

Uticaj Q-faktora sopstvenih frekvencija na izbor optimalnog odnosa dimenzija prostorije

Dragan M. Ristić, Milan Pavlović

Sadržaj — Efekat koloracije kao direktna posledica sopstvenih frekvencija prostorije posebno je izražen na nižim frekvencijama i u malim prostorijama. Predmet ovog rada je uklanjanje neželjenih efekata koje proizvode sopstvene rezonance promenom oblika rezonantne krive sopstvenih frekvencija. Sprovedeno istraživanje je pokazalo da se promenom vremena reverberacije prostorije može postići odziv bez koloracije i na niskim frekvencijama gde je gustina sopstvenih rezonanci prostorije veoma mala.

Cljučne reči — Akustika prostorija, Q-faktor, sopstvene frekvencije, vreme reverberacije.

I. UVOD

Uticaj sopstvenih frekvencija na percepciju zvuka u prostorijama tema je brojnih naučnih radova decenijama unazad. Problem sopstvenih frekvencija od posebnog je značaja kod većine prostorija za slušanje, u kontrolnim sobama kao i malim studijama. Distribucija sopstvenih frekvencija utiče na percepciju zvuka u svim prostorijama čije su dimenzije uporedive sa talasnim dužinama zvuka na frekvencijama iz čujnog opseg [1]. Većina ovih prostorija je zapremine manje od 100 m^3 i paralelopipednog je oblika. Paralelopiped kao najjednostavniji geometrijski oblik prostorije predstavlja i najčešće korišćeni model na kome se razmatra uticaj sopstvenih frekvencija na zvuk u prostoriji.

Paralelopipedna prostorija podvrgnuta nekom akustičkom stimulusu može se posmatrati kao veliki broj pobuđenih rezonatora, što se manifestuje pojavom stojećih talasa pri zvučnoj pobudi [2]. Do pojave stojećih talasa dolazi kada na određenim frekvencijama jedna od dimenzija prostorije postane celobrojni umnožak polovine talasne dužine zvuka. Ova pojava se ne javlja samo za celobrojne umnoške osnovnih dimenzija prostorije (dužina, širina i visina) koji podrazumeva odbijanje od dve naspramne, paralelne strane prostorije, već i refleksione putanje koje nastaju kao posledica odbijanja od četiri ili svih šest stranica paralelopipedne prostorije. Rezonance, odnosno sopstvene frekvencije koje nastaju na ovaj način označavaju su kao aksijalne, površinske i prostorne.

Sopstvene frekvencije predstavljaju inherentnu karakteristiku prostorije jer su direktna posledica oblika i

dimenzije prostorije [1]. Sopstvene frekvencije unose dodatnu nelinearnost u frekvencijski odziv prostorije prouzrokovanu pojačanim fluktuacijama nivoa zvučnog pritiska u prostoriji. U malim prostorijama ovo dovodi do neželjenih efekata koji mogu biti štetni po percepciju zvuka. Ovi štetni efekti se manifestuju kao promena boje zvuka, a poznati su još kao efekat koloracije.

Sopstvene rezonance su na frekvencijskoj osi raspoređene tako da se njihov broj povećava sa povećanjem frekvencije [1]. Efekat koloracije je najizraženiji na niskim frekvencijama, zbog male gustine sopstvenih frekvencija odnosno velikog rastojanja na frekvencijskoj osi između pojedinačnih sopstvenih rezonanci. Iz ovog razloga se u većini predloženih metoda za rešavanje problema koloracije insistira na pronalaženju optimalnog rasporeda sopstvenih frekvencija kako bi se izbegli ili barem ublažili efekti koloracije.

Raspored sopstvenih frekvencija je direktna posledica odnosa dimenzija prostorije, pa je i većina autora u cilju rešavanja problema koloracije predlagala optimalne proporcije prostorija kako bi umanjila uticaj sopstvenih frekvencija na frekvencijski odziv prostorije [3]-[8]. U izboru optimalnih odnosa dimenzija prostorije korišćeni su brojni kriterijumi za raspoređivanje sopstvenih frekvencija. Cox i D'Antonio [4] kao kriterijum za raspored sopstvenih frekvencija koriste proporcije prostorije koje daju maksimalno ravan frekvencijski odziv. U ranim studijama [5] težnja je bila da se sopstvene frekvencije ravnomerno rasporede. Ravnomeran raspored sopstvenih rezonanci na frekvencijskoj osi je napušten u kasnijim radovima. U njima se ističe dominantni uticaj aksijalnih rezonanci [6], kao i to da optimalni odnosi dimenzija prostorija ne moraju nužno da važe za sve zapremine prostorija [8]. Izbor optimalnih odnosa dimenzija prostorije kao način za rešavanje problema koloracije ima jedan bitan nedostatak a to je da je izbor dimenzija prostorije uslovljen arhitektonskim ograničenjima, kao i to da njegova primena na postojeće prostorije iziskuje puno truda, a ponekad je i nemoguća.

