

# Merenje koeficijenta apsorpcije materijala u fizičkom modelu reverberacione komore

Mirjana Adnađević

**Sadržaj** — Cilj istraživanja je bio da se izmere koeficijenti apsorpcije materijala za koje je poznato da se koriste u izradi fizičkih modela u akustici i odabranih materijala za koje se pretpostavlja da imaju mali koeficijent apsorpcije. Na osnovu dobijenih rezultata razmatrane su mogućnosti primene odabranih materijala u izradi fizičkih modela. Opisana je procedura merenja koeficijenta apsorpcije materijala koja prati tačno utvrđene standarde. Kako su merenja sprovedena na fizičkom modelu reverberacione komore, akcenat je stavljen na rešavanje problema koje sa sobom donosi sam koncept fizičkih modela, a koji se odnose na izbor adekvatne zvučne pobude, dizajniranje tercnih filtara namenjenih za rad u fizičkom modelu, kontrolisanje uslova rada u cilju dobijanja relevantnih rezultata.

**Ključne reči** — Fizički model, koeficijent apsorpcije, reverberaciona komora, vreme reverberacije.

## I. UVOD

POČETAK korišćenja fizičkih modela u akustici vezivao se isključivo za akustički dizajn imajući za cilj da olakša rad u toj oblasti i omogućí brz uvid u zvučno polje prostorije i eventualne intervencije [1]. Usavršavanje laboratorijske opreme je omogućilo da ova sofisticirana metoda nađe primenu i u naučnim istraživanjima iz oblasti akustike. Fizički modeli se u tom kontekstu koriste za demonstriranje raznih akustičkih fenomena kao što su: vreme reverberacije, efekat češljastog filtra, usmerenost zvučnog izvora, ali i za merenje koeficijenta difuznosti i apsorpcije materijala [2].

Upotreba fizičkog modela u akustici bila je skoro zaboravljena sa pojavom računara. Vreme i novac potrebni za njegovu izradu igrali su presudnu ulogu. Zahvaljući činjenici da se softverskim modelvanjem ne dobijaju uvek pouzdani rezultati, zbog koncepta geometrijske akustike koja sa sobom povlači brojne pretpostavke, fizičko modelovanje se vratilo akustičkom dizajnu i naučnom istraživanju [3].

Opšte je poznato da se fizički modeli, koji se koriste u domenu akustike, izrađuju od slabih apsorbera. Ovim je postignuto da početno vreme reverberacije modela bude veliko, što dalje otvara mogućnosti raznih intervencija u cilju dobijanja željenog odziva. Materijali od kojih se fizički modeli danas prave nisu jednostavni za obradu, pa je pri izradi modela potrebno zatražiti pomoć stručnjaka

obučenih da obrađuju takve materijale. Vreme koje je potrebno da stručnjak odradi zadatak je ponekad veoma skupo, jer je istraživač često pritisnut raznim vremenskim rokovima za ispunjavanje obaveza. Zbog toga je cilj ovog istraživanja bio traganje za materijalima koji imaju slične osobine kao materijali koji se već koriste u izradi, ali koji se brzo i lako obrađuju.

Rad je organizovan kroz šest poglavlja. Prvo poglavlje je uvodno, drugo opisuje problematiku kocepta fizičkih modela u akustici, dok treće daje opis izvršenih probnih merenja u cilju izbora aparature. Četvrto i peto poglavlje opisuju proceduru merenja vremena reverberacije i koeficijenta apsorpcije respektivno. Šesto poglavlje daje prikaz rezultata merenja ispitivanih materijala; analizirane su njihove osobine u pogledu primenljivosti u izradi fizičkih modela i ukazano je na pravce u kojima se tema ovog istraživanja može dalje razvijati.

