

# Optimizacija karakteristika modela reverberacione prostorije

Dragan Drinčić, Mirjana Adnađević

**Sadržaj** — U radu je prikazan postupak izrade modela reverberacione prostorije koji zadovoljava propisani standard i ima optimizirane karakteristike u odnosu na uobičajene modele izrađene od stakla. Model je namenjen za merenje koeficijenta rasipanja materijala koji se koriste u akustičkoj obradi prostorija. Cilj je bio da se napravi model reverberacione prostorije manje ukupne mase, manje osetljivosti na slučajne potrese i udare, sa mogućnošću bezbednijeg i lakšeg premeštanja i transporta i sa rastavljivim zidovima i manjim ukupnim troškovima izrade. Kao konstrukcioni materijal odabrana je dvostrano furnirana iverica u pločama debljine 18 mm. Pokazalo se da je moguće realizovati model sa željenim prednostima ali je njegova apsorpcija ipak veća nego kod uobičajenih rešenja izrađenih od stakla. Pretpostavljeni su i mogući načini poboljšanja ove karaktersitike koje ipak treba dodatno proveriti.

**Gljučne reči** — Akustika prostorija, merenje koeficijenta rasipanja, model reverberacione komore.

## I. UVOD

KOEFICIJENT rasipanja  $s$  neravnih površina u akustici se meri na dva načina [1]: u slobodnom zvučnom polju i u reverberacionoj prostoriji. Reverberaciona prostorija može biti u prirodnoj veličini ili se može raditi o modelu umanjenom  $N$  puta.  $N$  predstavlja faktor umanjjenja linernih dimenzija prostorije u prirodnoj veličini.

U reverberacionoj prostoriji prirodne veličine, merenja se izvode u trećinsko – oktavnim opsezima od 100 Hz do 5 kHz [2]. Ako se radi o modelu kod koga je primenjen faktor umanjjenja  $N$ , merni opseg se transformiše naviše pa su mu tada granice od  $N \times 100$  Hz do  $N \times 5$  kHz.

Zapremina reverberacione komore (modela), izražena u  $m^3$  mora zadovoljiti uslov [2]:

$$V \geq 200 \cdot N^{-3}, \quad (1)$$

dok za apsorpciju prazne komore  $A_0$  mora biti ispunjena relacija:

$$A_0 \leq 0,30 \cdot V^{2/3} \quad (2)$$

Kod merenja koeficijenta rasipanja uzorak treba da se otkreće pa zbog toga u komori mora postojati obrtno postolje sa čvrstom kružnom osnovnom pločom. Veličina osnovne ploče mora odgovarati maksimalnim dimenzijama uzorka. Ni jedan deo obrtnog postolja ne sme biti bliži zidovima komore od  $N^{-1} \cdot 1,0$  m.

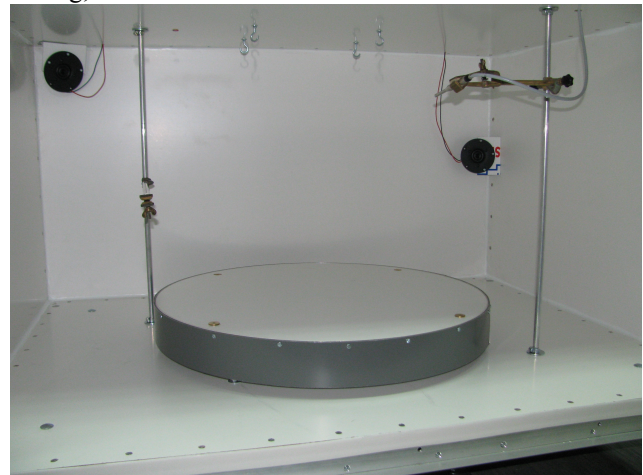
## II. DIMENZIJE MODELA REVERBERACIONE KOMORE