Predmet ovog rada je smanjenje uticaja sopstvenih rezonanci na frekvencijski odziv prostorije promenom oblika rezonantne krive sopstvenih frekvencija. Istraživanje koje je sprovedeno na modelu paralelopipedne prostorije imalo je za cilj ispitivanje uticaja promene vremena reverberacije prostorije na Q-faktor sopstvenih rezonanci, kako bi se smanjio uticaj pojedinačnih sopstvenih rezonanci na frekvencijski odziv prostorije bez promena njenih proporcija.

D. M. Ristić, student doktorskih studija na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija (telefon: 381-64-6501954; e-mail: ristic.dragan@gmail.com).

M. Pavlović, Visoka ICT škola, Zdravka Čelara 16, 11000 Beograd, Srbija; (e-mail: m.pavlovic78@gmail.com).

II. SOPSTVENE FREKVENCije PROSTORIJE

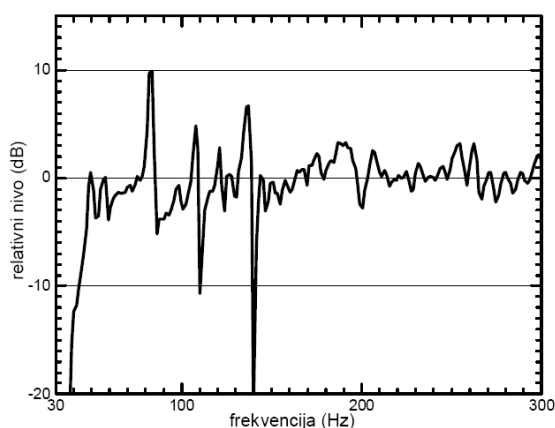
Nastanak sopstvenih frekvencija u prostoriji objašnjava se uz pomoć talasne teorije. Talasna jednačina za trodimenzionalni prostor data je izrazom:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (1)$$

Za slučaj paralelopipedne prostorije u kojoj su svi zidovi od idealno tvrdog materijala i idealno ravni, talasna jednačina ima relativno jednostavno analitičko rešenje. Rešenja ove jednačine su različita od nule samo za diskretan skup vrednosti konstante k , odnosno za diskretan skup vrednosti frekvencije ω (pošto je $k = \omega/c$). Ove frekvencije nazivaju se sopstvene frekvencije prostorije, a često su označene i kao sopstvene rezonance, sopstvene vrednosti ili sopstveni modovi. Za paralelopipednu prostoriju dimenzija L_x , L_y i L_z sopstvene frekvencije određene su izrazom:

$$f_N = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (2)$$

ovde su sa N označene kombinacije trojke brojeva n_x , n_y , n_z . Svaka kombinacija celobrojnih konstanti u ovoj trojci brojeva određuje jednu rezonantnu frekvenciju paralelopipedne prostorije. Izraz (2) pokazuje da u svakoj prostoriji postoji beskonačan niz rezonantnih frekvencija koji počinje od jedne, najniže vrednosti. Ta najniža vrednost je u paralelopipednoj formi prostorije određena njenom najdužom stranicom. Sa porastom frekvencije povećava se i broj sopstvenih frekvencija. Ukupan broj sopstvenih rezonanci u opsegu od 0 Hz do neke zadate vrednosti frekvencije f raste sa trećim stepenom frekvencije, ali i sa povećanjem zapremine [1].