## II. KONCEPT FIZIČKIH MODELA - PROBLEMATIKA

Koncept fizičkih modela zasniva se na principima dinamički sličnih sistema. Pod ovim pojmom u akustici se podrazumeva jednakost u procesima koji se odvijaju u zvučnom polju realne prostorije i modela srazmerno smanjenih dimenzija. To je moguće postići ukoliko je odnos talasne dužine zvuka i prepreke sa kojom zvučni talas stupa u interakciju isti [3]. Dimenzije fizičkog modela su srazmerno smanjene, pa je u cilju zadržavanja istog odnosa potrebno raditi na povišenim frekvencijama. Rad na skaliranim frekvencijama otvara pitanje izbora adekvatne zvučne pobude. Potrebno je da zvučni izvor na ovim frekvencijama generiše nezanemarljivu snagu tj. da daje signal sa zadovoljavajućom dinamikom. Dinamika je prihvatljiva ukoliko je nivo zvuka 35 dB ili 45 dB iznad pozadinskog šuma. Zahtev koji mikrofoni treba da ispune je da budu u što većoj meri omnidirekcioni, a to je veoma teško ostvariti na skaliranim frekvencijama gde njegove dimenzije postaju poredive, a čak i veće od talasne dužine zvuka [1], [4].

## III. TESTIRANJE APARATURE

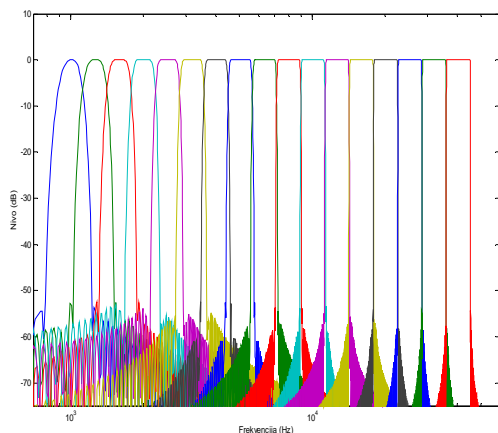
Ono što se zapravo meri u modelu reverberacione komore, a u cilju izračunavanja koeficijenta apsorpcije, je vreme reverberacije. Procedura prati utvrđene standarde za izračunavanje koeficijenta apsorpcije JUS. U. J6. 059 i vremena reverberacije ISO 3382, a biće detaljno opisana

Istraživanja na osnovu kojih je napisan ovaj rad sprovedena su u okviru aktivnosti na projektu 23046 koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Mirjana Adnađević, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Srbija (telefon: 381-63-8784604; e-mail: mirjanica86@gmail.com).

kasnije u tekstu. Pre svih merenja relevantnih za izračunavanje koeficijenta apsorpcije materijala, izvršen je set probnih merenja. Jedan od zadataka probnih merenja je bio izbor zvučne pobude. Po standardu ISO 3382, komora se pobuđuje električnim varničarem ili širokopojasnim šumom. Testirana su oba načina pobude i posmatrana je dobijena dinamika signala u opsegu frekvencija od interesa (1kHz-40kHz). Pobuda pseudo-slučajnom sekvencom je dala nešto bolju dinamiku na najvišim frekvencijama koje umeju da budu veom kritične. Ishod je sam po sebi logičan, jer se ovakvom pobudom potiskuje uticaj pozadinskog šuma, o čemu će biti više reči kasnije [5], [6].

Koeficijent apsorpcije materijala je frekventijski zavistan, stoga se postupak zasniva na filtriranju impulsnog odziva komore po frekvencijama i prikazu rezultata merenja po frekvencijama. Za potrebu ovog istraživanja, dizajnirana je banka tercnih filtera. Probnim merenjima je utvrđeno da oni vrše svoj posao tj. da je sa predloženim redom filtra postignuto dovoljno slabljenje u nepropusnom opsegu i na taj način dobijen signal zadovoljavajućeg kvaliteta. Na Sl. 1. prikazane su funkcije prenosa tercnih filtera centralnih frekvencija od 1kHz do 40kHz.