U našem slučaju faktor umanjjenja dimenzija prostorije je

$N = 10$ , pa je veličina modela definisana izrazom (1), odakle se dobija za njegovu zapreminu  $V \geq 0,2 m^3$ . Odlučeno je da se, radi tačnijih merenja na nižim frekvencijama i veće verovatnoće uspostavljanja difuznog zvučnog polja ne ide na minimalnu vrednost zapremine. Pretpostavka je da bi bilo zadovoljavajuće uzeti pet puta veću zapreminu od minimalno dozvoljene, što u ovom slučaju znači približno  $1 m^3$ . Kod izbora odnosa dimenzija uzet je u obzir jedan od kriterijuma za uniformnu raspodelu rezonansi prostorije [3]. Po ovom kriterijumu dimenzije treba da zadovolje međusobnu vezu 1,9:1,4:1. Tako su stvarne unutrašnje dimenzije modela 1,33 m x 0,98 m x 0,7 m, što daje zapreminu prazne komore od  $V = 0,91 m^3$ .

## III. IZBOR MATERIJALA ZA IZRADU MODELA

Materijal za izradu zidova modela reverberacione prostorije treba da ima što manju apsorpciju zvuka, dovoljnu mehaničku čvrstoću i odgovarajuću izolacionu moć. Tradicionalno, u ove svrhe je korišćeno staklo. Međutim, radi obezbeđenja dovoljne mehaničke čvrstoće za komoru dimenzija 1,33 m x 0,98 m x 0,7 m, bilo bi potrebno staklo minimalne debljine 10 ili 12 mm. S obzirom da je specifična gustina stakla minimalno  $2400 kg/m^3$ , to bi masa pomenute komore bila veća od 140 kg,



Sl. 1. Unutrašnjost reverberacione komore

odnosno 160 kg za debljine stakla 10 odnosno 12 mm, respektivno. Sa ovakvom komorom je teško manipulirati, problematično je izvođenje spojeva po ivicama a gornja pokretna stranica (poklopac) bi imala masu od minimalno 30 kg.

Iz pomenutih razloga, kao i želje da se realizuje rastavljiva komoru koju bi nakon završenog ciklusa merenja bilo moguće spakovati i odložiti u manji prostor odlučeno je da materijal za izradu komore bude standardna furnirana

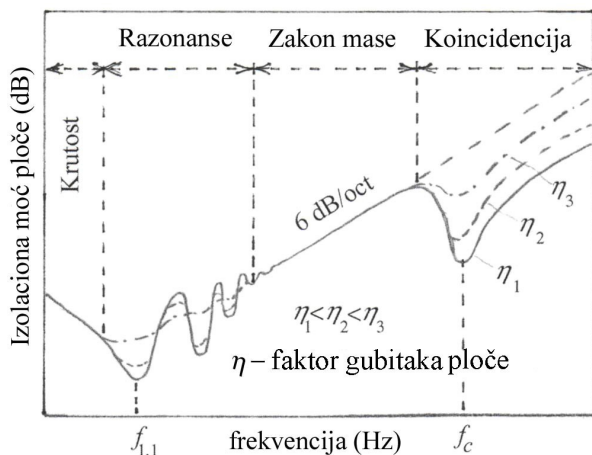
Dragan Drinčić, Visoka škola elektrotehnike i računarstva u Beogradu, Vojvode Stepe 283, 11 000 Beograd, Srbija (telefon: 381-63-7788226; faks: 381-11-3950024; e-mail: dragan.drincic@viser.edu.rs).

Mirjana Adnađević, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulvar Kralja Aleksandra 73, 11 000 Beograd, Srbija (e-mail: mirjanica86@gmail.com).

iverica, debljine 18 mm. Ploče od ovog materijala imaju dovoljnu čvrstoću a završni sloj furnira je veoma gladak što obećava malu apsorpciju zvuka. Iverica se lako obrađuje i moguće je podesnom konstrukcijom izvesti rastavljive spojeve. Specifična gustina iverice je oko  $670 \text{ kg/m}^3$ , što je skoro četiri puta manje nego kod stakla, pa bi komora od iverice, debljine 18 mm, bila duplo lakša nego od stakla.

#### IV. IZOLACIONA MOĆ ZIDOVA KOMORE

Zidovi komore su pravougaone ploče konačnih dimenzija fiksirane po ivicama. Pod dejstvom zvučnog pritiska u komori, zidovi vibriraju na frekvenciji (ili frekvencijama) pobude. Na najnižim frekvencijama pobude amplituda vibracija, a prema tome i snaga zračenja zidova komore zavise samo od njihove krutosti, sl. 2. Za manju snagu zračenja i veću izolacionu moć, potrebno je da krutost zidova bude što veća.