Slika 1. Jedan primer uticaja sopstvenih rezonanci na frekvencijski odziv prostorije

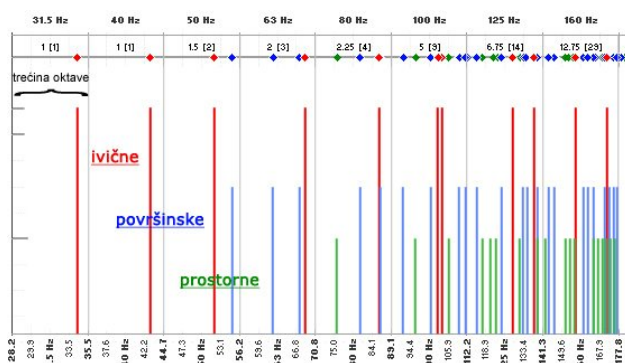
U oblasti malih gustina sopstvenih frekvencija, tj. od najniže rezonantne frekvencije pa do granice gde gustina sopstvenih rezonanci postaje dovoljno velika, u odzivu prostorije mogu se konstatovati efekti koji nastaju pobudom jedne sopstvene frekvencije. Ta zona se naziva kritični opseg. To je opseg u kome su sopstvene rezonance prostorije relativno retke, odnosno relativno razmaknute na frekvencijskoj osi. U ovom opsegu javljaju se nelinearnosti u frekvencijskom odzivu prostorije (jedan primer uticaja

sopstvenih rezonanci prikazana je na Sl. 1) koje su posledica uticaja izolovanih sopstvenih frekvencija. Problemi izazvani ovakvim rasporedom modova su povećani ako proporcije prostorije teže da grupišu modove, odnosno ako su dimenzije prostorija u prostom celobrojnom odnosu.

Kritični opseg je sa donje strane određen najnižom sopstvenom frekvencijom prostorije, i prostire se u širini između jedne i dve oktave, dok je sa gornje strane određen Šrederovom frekvencijom [1], koja je data izrazom (T je vreme reverberacije, a V je zapremina prostorije):

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (3)$$

Razmatranja koja su vršena u radu bavila su se sopstvenim frekvencijama koje se nalaze u kritičnom opsegu. Na Sl. 2 prikazan je raspored sopstvenih frekvencija u prostoriji dimenzije 5 x 4 x 3.3 metara. Na prikazanom rasporedu sopstvenih frekvencija (crvenom bojom su označene ivične, plavom površinske, a zelenom prostorne rezonance) kritični opseg frekvencija za datu prostoriju podeljen je na podopsege veličine trećine oktave. Sopstvene frekvencije su raspoređene tako da se u svakoj trećini oktave nalazi bar po jedan aksijalni mod, s tim da se broj modova ne smanjuje kako se ide prema većim podopsezima.



Slika 2. Raspored sopstvenih frekvencija u kritičnom opsegu za prostoriju dimenzija 5 x 4 x 3.3 m

Prilikom izbora optimalnog rasporeda sopstvenih frekvencija u kritičnom opsegu teži se da se dobije odziv prostorije sa što manje nelinearnosti. Da bi se ovo postiglo frekvencijski odziv treba da bude što ujednačeniji u celom kritičnom opsegu, odnosno kao što neki autori, [4] tvrde maksimalno ravan. Ovo u stvari znači otklanjanje uticaja prostorije na doživljaj zvuka, odnosno stvaranje akustički „neutralne“ prostorije. Zvuk koji se reprodukuje u ovakvoj prostoriji bio bi maksimalno „očišćen“ od uticaja prostorije. Na ovom mestu dolazimo do problema akustičkog identiteta prostorije. Ovaj aspekt je nešto što je jako bitno kod velikih prostorija koje se koriste kao koncertni prostori, i on u velikoj meri utiče na doživljaj sadržaja koji se izvodi. Međutim, kod velikih prostorija problem sopstvenih frekvencija nije izražen i igra zanemarljivu ulogu. Kod malih prostorija (malih u akustičkom smislu) gde je problem sopstvenih frekvencija uočljiv pitanje akustičkog identiteta dobija druge dimenzije u zavisnosti od namene prostorije. Za razliku od

soba za slušanje u kojima možemo da govorimo o posebnoj doživljaju prilikom slušanja, kontrolne sobe i audio režije predstavljaju prostorije u kojima je primarno da se zvuk reprodukuje na način na koji je izveden, odnosno bez uticaja prostorije. Mada deluje pomalo paradoksalno, ali prilikom akustičke obrade ovih prostorija kao cilj se postavlja reprodukcija zvuka koja je malo verovatna u realnim (kućnim) uslovima (bez uticaja sopstvenih frekvencija, sa što manjim prvim refleksijama).