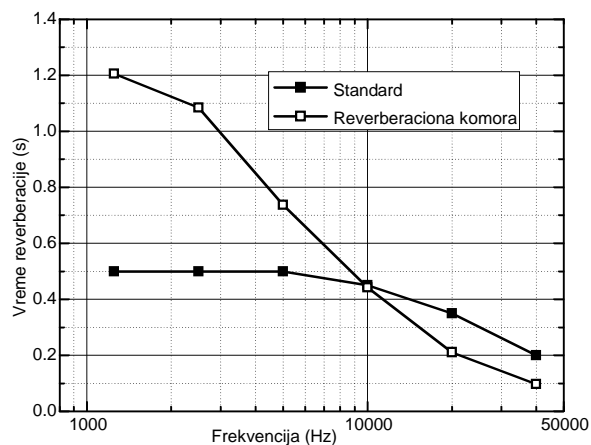
Sl. 1. Funkcije prenosa dizajnirane banke tercnih filtera

Pošto je namena reverberacione komore merenje koeficijenta apsorpcije materijala, a sa njegovim unošenjem vreme reverberacije se smanjuje, jer veća energija biva apsorbovana, standardom je definisano minimalno potrebno vreme reverberacije po frekvencijama. Poznato je da ono zavisi i od zapremine komore. Pre poređenja vremena reverberacije ostvarenog u modelu komore sa onim što standard definiše, izmerene su sve dimenzije komore i na osnovu njih izračunata zapremina, a zatim je zapremina modela upoređena sa zapreminom koju standard predlaže. Naravno, uzeto je u obzir da su svi standardi propisani za realne prostorije, tako da je vođeno računa o faktoru skaliranja modela. Merenjem je utvrđeno da je zapremina modela komore koja se nalazi u Laboratoriji za akustiku Elektrotehničkog fakulteta  $0,242122 \text{ m}^3$ , što je u skladu sa standardom ( $0,2 \text{ m}^3$ ). Na osnovu sprovedenih probnih merenja pokazano je

da model reverberacione komore predstavlja relevantan alat u izračunavanju koeficijenta apsorpcije materijala, jer približno zadovoljava uslove standarda (Sl. 2.).

#### IV. PROCEDURA MERENJA VREMENA REVERBERACIJE

U širem smislu, postupak merenja se odvijao tako što je komora pobuđena zvučnim izvorom, a mikrofonom (Brüel & Kjaer Tip 4135) je registrovan nivo zvuka, zatim je signal prosleđen do pojačavača linijskog nivoa (proizvodnja ETF); A/D konvertorom (Audio Control 1)



Sl. 2. Poređenje vremena reverberacije u modelu komore sa propisima standarda

izvršena je digitalizacija signala. Opcija koju konvertor nudi je rad sa učestanošću odabiranja 192kHz, pa je u ovom kontekstu moguća analiza odziva na veoma visokim frekvencijama (u našem slučaju do 45kHz). Pomoću programa EASERA signal je zapisan na računar, a zatim je usledila procedura računanja vremena reverberacije u softverskom paketu Matlab<sup>®</sup>. Na Sl. 3. prikazana je kompletna aparatura korišćena u merenjima.

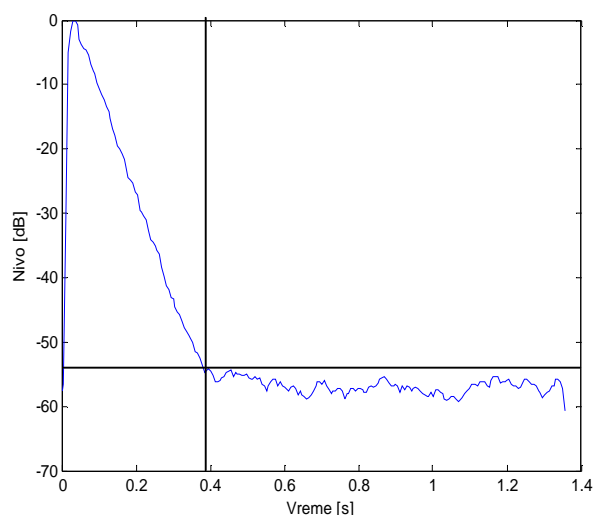


Sl. 3. Prikaz kompletne aparature korišćene u merenjima. U gornjem delu je model reverberacione komore, a u donjem su prateći uređaji.