Sl. 2. Izolaciona moć pravougaone ploče ukrućene po ivicama,  $\eta$  - prigušenje materijala ploče

Iznad ovog frekventijskog područja dolaze do izražaja rezonance zidova komore. Idući prema još višim frekvencijama dolazimo u zonu gde samo površinska masa zida komore određuje koliko će zvučne energije proći kroz njega (zakon mase). Međutim, zidovi komore ponovo pojačano propuštaju akustičku energiju u okolini tzv. frekvencije koincidencije  $f_c$ .

##### A. Rezonanse zidova komore

Zidovi komore izrađeni u obliku pravougaonih ploča imaju beskonačno mnogo sopstvenih frekvencija rezonanse datih izrazom [4]:

$$f_{m,n} = 0,45 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho_m}} \cdot \left[ \left( \frac{m}{l_x} \right)^2 + \left( \frac{n}{l_y} \right)^2 \right] \quad (3)$$

gde su:

$m, n = 1, 2, 3, \dots$

$l_x, l_y$  - dužina i širina ploče, respektivno (m)

$E$  - Jungov modul elastičnosti ploče ( $\text{N/m}^2$ )

$\rho_m$  - gustina materijala ploče ( $\text{kg/m}^3$ )

$d$  - debljina ploče (m).

Dimenzije zidova komore o kojoj je ovde reč su  $1,33 \text{ m} \times 0,98 \text{ m}$ ,  $1,33 \text{ m} \times 0,7 \text{ m}$  i  $0,98 \text{ m} \times 0,7 \text{ m}$ , a njihova debljina 18 mm. Uzimajući za ivericu  $\sqrt{E/\rho_m} = 2500 \text{ m/s}$ , iz jednačine (3) dobijamo da su najniže rezonanse zidova, idući od onog najveće prema onom najmanje površine,

redom: 26 Hz, 33 Hz i 35 Hz. Na ovim frekvencijama zidovi propuštaju veliki procenat akustičke energije. Međutim, u našem slučaju područje frekvencija rezonansi zidova komore je daleko ispod mernog područja (najniža frekvencija mernog područja je 1 kHz).

##### B. Područje zakona mase

Površinska masa iverice debljine 18 mm iznosi oko  $m_s = 12 \text{ kg/m}^2$ , pa je izolaciona moć zida od ovog materijala na frekvenciji od 1 kHz [4]:

$$R = 20 \log(m_s \cdot f) - 48 = 34 \text{ dB} \quad (4)$$

Prema višim frekvencijama, kao što je poznato, izolaciona moć raste približno 6 dB/oktavi.

##### C. Frekvencija koincidencije zidova komore

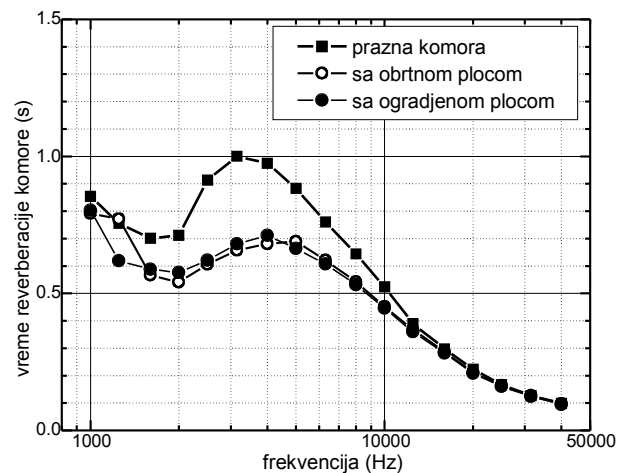
Frekvencija koincidencije zidova komore napravljenih od iverice ( $\sqrt{E/\rho_m} = 2500 \text{ m/s}$ ) debljine  $d = 18 \text{ mm}$  iznosi [5]:

$$f_c = \frac{c^2}{1,8 \cdot d} \sqrt{\frac{\rho_m}{E}} \approx 1450 \text{ Hz} \quad (5)$$