Promena frekvencijskog odziva prostorije izborom optimalnih proporcija ograničena je malom gustinom sopstvenih rezonanci na niskim frekvencijama. Dodatno „poboljšanje“ frekvencijskog odziva prostorije vrši se promenom oblika rezonantne krive sopstvenih frekvencija.

III. UTICAJ Q-FAKTORA SOPSTVENIH REZONANCI NA FREKVENCIJSKI ODZIV PROSTORIJE

U istraživanju koje je izvršeno za potrebe ovog rada posmatran je uticaj promene vremena reverberacije na frekvencijski odziv prostorije kao i uticaj promene proporcija prostorije na frekvencijski odziv prostorija koje karakteriše malo vreme reverberacije. Analize uticaja Q-faktora sopstvenih rezonanci na frekvencijski odziv prostorije izvršena je na modelu paralelopipedne prostorije zapremine 70 m³. Smatra se da su zidovi prostorije idealno kruti i ravni. Uticaj prostornog rasporeda zvučnog izvora i prijemnika, odnosno njihovog položaja u odnosu na prostornu raspodelu stojećih talasa dokumentovan u [3], zanemaren je u ovom istraživanju. U razmatranju uticaja Q-faktora sopstvenih frekvencija na frekvencijski odziv prostorije posmatrano je prvih pet aksijalnih modova, pošto je njihov uticaj dominantan.

Vreme reverberacije predstavlja karakteristiku prostorije nezavisnu od njenih proporcija. Promena vremena reverberacije prostorije posledica je akustičke obrade prostorije, odnosno promene količine energije koja se apsorbuje od zidova. Ova promena utiče i na stojeće talase koji se formiraju u prostoriji. Naime, kada se prostorija pobudi na nekoj svojoj rezonantnoj frekvenciji, pritisak u prostoriji ima fiksnu prostornu raspodelu stojećeg talasa [1]. Zvučni pritisak p_ω , u prostoriji u stabilnom stanju kada je ona pobuđena sinusoidalnim signalom učestalosti ω je kombinacija više rezonantnih sistema sa rezonantnim frekvencijama ω_n i konstantnom prigušenja δ_n koja karakteriše apsorpciju prostorije:

$$p_\omega = \sum_n \frac{A_n}{\omega^2 - \omega_n^2 - 2i\delta_n\omega_n} \quad (4)$$

gde smo pretpostavili da je $\delta_n \ll \omega_n$, a koeficijenti A_n su funkcije pozicije izvora, pozicije prijemnika i frekvencije $\tilde{\omega}$. Apsolutna vrednost intenziteta zvučnog pritiska n -te komponente onda postaje:

$$P_n = \frac{A_n}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + 4\omega_n^2\delta_n^2}} \quad (5)$$

Na osnovu ove jednačine možemo da nađemo frekvencije na kojima amplituda zvučnog pritiska opadne

X puta. To su frekvencije $\omega_{1,2} = \omega_n \pm \sqrt{X^2 - 1}\delta_n$. Odavde dobijamo propusni opseg (Sl. 3) za različite vrednosti sopstvenih frekvencija:

$$(\Delta f)_n = \frac{1}{2\pi}(\Delta\omega)_n = \frac{\delta_n}{\pi} \quad (6)$$

Vreme reverberacije, odnosno Q-faktor dati su formulama:

$$T_{60} = \frac{6.91}{\delta_n} \quad (7)$$

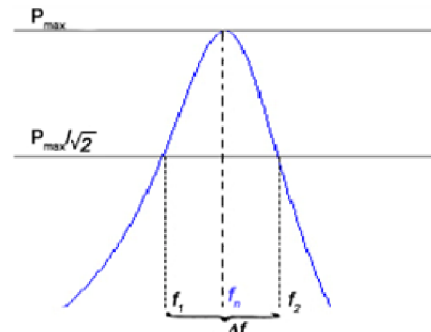
$$\frac{\Delta f}{f_n} = \frac{1}{Q} = \frac{\delta_n}{\pi f_n} \quad (8)$$

što u kombinaciji sa prethodnom formulom daje:

$$\Delta f = \frac{6.91}{\pi T_{60}} \Rightarrow Q = \frac{f_n}{\Delta f} = \frac{\pi f_n T_{60}}{6.91} \quad (9)$$

