sekunde svaki.

Formirane su 3 grupe frula: prvu grupu čini 5 frula izrađenih od različitih vrsta drveta (bukva, mahagoni,



Slika 1: Šematski prikaz aparature

šljiva, bagrem, orah) sa istim unutrašnjim prečnikom ($\Phi = 14$), drugu grupu čine dve frule izrađene od različitih vrsta drveta (bagrem, trešnja) sa istim unutrašnjim prečnikom ($\Phi = 15$), treću grupu čine dve frule napravljene od iste vrste drveta (bagrem) sa različitim unutrašnjim prečnikom ($\Phi = 14$ i $\Phi = 15$).

Izabrana je muzička sekvenca od 15 tonova C – dur lestvice od c^2 do c^4 odsviranih na svakoj fruli ujednačenim nivoom zvuka i ujednačenim trajanjem od 2 sekunde. Svaki od tonova analiziran je posebno.

Objektivnim merenjem nazvano je merenje kod koga je vazduh uduvan u frulu pomoću aparature. Pritisak uduvanog vazduha u muzički instrument je kontrolisan za svaki ton. Time je izbegnuta proizvoljnost koju u merenje može uneti sam frulaš.

Subjektivnim merenjem nazvano je merenje kod koga frulaš svira tonove na fruli i on sam spontano vrši regulaciju pritiska uduvanog vazduha u muzički instrument.

IV. POSTAVKA MERENJA

Za potrebe merenja aparatura se postavi u vertikalni položaj. Spoljašnja cev se napuni vodom do maksimalnog nivoa za koji neće doći do izlivanja vode izvan cevi.. Zatim se ubaci unutrašnja cev otvorom naniže i stavi se na vrh te cevi teg definisan za to merenje. Pumpom se uduvava vazduh u unutrašnju cev preko tanke mesingane cevi dok se ne postigne odgovarajući nadpritisak . Za to vreme zatvoren je ventil prema fruli. Kada se postigne željeni pritisak, zatvaramo ventil prema pumpi, otvaramo ventil prema fruli. Za svaki ton na fruli biramo određenu težinu tega. Korišćeni su tegovi od 0 kg, 1 kg, 2 kg, 3 kg, 5 kg, 8 kg i 9 kg.

Snimanje je urađeno u tonskom studiju VŠER u Beogradu u kontrolisanim uslovima (vreme reverberacije oko 0,4). Korišćen je kondenzatorski studijski mikrofون Neumann U 87. Postavka mikrofona je urađena kao što je uobičajeno za drvene duvačke instrumente. Snimanje je obavljeno pomoću softverskog paketa Nuendo. Analiza talasnih oblika i frekvencijskog spektra je urađena pomoću softverskog paketa Sound Forge 8.0 i Easera. Zvučni zapisi su za potrebe dalje obrade konvertovani audio karticom M – AUDIO DELTA 1010 i snimljeni u WAV formatu (44,1 KHz, 24 bita) na PC računaru.

V. REZULTATI MERENJA

Analiza rezultata merenja obuhvata analizu petnaest tonova za pet frula iz prve grupe, petnaest tonova za frule iz druge grupe i petnaest tonova za frule iz treće grupe. Za svaki ton je napravljena tabela sa izmerenim podacima i frekvencijski spektar tog tona, ali su zbog ograničenja prostora ovde prikazani samo izabrane tabelle i grafici.

Za frulu 21 (bagrem) za tonove c^2 , d^2 , e^2 i f^2 korišćen je teg od 0 kg. Pri tome je pritisak u aparaturi 7 mB, a u fruli 3 mB. Za tonove g^2 , a^2 , h^2 i c^3 korišćen je teg od 1 kg. Pri tome je pritisak u aparaturi 13 mB, a u fruli 5 mB. Za ton d^3 korišćen je teg od 2 kg. Pri tome je pritisak u aparaturi 20 mB, a u fruli 9 mB. Za tonove e^3 , f^3 , g^3 i a^3 korišćen je teg od 5 kg. Pri tome je pritisak u aparaturi 41 mB, a u fruli 18 mB. Za tonove h^3 i c^4 korišćen je teg od 8 kg. Pri tome je pritisak u aparaturi 63 mB, a u fruli 24 mB.