Pošto je na osnovu izvršenih probnih merenja zaključeno

da je bolja dinamika signala postignuta pobuđivanjem komore pseudo-slučajnom sekvencom maksimalne dužine, odlučeno je da se ovaj vid pobude koristi u merenjima. Ovo je novi metod pobuđivanja i sve češće se primenjuje. Njegova prednost je u tome što je sekvenca periodična, pa nisu potrebna duga usrednjavanja u cilju eliminisanja naglih promena kao kod belog šuma. Postavlja se pitanje dobijanja impulsnog odziva modela komore nakon ovakve pobude. Impulсни odziv komore se dobija tako što se odziv komore na pobudu sekvencom koreliše sa tom sekvencom. To je moguće zbog osobine autokorelacione funkcije pseudo-slučajne sekvence maksimalne dužine. Pobuđivanje komore MLS (*Maximum Length Sequence*) sekvencom daje visok odnos signal/šum, jer se korelacijom odziva komore i ove sekvence potiskuje pozadinski šum, jer on nije korelišan sa sekvencom [6].

Za računanje vremena reverberacije korišćen je Matlab® u kome je razvijen kod koji prati osnovnu proceduru merenja po standardu. Kod je baziran tako da prvo filtrira signal po trecama (1kHz-40kHz). Filtrirani signal se zatim normalizuje, pa usrednjava sa preklapanjem kako bi se minimizirao uticaj brzih promena [5]. Pošto je vreme reverberacije definisano kao vreme potrebno da nivo signala opadne za 60 dB nakon isključenja pobude, posmatrana je promena nivoa filtriranog signala sa vremenom. Na Sl. 4. Prikazana je promena nivoa signala filtriranog trecnim opsegom centralne frekvencije 12,5kHz.



Sl. 4. Prikaz promene nivoa signala sa vremenom i odabir početne tačke integracije

Sa Sl. 4. jasno se zapaža nivo pozadinskog šuma. Ovaj prikaz je značajan za izračunavanje tzv. Šrederove krive. Ona se dobija inverznom vremenskom integracijom impulsnog odziva komore. Za početak integracije birana je tačka na vremenskoj osi, tako da se eliminiše uticaj pozadinskog šuma na tačnost izračunavanja [5]. Tokom filtriranja često se javljao problem određivanja ove tačke na nižim trecnim frekvencijama, dok je na višim, pozadinski šum bio jasno izdiferenciran. Integracija predstavlja filtriranje odnosno “peglanje” signala, tako da Šrederova kriva predstavlja linearizovanu karakteristiku promene nivoa signala sa vremenom. Zumiranjem

Šrederove krive uočeno je veliko talasanje nivoa sa vremenom, pa je za određivanje brzine opadanja nivoa zvuka, bilo potrebno realizovati deo koda koji provlači optimalnu pravu. Prema Gausovoj teoriji, prava je optimalna ukoliko suma kvadrata odstupanja tačaka od prave ima najmanju moguću vrednost [7]. Vreme reverberacije  $T$  dobijeno je na osnovu sledeće relacije [5]:

$$T = \frac{60}{d} \quad (1)$$

#### V. IZRAČUNAVANJE KOEFICIJENTA APSORPCIJE

Princip merenja koeficijenta apsorpcije materijala se sastoji u unošenju ispitivanog uzorka u komoru, pri čemu se dodatna apsorpcija određuje pomoću izmerenog vremena reverberacije modela komore pre i posle unošenja uzorka. Ovo je definisano standardom JUS U. J6. 059.