#### V. AKUSTIČKE KARAKTERISTIKE KOMORE

##### A. Vreme reverberacije

Vreme reverberacije komore je prikazano na sl. 3 (kriva označena punim kvadratićima). Kao što se moglo i očekivati, idući prema višim frekvencijama (iznad 4 kHz), vreme reverberacije opada usled povećane apsorpcije zvuka u vazduhu. Na nižim frekvencijama uočljiv je



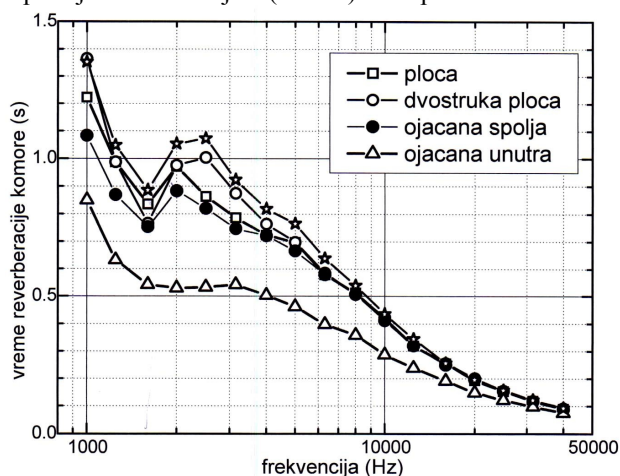
Sl. 3. Vreme reverberacije komore od iverice

značajan pad vremena reverberacije, naročito u okolini terce sa centralnom frekvencijom od 1600 Hz.

Iz krive vremena reverberacije prazne komore sa sl. 3, jasno je da komora ima pojačanu apsorpciju zvučne energije u terci sa centralnom frekvencijom od 1600 Hz, čije su granične frekvencije 1400 i 1800 Hz. S obzirom na činjenicu da je frekvencija koincidencije zidova komore na približno 1450 Hz, izraz (5), ovo se moglo i očekivati.

U daljem postupku optimizacije karakteristika komore bila je namera da se smanji povećani gubitak zvučne energije u okolini frekvencije koincidencije. Moguća rešenja, koja se sastoje u povećanju debljine zidova ili u njihovom ukrućivanju, testirana su u drugom modelu komore, manjih dimenzija izrađene od stakla debljine 10 mm, koja je bila na raspolaganju. Kod ove komore gornji

zid (poklopac) je mobilan radi neophodne mogućnosti pristupa njenoj unutrašnjosti kod nameštanja i podešavanja opreme prilikom izvođenja merenja. Umesto originalnog mobilnog zida izrađenog od stakla iste debljine kao i ostali zidovi komore, korišćeni su uzorci različite konstrukcije, napravljeni od materijala (iverica) kao i primarna komora.



Sl. 4. Vreme reverberacije komore od stakla sa poklopcem od iverice različitih konstrukcionih osobina

Testirane su tri vrste uzoraka: iverica debljine 18 mm (kao kod primarne komore), iverica debljine 18 mm ojačana letvama dimenzija 4 x 4 cm na međusobnom rastojanju od 20 cm, i iverica debljine 36 mm dobijena lepljenjem dve iverice debljine 18 mm.

Na slici 4 su dati rezultati merenja vremena reverberacije u test modelu izrađenom od stakla. Posebnim simbolima su označeni dijagrami dobijeni za različite test uzorke kako je napred objašnjeno.

Pokazalo se da i kod komore od stakla imamo povećanu apsorpciju zvučne energije skoro na istim frekvencijama (u terci sa centralnom frekvencijom od 1600 Hz) kao i kod komore izrađene od iverice. Razlog ovoj činjenici se nalazi u podatku da i frekvencija koincidencije zidova od stakla debljine 10 mm upada u opseg iste terce (iznosi približno 1520 Hz).

Sa slike 4 se dalje može zaključiti da postoje razlike u količini apsorborane energije kada je jedan zid komore različitih karakteristika ali da je najveći gubitak energije opet u terci na 1600 Hz i da tu razlike nisu velike. Ovo je i logično pošto ostalih pet zidova, izrađenih od stakla debljine 10 mm, imaju istu frekvenciju koincidencije pa razlika koju unosi sam šesti zid nije značajna, makar kakve konstrukcije on bio.