U tabeli 1 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona c^2 , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona c^2 , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona c^2 i izmereni nivo pojedinih harmonika tona c^2 frule napravljene od bagremovog drveta., unutrašnjeg prečnika $\Phi = 14$ mm, dobijene subjektivnim merenjem. Dve kolone su obojene jer su u njima brojne vrednosti upotrebljene za pravljenje grafika zavisnosti nivoa slabljenja harmonika od frekvencije (sl. 2).

TABELA 1: OSNOVNI REZULTATI SUB. MERENJA ZA FRULU NAPRAVLJENU OD BAGREMA UNUTRAŠNJEG PREČNIKA $\Phi = 14$

21	bagrem	$\Phi = 14$ mm	Neumann U 87	subjektivno merenje	$c^2 = 523.25$ Hz
harmonik	idealni odnos frekvencija f/f_0	izmerena frekvencija f_1 [Hz]	izmereni odnos frekvencija f/f_0	odstupanje Δf [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	539	1.030	15.76	- 50.4
2	2:1	1071	2.048	24.5	- 66.1
3	3:1	1618	3.092	48.25	- 59
4	4:1	2134	4.078	41	- 85.7
5	5:1	2680	5.121	63.75	- 76.6
6	6:1	3223	6.159	83.5	- 83.3
7	7:1	3820	7.300	157.25	- 95.7
8	8:1	4271	8.162	85	- 99.5
9	9:1	4893	9.351	183.75	- 92.3
10	10:1	5340	10.205	107.5	- 85.2

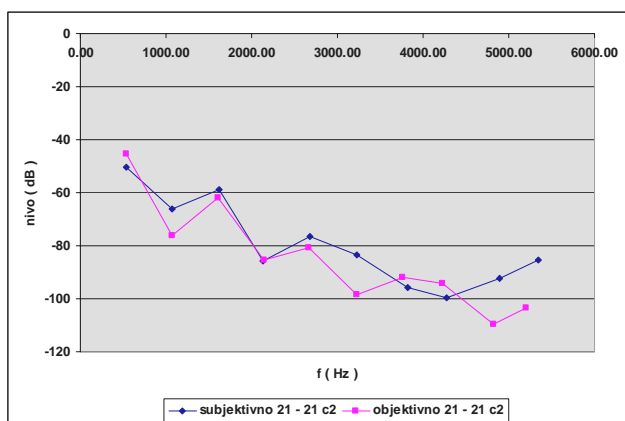
U tabeli 2 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona c^2 , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona c^2 , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona c^2 i izmereni nivo pojedinih harmonika tona c^2 frule napravljene od bagremovog drveta., unutrašnjeg prečnika $\Phi = 14$ mm, dobijene objektivnim merenjem. Dve kolone su obojene jer su u njima brojne vrednosti upotrebljene za pravljenje grafika zavisnosti nivoa slabljenja harmonika od frekvencije (sl. 2).

Na slici 2 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova u zavisnosti od izmerene frekvencije za frulu 21 (bagrem $\Phi = 14$ mm) iz prve grupe, na osnovu rezultata dobijenih prilikom subjektivnog i objektivnog merenja. Može se zaključiti da su mnoge spektralne karakteristike ove frule iste bez obzira na način uduvanja vazduha u cev (treći harmonik je i kod