Na slabljenje nivoa zvuka nakon prestanka delovanja pobude, pored površinske apsorpcije materijala i refleksionih površina, uticaj ima i disipacija u vazduhu. Njen uticaj značajno varira sa promenom temperature, vlažnosti vazduha, a naročito sa frekvencijom, jer ima kvadratnu zavistnost [8]. U literaturi se mogu naći razni predlozi za minimiziranje njenog uticaja. Često se vrši isušivanje vodene pare, jer se smatra da ovaj sastav vazduha najviše doprinosi njenom uticaju [9]. U merenjima sprovedenim u okviru ovog istraživanja, problem je rešen tako što je uložena napor da se merenja vremena reverberacije prazne komore i komore sa unetim uzorkom vrše veoma brzo. Eventualne male promene u temperaturi i vlažnosti vazduha su zanemarene. Ovim je postignuto da se disipacija u ova dva stanja može smatrati istom, pa će se njen uticaj poništiti. To je prikazano sledećim postupkom:

$$T_1 = \frac{0,16V}{A + A_d} \quad (2)$$

Relacija (2) predstavlja tzv. Sabinovu formulu [8] i služi za izračunavanje ukupne apsorpcione površine. Sa  $T_1$  je označeno vreme reverberacije prazne komore tj. pre unošenja uzorka;  $V$  predstavlja zapreminu modela komore; ukupna apsorpcija od površina je označena sa  $A$ , a apsorpcija usled disipacije sa  $A_d$ .

Unošenjem materijala ekvivalentna apsorpciona površina prazne komore se poveća za dodatnu površinu  $\Delta A$ .

$$T_2 = \frac{0,16V}{A + \Delta A + A_d} \quad (3)$$

$T_2$  predstavlja vreme reverberacije izmereno u modelu komore nakon unošenja materijala dodatne apsorpcije. Na osnovu relacija (2),(3) dobija se:

$$\Delta A = 0,16V \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (4)$$

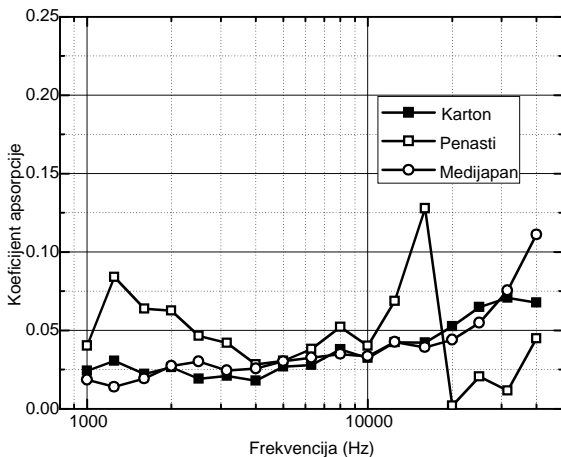
Kako  $\Delta A$  predstavlja apsorpcionu površinu unetog materijala, njegov koeficijent apsorpcije  $\alpha$  se dobija na sledeći način [8]:

$$\alpha = \frac{\Delta A}{S} \quad (5)$$

gde je S površina unetog uzorka.

## VI. REZULTATI MERENJA

Na osnovu opisane procedure i uz korišćenje već predložene aparature, izvršena su merenja koeficijenta apsorpcije kartona sa tvrdom podlogom, medijapana i penastog materijala. Površina unetog materijala odgovara površini tavanice komore  $S=0.484244 \text{ m}^2$ , jer se ravan apsorpcioni uzorak pričvršćivao za nju. Ukoliko se osvrnemo na standard, videćemo da je zahtevana površina unetog uzorka dosta manja. Međutim, znajući da su u pitanju materijali sa veoma malim koeficijentom apsorpcije, potreban nam je bio što veći uzorak radi dobijanja relevantnih rezultata. Tokom svih merenja pretpostavljeno je da se uslovi rada nisu menjali u odnosu na početno merenje reference tj. prazne komore, odnosno da je vlažnost vazduha bila 53,5%, a temperatura 24,8°C. Na Sl. 5. prikazane su dobijene vrednosti koeficijenta apsorpcije materijala.