Poređenjem rezultata datih na slikama 3 i 4, može se zaključiti da je frekvencijska karakteristika vremena reverberacije u obe komore slična; na nižim frekvencijama imamo značajno smanjenje vremena reverberacije u okolini frekvencije koincidencije zidova komore, dok na višim frekvencijama imamo konstantan pad vrednosti vremena reverberacije usled povećane apsorpcije zvuka u vazduhu u komori.

Vredna je pažnje i činjenica da je na najnižim frekvencijama od interesa (oko 1 kHz) vreme reverberacije komore od stakla znatno veće nego komore od iverice i ako je ova druga veće zapremine. Razlog ovome treba, dobrim delom, tražiti u 3,6 puta većoj površinskoj masi zidova prve komore, zbog čega je njihova izolaciona moć, za bar 10 dB,

veća od izolacione moći zidova druge komore.

### B. Difuznost zvučnog polja

U opsegu frekvencija od 1 kHz do 4 kHz, gde uticaj apsorpcije zvuka u vazduhu još nije značajno izražen, srednje vreme reverberacije komore je oko 0,85 s. Na osnovu ovog podatka dobija se da je kritična frekvencija [4] komore, odnosno frekvencija iznad koje se komora ponaša kao potpuno reverberantni prostor data izrazom:

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} = 1932 \text{ Hz} \quad (6)$$

gde je  $T$  vreme reverberacije a  $V$  zapremina komore.

Najniže sopstvene frekvencije rezonanse komore su  $f(1,0,0) = 130 \text{ Hz}$  i  $f(0,1,0) = 175 \text{ Hz}$ . Kao što je poznato njihov broj u opsegu frekvencija  $\Delta f$  raste sa kvadratom frekvencije [5]. Tako se dobija da je u opsegu od  $\Delta f = 10 \text{ Hz}$ , na frekvenciji od 1 kHz broj sopstvenih frekvencija rezonanse:

$$\Delta N \approx \frac{4 \cdot \pi \cdot V \cdot f^2}{c^3} \Delta f = 3 \quad (7)$$

Širina rezonantnih krivih na frekvenciji oko 1 kHz je približno 3 Hz, pa se može zaključiti da će i na frekvencijama između 1 kHz i  $f_k$  homogenost zvučnog polja u komori biti relativno dobra. Pored toga, uobičajeno je da se u modelu reverberacione komore nalazi i nekoliko difuzora sa konveksnim krutim površinama što dodatno doprinosi homogenosti i difuznosti zvučnog polja.

### C. Apsorpcija komore

Apsorpcija prazne komore, čija je zapremina 0,91 m<sup>3</sup> i vreme reverberacije oko 0,85 s, slika 4, je:

$$A_0 = 0,161 \frac{V}{T} = 0,17 \text{ m}^2 \quad (8)$$

odakle se zaključuje da komora ispunjava uslov (2) definisan standardom ISO 17497-1 [2].

Poređenjem vrednosti vremena reverberacije dobijenih za komoru od iverice i stakla, slike 3 i 4 respektivno, može se zaključiti da je apsorpcija zidova u prvoj komori, uz istu ekvivalentnu zapreminu, veća a vreme reverberacije manje. Ovo je svakako nepovoljno i može biti uzrok smanjene tačnosti merenja koeficijenta rasipanja u ovoj komori. Prevazilaženje ovog nedostatka moguće je možda tražiti u lakiranju unutrašnjih površina zidova komore i/ili izvesnom povećanju njihove debljine, što će između ostalog, biti predmet dalje provere.

Pored toga, interesantno je zapažanje, da se unošenjem u komoru obrtne ploče (prečnika 0,7 m i debljine 18 mm) na koju se postavljaju merni uzorci, izrađene od istog materijala kao i zidovi komore, apsorpcija u njoj povećava čak za preko 40 %, odnosno vreme reverberacije komore smanji za isti iznos. Do ovog zaključka se dolazi upoređivanjem krivih vremena reverberacije sa slike 3 za praznu komoru (puni kvadratići) i vremena reverberacije za istu komoru kada se u nju unese jedna od dve obrtne ploče (prazni i puni kružići). Slična pojava je uočena i kod kontrolne komore izrađene od stakla, kada su na njenom poklopcu od iverice sa unutrašnje strane postavljena tri rebra dimenzija 4 x 4 cm na međusobnom rastojanju od 20 cm. Trouglovima je na slici 5, označen dijagram vremena reverberacije za ovaj slučaj koji opet pokazuje značajno povećanje apsorpcije u komori.