TABELA 2: OSNOVNI REZULTATI SUB. MERENJA ZA FRULU NAPRAVLJENU OD BAGREMA UNUTRAŠNJEG PREČNIKA $\Phi = 14$

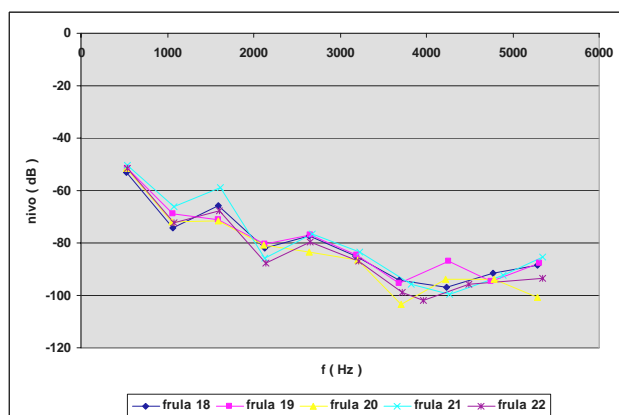
21	bagrem	$\Phi = 14$ mm	Neumann U 87	objektivno merenje	$c^2 = 523.25$ Hz
harmonik	idealno odn. frekvencija f/f_0	izmerena frekvencija f_1 [Hz]	izmereni odn. frekvencija f/f_0	odstupanje Δf [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	537	1.026	13.75	- 45.2
2	2:1	1070	2.044	23.5	- 76.2
3	3:1	1613	3.082	43.25	- 62.1
4	4:1	2142	4.093	49	- 85.4
5	5:1	2671	5.104	54.75	- 80.7
6	6:1	3227	6.167	87.5	- 98.3
7	7:1	3760	7.185	97.25	- 92.1
8	8:1	4227	8.078	41	- 94.3
9	9:1	4817	9.205	107.75	- 109.5
10	10:1	5200	9.937	32.5	- 103.5

subjektivnog i kod objektivnog merenja često jači od drugog). Kod subjektivnog merenja su nivoi pojedinih harmonika ujednačeniji. Kod subjektivnog merenja je ujednačeniji pritisak udvavanja vazduha u cev pa je i nivo zvuka pojedinih tonova ujednačeniji nego kod objektivnog merenja.



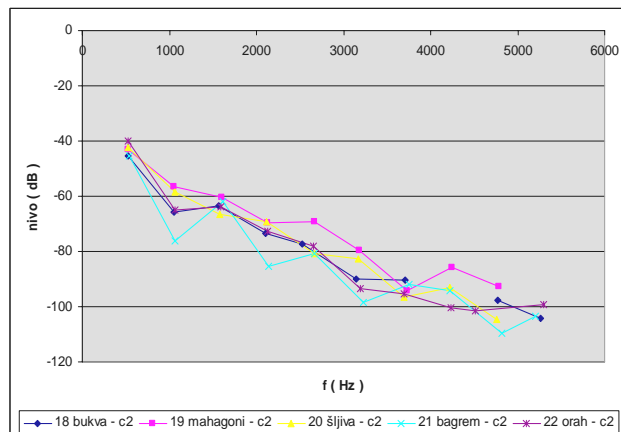
Slika 2: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za frulu 21 (bagrem $\Phi = 14$) pri subjektivnom i objektivnom merenju

Na slici 3 prikazano je slabljenje nivoa pojedinih harmonika odsviranih tonova u zavisnosti od izmerene frekvencije za frule prve grupe, na osnovu rezultata dobijenih subjektivnim merenjem.



Slika 3: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za frule prve grupe pri subjektivnom merenju

Na slici 4 prikazano je slabljenje nivoa pojedinih harmonika odsviranih tonova u zavisnosti od izmerene frekvencije za frule prve grupe, na osnovu rezultata dobijenih objektivnim merenjem.



Slika 3: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za frule prve grupe pri objektivnom merenju

Sa sl. 3 i sl. 4 se vidi da zavisnost nivoa slabljenja harmonika od frekvencije za frule prve grupe ima mnogo više linearan oblik prilikom objektivnog nego prilikom subjektivnog merenja.

VI. SPEKTRALNI SADRŽAJ

Opseg osnovnih frekvencija tonova zadate sekvence prostire se od 523.25 Hz do 2093 Hz za idealno naštimovan instrument (prema frekvenciji zvučne viljuške). Kod svih testiranih frula postoje određena odstupanja u štumu.

U tabeli 3 prikazan je frekvencijski opseg za 1. grupu frula. Postoji odstupanje od idealnog štima (5 – 16 Hz za tonove druge oktave i 8 – 91 Hz za tonove treće oktave).

