

MERENJE KOEFICIJENTA DIFUZNOSTI REFLEKSIJA MEASUREMENT OF SCATTERING COEFFICIENT

Dušica Lukić, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

Sadržaj – *Merenjem koeficijenta difuznosti refleksija omogućava se da predikcioni modeli u akustici prostorija budu tačniji, a pruža se prilika i proizvođačima difuzora da brojačno izraze vrednost difuznosti površina. Koeficijent difuznosti površina je najčešće ulazni podatak za merodavne numeričke simulacije propagacije zvuka u zatvorenim prostorijama i zbog toga je tačnost njegovog merenja veoma bitna. Rad je posvećen opisivanju procedure merenja koeficijenta difuznosti refleksija u slučaju reljefnih površina, koja se zasniva na ISO 17497-1 standardu. Za potrebe ovog rada, u Laboratoriji za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, napravljen je fizički model reverberacione prostorije. Softver Dirac, sa MLS sekvencom kao pobudnim signalom, korišćen je za dobijanje impulsnog odziva sistema dok su svi rezultati obrađivani u Matlab programu.*

Ključne reči – *koeficijent difuznosti refleksija, fizički model, impulzni odziv, procedura merenja, vreme reverberacije*

Abstract – *By measuring scattering coefficient, we improve the accuracy of prediction models in room acoustics. Moreover, manufactures of diffusers can numerically express the value of scattering characteristics of the surfaces. Scattering coefficient is very often an input data for numerous numerical simulations of sound propagation in room acoustics and that's why the accuracy of its measurement is very important. This paper is about measuring procedure of this coefficient by ISO 17497-1 standard. To serve this purpose, a special physical model of reverberation chamber has been setup in the Acoustical Laboratory at Faculty for Electrical Engineering in Belgrade. A software called Dirac, with MLS sequence as excitation signal, has been used for obtaining the impulse response of the measuring system, while all the results and required parameters have been processed in Matlab.*

Key words – *scattering coefficient, physical model, impulse response, measuring procedure, reverberation time*

1. UVOD

Poslednjih godina, postoji potreba da se uvođenjem nekog koeficijenta kvantifikuju difuzne refleksije koje su posledica refleksije zvuka u slučaju reljefnih površina, čije su neravnine po veličini poredljive sa talasnom dužinom zvuka. Zbog toga se u literaturi pojavljuje koeficijent difuznosti refleksija, čijim se merenjem omogućava da predikcioni modeli u akustici prostorija budu tačniji.

Difuzne refleksije se koriste u akustičkom dizajnu prostorija u vidu konstrukcija različitog oblika, pod nazivom difuzori. Njihova uloga je eliminacija izraženih refleksija i postizanje uniformnosti pravca kretanja zvučne energije. Zbog nemogućnosti merenja sketering osobina ovakvih površina, posao akustičkog dizajnera da odabere pravu podlogu za dati slučaj je time znatno otežan.

Pravljenjem modela pomoću koga se može tačno izmeriti koeficijent difuznosti refleksija različitih reljefnih površina, olakšava se posao akustičkim dizajnerima i povećava se tačnost predikcionih modela.

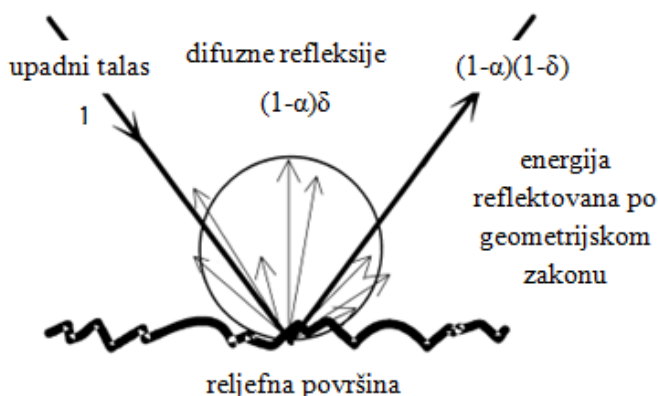
Stepen difuznosti refleksija predstavlja bitan faktor u definisanju akustičkog kvaliteta prostorije (koncertne hale, muzičkog studija, industrijske hale, reverberacione komore itd.).