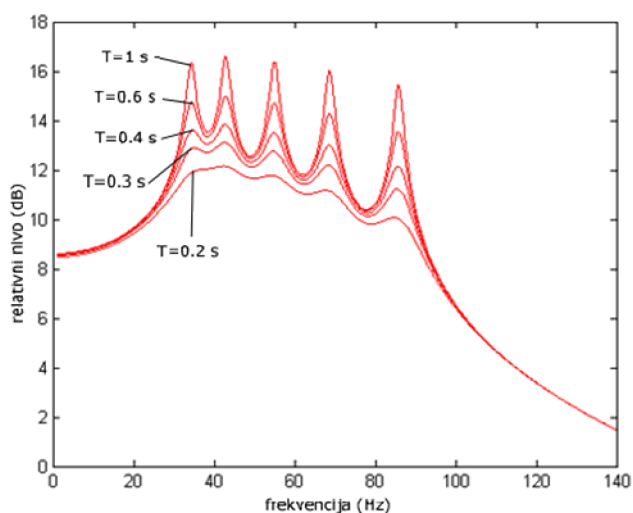
Ovaj izraz pokazuje da je propusni opseg rezonantnih frekvencija konstantan i nezavistan od frekvencija ako je vreme reverberacije takođe konstantno. Ovaj izraz pokazuje i da je Q-faktor sopstvenih rezonancija prostorije direktno srazmeran vremenu reverberacije.

Za male prostorije koje se uobičajeno koriste kao studiji, vreme reverberacije se može smatrati nezavisnim od frekvencije (u kritičnom opsegu) [2], što implicira da će i propusni opseg biti konstantan. Za male prostorije ovaj opseg je veličine od 3 do 10 Hz (kada je vreme reverberacije između 0.2 i 1 s).

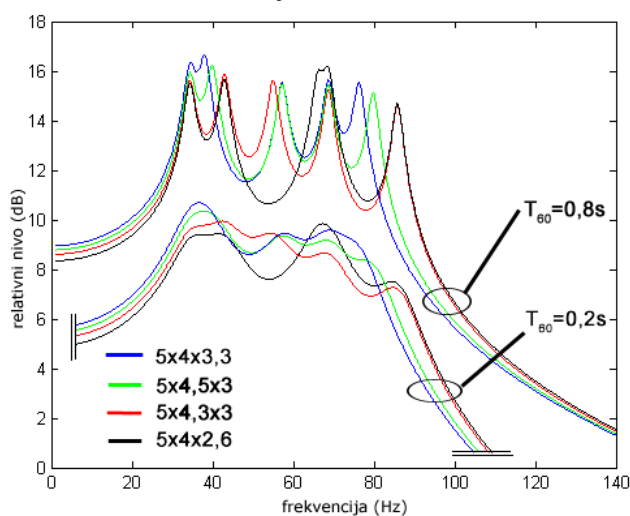


Slika 3. Propusni opseg jedne sopstvene rezonance

Iz prethodnih formula možemo da zaključimo da se sa porastom vremena reverberacije povećava i Q-faktor sopstvenih frekvencija kao posledica smanjenja energije koja se disipira, odnosno činjenice da manje energije biva apsorbovano od zidova prostorije. Uz pomoć Q-faktora može da se kvantifikuje oblik rezonantnih kriva sopstvenih frekvencija. Povećanje Q-faktora za posledicu ima smanjenje propusnog opsega sopstvenih rezonanci i jače izražen uticaj sopstvenih rezonanci na frekvencijski odziv prostorije. To praktično znači da će prostorija koju karakteriše malo vreme reverberacije imati sopstvene frekvencije sa manjim Q-faktorom, što je jako bitno na nižim frekvencijama kada samo nekoliko sopstvenih modova u oktavi mogu da daju odziv bez koloracije. Na Sl. 4 prikazana je promena frekvencijskog odziva prostorije dimenzija 5 x 4 x 3.3 m kada se menja vreme reverberacije prostorije.