Proračun frekvencije viših harmonika urađen je za svih 15 tonova celog opsega ($c^2 - c^4$) za svih 5 frula 1. grupe, obe frule 2. grupe i obe frule 3. grupe i upoređen je sa izmerenim vrednostima.

U tabeli 4 prikazan je frekvencijski opseg za 2. grupu frula. Takođe postoji odstupanje od idealnog štima.

TABELA 3: FREKVENCIJSKI OPSEG 1. GRUPE FRULA

frekvencijski opseg		
1. grupa frula $\Phi = 14$ mm		
bukva	528 – 2123	Hz
mahagoni	533 – 2143	Hz
šljiva	531 – 2135	Hz
bagrem	539 – 2184	Hz
orah	534 – 2162	Hz

TABELA 4: FREKVENCIJSKI OPSEG 2. GRUPE FRULA

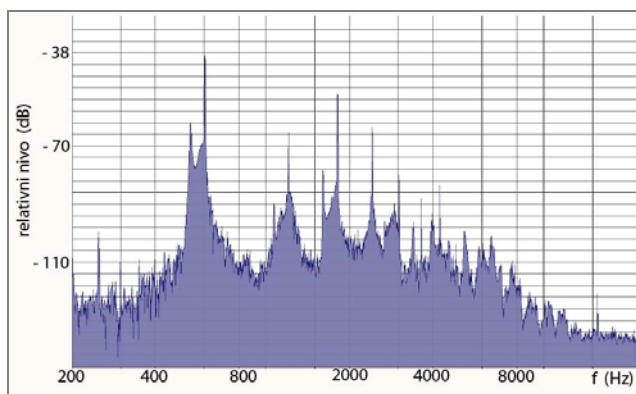
frekvencijski opseg		
2. grupa frula $\Phi = 15$ mm		
bagrem	526 – 2037	Hz
trešnja	537 – 2109	Hz

U tabeli 5 prikazan je frekvencijski opseg 3. grupe frula. I ovde postoji odstupanje od idealnog štima.

TABELA 5: FREKVENCIJSKI OPSEG 3. GRUPE FRULA

frekvencijski opseg		
3. grupa frula	bagrem	
$\Phi = 14 \text{ mm}$	539 – 2184	Hz
$\Phi = 15 \text{ mm}$	526 – 2037	Hz

Na slici 5 prikazan je frekvencijski spektar tona c^2 odsviranog na fruli 21 (bagrem, $\Phi = 14 \text{ mm}$).



Slika 5: Frekvencijski spektar tona c^2 odsviranog na fruli 21 (bagrem, $\Phi = 14$)

VII. ZAKLJUČAK

Analizom rezultata merenja može se izvesti zaključak da: frule imaju manji broj harmonika prilikom objektivnog merenja, da svaki ton ima mnogo nestabilniju frekvenciju osnovnog harmonika kod objektivnog merenja nego kod subjektivnog, da nije toliko čest slučaj neravnomerna raspodela harmonika po intenzitetu kod objektivnog merenja kao kod subjektivnog, da na samom početku tonovi imaju odgovarajuću frekvenciju, a kako vreme trajanja tona odmiče, frekvencija tona raste (treba izvršiti bolju regulaciju pritiska). Nivo slabljenja harmonika je približniji idealnom za niske učestanosti kod objektivnog, a za visoke učestanosti kod subjektivnog merenja. Kod sve tri analizirane grupe frula uočeno je da je treći harmonik dominantan u odnosu na drugi u celom tonskom opsegu. Uočeno je takođe da intenzitet osnovnog harmonika raste sa porastom frekvencije tonova u tonskom opsegu. Frule sa unutrašnjim prečnikom cevi $\Phi = 15 \text{ mm}$ imaju bolje karakteristike: odstupanje frekvencije harmonika od idealne manje je nego kod frula sa unutrašnjim prečnikom $\Phi = 14 \text{ mm}$.

VIII. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju svima koji su na bilo koji način pomogli tokom realizaciji rada, pre svih g. Miloradu Mariću, bez čije dugogodišnje posvećenosti muzičkom instrumentu fruli i velikog strpljenja u usavršavanju i unapređivanju ovog instrumenta, većinu urađenih merenja ne bi bilo moguće sprovesti u delo.