Sl. 5. Prikaz koeficijenta apsorpcije materijala dobijenih merenjem

Sa Sl. 5 se vidi da penasti materijal ima nešto veću apsorpciju na nižim frekvencijama u poređenju sa ostalim prikazanim materijalima, što znači da je najtransparentniji. Od svih analiziranih materijala pokazuje najbolje osobine na najvišim frekvencijama jer je veoma gladak materijal tj. najmanje porozan. Međutim, ono što nije dobro kod ovog materijala i zbog čega je on trenutno odbačen kao mogući materijal za izradu modela, je apsorpcioni pik na središnjim frekvencijama. Pik je posledica razmicanja slojeva u samom materijalu, pa se mora razmišljati o načinu kako to minimizirati, što otvara novu istraživačku temu.

Prijatno iznenađujući rezultati primećuju se kod kartona. Očekivao se veći koeficijent apsorpcije imajući u vidu da je veoma lagan materijal, a takođe i porozan. Upoređujući ga sa medijapanom koji se trenutno koristi u izradi modela, a koji je veoma skup i komplikovan za obradu, veoma

dobro mu parira. Nešto povišena apsorpcija na nižim frekvencijama, a koja je posledica transparentnosti, može se minimizirati ukoliko slepimo dva ovakva kartona; to naravno povećava poroznost, što nije dobro za povišene frekvencije, ali farbanjem kartona može se minimizirati apsorpcija i na višim frekvencijama. Farbanje i dupliranje kartona nije sprovedeno u ovom istraživanju, ali istraživaču koji bude proširivao temu ovog rada otvara se ta mogućnost.

Na osnovu sprovedenog istraživanja može se zaključiti da karton daje zadovoljavajuće mali koeficijent apsorpcije da bi se upotrebio u svrhu izrade fizičkih modela; lako je obradiv i dosta jeftin, tako da je učinjen značajni pomak u laboratorijskim istraživanjima koja zahtevaju izradu modela.

## LITERATURA

- [1] H. D. Harwood, A. N. Burd, "Acoustics scaling: general outline", BBC Research Department No. 1970/13 UDC 524. 846. 6, April 1970.
- [2] Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, "Tehnologija akustičkog dizajna prostorija za živa muzička izvođenja—iskustva Laboratorije za akustiku ETF", Laboratorija za akustiku ETF.
- [3] Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, "20 godina tradicije u upotrebi fizičkih modela u akustičkom projektovanju i istraživanju u Laboratoriji za akustiku ETF", [TELFOR, Srbija, 2007].
- [4] Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, "Jednostavan impulsni izvor za merenje u fizičkim modelima", Laboratorija za akustiku ETF.
- [5] International Standard ISO 3382, "Acoustics—Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters", ISO 1997 (E).
- [6] Matthew C. M. Wright, *Lecture notes on the mathematics of acoustics*, Imperial College Press, London, 2005.
- [7] Dragan Stanković, Predrag Osmokrović, *Praktikum laboratorijskih vežbi iz fizike*, Zavod za fiziku tehničkih fakulteta Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2004.
- [8] Jugoslovenski standard JUS U. J6. 059, "Akustika u građevinarstvu — Merenje koeficijenta zvučne apsorpcije u reverberacionoj komori".
- [9] N. F. Spring, K. E. Randall, M. K. E. Smith, "Acoustics scaling: A one-eighth scale model reverberation room", BBC Research Department No. 1971/3 UDC 534. 846. 6, 534. 846. 5, January 1971.

## ABSTRACT

This paper, beside the fact that presents standard method used for measuring absorption coefficients of materials in model reverberation chamber, also shows a way how to cope with difficulties that concept of acoustics scaled models brings itself. It also gives properties description of model reverberation chamber used in measurements. The main accent is put on discussing the results achieved from measurements of absorption coefficients of materials that have low absorption coefficient and thus are suitable to be used in physical model design.

## MEASUREMENT OF ABSORPTION COEFFICIENT OF MATERIALS USING MODEL REVERBERATION CHAMBER

Mirjana Adnađević