Čini se, na prvi pogled, da bi uzrok ovako nesrazmernom

povećanju apsorpcije u komori, u oba navedena primera, moglo biti smanjenje srednjeg slobodnog puta zvučnih talasa i usled toga povećanje broja refleksija za dato vreme. Međutim, ova pretpostavka ipak zasluđuje dalju detaljniju analizu i praktičnu proveru.

#### VI. ZAKLJUČAK

Realizovana komora od furnirane iverice, debljine 18 mm, zadovoljava uslove standarda ISO 17497-1 [2] za merenje koeficijenta rasipanja neravnih površina. Njena manja ukupna masa, manja osetljivost na slučajne potrese i udare, bezbednije i lakše premeštanje i rastavljivost zidova predstavljaju prednosti u odnosu na odgovarajuću komoru uobičajeno izrađenu od stakla.

Nedostatak u odnosu na klasične staklene komore je njena nešto veća apsorpcija. Čini se da je smanjenje apsorpcije moguće potražiti u nanošenju odgovarajućih premaza (neke vrste laka za drvo ili slično) na unutrašnje površine zidova i/ili izvesnom povećanju debljine zidova.

Nesrazmerno povećanje apsorpcije obe komore (nove izrađene od iverice i klasične izrađene od stakla) kod unošenja elemenata relativno male ukupne zapremine (i površine) zasluđuje dalju detaljniju proveru i analizu.

#### LITERATURA

- [1] M. Vorländer, E. Mommertz; Definition and Measurement of Random-incidence Scattering Coefficients. *Applied Acoustics*, 60(2), p.187-199, 2000.
- [2] ISO 17497 – 1, Acoustics – Sound scattering properties of surfaces – Part 1: Measurement of the random - incidence scattering coefficient in a reverberation room, May 2004.
- [3] AES-4id-2001, AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems - Characterization and measurement of surface scattering uniformity.
- [4] G. Ballou, *Handbook for Sound Engineers*, third edition, Focal Press, 2002.
- [5] H. Kurtović, *Osnovi tehničke akustike*, Naučna knjiga, 1982.
- [6] D. Bies and C. Hansen, *Engineering Noise Control*, third edition, Spon Press, 2003.
- [7] Jin Yong Jeon and Sung Chan Lee, Measurements of the scattering coefficient of surfaces in a reverberation room, *Audio Engineering Society*, 21-st Conference, St. Petersburg, Russia, 2002.
- [8] M. Gomes, M. Vorländer and S. Gerges, "Aspects of the sample geometry in the measurement of the random-incidence scattering coefficient," *Proc. Forum Acusticum Sevilla*, RBA-06-002-IP (2002).
- [9] Peter D'Antonio and Jonh Konnert, The Directional Scattering Coefficient: Experimental Determination, *JAES* Volume 40 Number 12 pp. 997-1017, December 1992.
- [10] L. Makrinenko, *Acoustics of Auditoriums in Public Buildings*, Acoustical Society of America, 1994.

#### ABSTRACT

The procedure for reverberation room scale model construction, according to the standard and optimized characteristics in comparison to the mostly made glass models is shown. Model is constructed so that scattering coefficient of a material used in room treatment could be measured. The aim was to make reverberating room scale model using material of smaller overall mass, with less stroke and shock sensitivity, safer and easier to move and transfer, easy to assemble or disassemble, and cheaper.

The 18 mm plywood panel, veneered on both sides was used as construction material. It is found that it is possible to make a model with desired goal but its absorption is greater than for glass models. Some assumptions as solutions for reducing absorption are given, but those have to be confirmed by additional measurements.

#### SCALE MODEL REVERBERATION CHAMBER CHARACTERISTICS OPTIMIZATION

Dragan Drinčić, Mirjana Adnađević