Slika 4. Promena frekventijskog odziva prostorije dimenzija 5 x 4 x 3.3 m



Slika 5. Izgled frekventijskog odziva za različite dimenzije prostorija sa vremenom reverberacije od 0,2s i 0,8s

Sa Sl.4 se vidi da uticaj sopstvenih frekvencija opada sa smanjenjem vremena reverberacije, tako da se u frekventijskom odzivu prostorije ne može uočiti uticaj pojedinačnih sopstvenih rezonanci kada se Q-faktor, odnosno vreme reverberacije dovoljno smanji. Na Sl. 5 je prikazano kako se menja frekventijski odziv prostorije kada se menjaju njene dimenzije u dva slučaja, kada je vreme reverberacije 0,2 i 0,8s. U slučaju kada vreme reverberacije prostorije iznosi 0,2s, zbog manjeg Q-faktora sopstvenih rezonanci oscilacije relativnog nivoa (razlika između maksimuma i minimuma) u frekventijskom odzivu prostorije su male i kreću se oko 2 dB bez obzira na odabrane proporcije prostorija, dok u slučaju kada je vreme reverberacije 0,8s ove oscilacije dostižu 6 dB. Dobijeni rezultati pokazuju da je frekventijski odziv prostorije manje osjetljiv na promene dimenzija prostorije kada je Q-faktor sopstvenih frekvencija manji.

IV. ZAKLJUČAK

Izolovane sopstvene frekvencije prostorije stvaraju nelinearnosti u frekventijskom odzivu koje se manifestuju kao promena boje reprodukovano zvuka. Ovaj efekat je

posebno izražen na nižim frekvencijama u malim prostorijama. Kako bi se otklonili ili umanjili neželjeni efekti koje proizvode sopstvene rezonance prostorije primenjuju se dva rešenja: izborom dimenzija prostorije utiče se na raspored sopstvenih frekvencija, dok se akustičkom obradom prostorije umanjuje njihov uticaj.

Analiza izvršena u ovom radu pokazuje da se neželjeni efekti sopstvenih frekvencija mogu umanjiti promenom vremena reverberacije prostorije. Promenom vremena reverberacije prostorije utiče se na Q-faktor sopstvenih rezonanci, odnosno na relativni nivo i oblik rezonantne krive koju stvaraju sopstvene frekvencije. Sopstvene frekvencije sa manjim Q-faktorom, odnosno većim propusnim opsegom imaju manje štetnih uticaja na frekventijski odziv. Smanjenjem vremena reverberacije prostorije na nižim frekvencijama povećava se stepen prigušenja sopstvenih frekvencija i samim tim smanjuje njihovo štetno dejstvo što za posledicu ima linearniji frekventijski odziv prostorije. Dobijeni rezultati pokazuju da kada se vreme reverberacije prostorije dovoljno smanji uticaj sopstvenih rezonanci postaje zanemarljiv. Rezultati, takođe, pokazuju da odnos dimenzija prostorije ima manji uticaj na frekventijski odziv prostorije kada se smanji Q-faktor sopstvenih frekvencija.

LITERATURA

- [1] H. Kuttruff, "Room Acoustics", Spon Press, 2000
- [2] O. J. Bonello, „A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes“, *J. Audio Eng. Soc.*, vol 29, pp. 597-605 (1981)
- [3] A. R. Groh, "High Fidelity Sound System Equalization by Analysis of Standing Waves", *Journal of Acoustic Society of America*, Volume 22, Issue 10, pp. 795-799; December 1974
- [4] T. J. Cox, P. D'Antonio, „Determining Optimum Room Dimensions for Critical Listening Environments: A New Methodology“, Proc 110th Convention AES. paper 5353, New York, 1994, pp.8-16.
- [5] R. H. Bolt, „Note on the Normal Frequency Statistics in Rectangular Room“, *Journal of Acoustic Society of America*, 18(1), pp. 130-133, (1946).
- [6] C. L. S. Guilford, „Acoustic Design of Talk Studios and Listening Rooms“, *J. Audio Eng. Soc.*, vol 27, pp. 17-31 (1979 Jan-Feb)
- [7] M. M. Loudon, „Dimension Ratios of Rectangular Rooms With Good Distribution of Eigentones“, *Acoustica*, vol 24, pp. 101-104 (1971)
- [8] R. Walker, „Optimum Dimension Ratios For Small Rooms“, Presented at the 100th Convention 1996 May 11-14 Copenhagen

ABSTRACT

Coloration effect as direct consequence of room modes is especially noticeable on lower frequencies and in small rooms. This paper presents method for removal of unwanted effects of room modes by changing the Q-factor of room modes. Research made by the authors has shown that by changing the reverberation time of room it is possible to get response free of coloration on the lower frequencies where density of room modes is very small.

INFLUENCE OF ROOM MODES Q-FACTOR ON SELECTION OF OPTIMUM DIMENSION RATIOS FOR SMALL ROOMS

Dragan M. Ristic, Milan Pavlovic