LITERATURA

- [1] Meyer J. : Acoustics and the Performance of Music – Frankfurt, 1978.
- [2] Rossing T. : *The Science of Sound* – Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1989.
- [3] Dickens P., France R., Smith J. and Wolfe J. : *Clarinet Acoustics: Introducing a Compendium of Impedance and Sound Spectra* – Acoustics Australia, Vol.35 April 2007 No.1 – 17
- [4] Miklos A., Angster J., Rossing T. : Interaction of reed and resonator by sound generation in a reed organ pipe – J. Acoust. Soc. Am.119(5), May 2006.
- [5] Coltman J. W. : *Effect of Material on Flute Tone Quality* - J. Acoust. Soc. Am. 49 (2), pp 520-523, 1971.
- [6] Angster J., Paal G., Garen W., Miklos A. : *The effect of Wall Vibrations on the Timbre of organ Pipes* – Proceedings of the 16th. Int. Congress on Acoustics and 135th JASA Meeting, Seattle, Vol. 3, pp 753- 754, 1998.
- [7] Andreas Miklos, Judit Angster, Stephan Pitch, Thomas Rossing: *Interaction of reed and resonator by sound generation in a reed organ pipe* – J. Acoust. Soc. Am. 119 (5), May 2006.
- [8] Botros A., Smith J., Wolfe J.: *The virtual Boehm flute – a web service that predicts multiphonics, microtones and alternative fingerings* – Acoustics Australia 30, 61-65 (2002)
- [9] Coltman J. : *Jet offset, harmonic content and warble in the flute* – J. Acoust. Soc. Am. 120 (4), October 2006.
- [10] Coltman J.W. : *Mode stretching and harmonic generation in the flute* - J. Acoust. Soc. Am. 88, 2070-2073 (1990)
- [11] Coltman J.W. : *Sounding mechanism of the flute and organ pipe* J. Acoust. Soc. Am. 44, 983-992 (1968)
- [12] Fletcher N.H., Lorna Douglas: *Harmonic generation in organ pipes, recorders and flutes* - J. Acoust. Soc. Am. 68 (3), September 1980.
- [13] Whitehouse J.W., D. B. Sharp, T. J. W. Hill : *Wall vibrations in musical wind instruments* – Acoustics Bulletin July/ Aug 2003.
- [14] Wolfe J., Smith J., Tann J., Fletcher N.H. : *Acoustic Impedances of Classical and Modern Flutes* – Journal of Sound and Vibration, October 2000.
- [15] Coltman J. W. : *Time domain simulation of the flute* – J. Acoust. Soc. Am. 92, 69-73 (1992)
- [16] Coltman J. W. : *Jet behavior in the flute* – J. Acoust. Soc. Am. 92, 74-83 (1992)
- [17] Coltman J. W. : *Jet drive mechanism in edge tones and organ pipe* – J. Acoust. Soc. Am. 60, 725-733 (1976)

ABSTRACT

The study presents comparative frequency spectrum analysis between subjective and objective measurements of one piece Serbian C major flute. The research has been done to achieve the simple goal of finding the type of wood of which we can make the Serbian flute that has sound spectrum similar to ideal. The same is with the inner radius of the pipe. Flutes are divided into three groups: flutes made of different types of wood but have the same inner radius of the pipe, flutes made of the same type of wood but have different inner radius of the pipe. The whole range of two octaves has been played by the device. Duration of each tone is about two seconds and each tone has been analyzed separately. The analysis showed that sound spectrum of Serbian flute really depends on the type of wood of which it is made and depends also on dimension of the inner radius of the pipe. The analysis also showed different results for the subjective and objective measurements. We can conclude out of the results that there are some characteristic facts that are connecting different flutes and some that are separating them.

COMPARATIVE FREQUENCY SPECTRUM ANALYSIS OF ONE-PIECE SERBIAN C-FLUTE

Krstić Sonja, Drinčić Dragan, Milošević Mirko