Ovaj rad posvećen je opisivanju procedure merenja koeficijenta difuznosti refleksija pri proizvoljnoj orijentaciji upadnog talasa u reverberacionoj komori i zasniva se na prvom delu ISO 17497-1 standarda pod generalnim nazivom: „Akustika- sketering osobine površina“. Pored toga, istaknuti su i neki od problema na koje se nailazilo u procesu merenja.

Pored uvodnog poglavlja, rad sadrži još pet poglavlja. U drugom poglavlju data je definicija koeficijenta difuznosti refleksija. Detaljan opis procedure merenja na osnovu ISO standarda dat je u trećem poglavlju. U četvrtom poglavlju prikazani su dobijeni rezultati merenja, dok je peto poglavlje namenjeno za diskusiju uticaja aparature na tačnost merenja. Na kraju kroz zaključak je istaknuta važnost koeficijenta difuznosti refleksija.

2. DEFINICIJA KOEFICIJENTA DIFUZNOSTI REFLEKSIJA

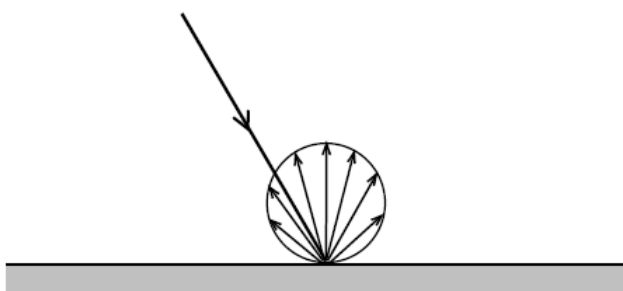
Refleksija zvuka u slučaju reljefnih površina složenija je u odnosu na slučaj refleksije od ravne površine koja se odvija po geometrijskom (Snelovom) zakonu. Kod reljefnih površina, ponašanje reflektovanog talasa zavisi od odnosa dimenzija neravnina i talasne dužine zvuka. Ukoliko su dimenzije neravnina mnogo manje od talasne dužine zvuka, proces refleksije će se odvijati na isti način kao u slučaju ravne površine. U slučaju kada su neravnine svojom dimenzijom poredljive sa talasnom dužinom zvuka, jedan deo energije reflektuje se po geometrijskom zakonu, dok se ostatak energije raspršava u svim pravcima. Ovaj slučaj prikazan je na Sl. 1. [1].



Sl. 1. Refleksija u slučaju reljefne površine

Procenat upadne energije koja se pri refleksiji raspršava zavisi od odnosa talasne dužine i strukture reljefne površine, njegove dubine i geometrijske forme. U odnosu na proces refleksije za ravnu površinu, ovde je refleksija koja se odigrava po geometrijskom zakonu (u spekularnom pravcu) umanjena za dodatni uticaj raspršavanja.

Prostorna struktura širenja energije po pravcima nakon refleksije predstavlja se dijagramom verovatnoće pravaca pri raspršavanju. U modelovanju difuznih refleksija najčešće se pretpostavlja da ta verovatnoća odgovara kružnoj raspodeli, kao što je prikazano na Sl. 2. Analitički oblik verovatnoće ovakve raspodele po pravcima je $\cos\theta$, gde je θ ugao u odnosu na pravac normalan na refleksionu ravan. Za takav oblik difuzne refleksije kaže se da se dešava po Lambertovom zakonu [2].



Sl. 2. Lambertov zakon raspršavanja pri difuznoj refleksiji

Koeficijent difuznosti refleksija može imati vrednost između 0 i 1, pri čemu se definiše kao odnos zvučne energije u ne-spekularnom pravcu i totalne reflektovane energije.

3. POSTUPAK MERENJA PO ISO 17497-1 STANDARDU

Za potrebe ovog rada u Laboratoriji za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu napravljen je fizički model reverberacione prostorije, pri čemu je kompletna aparatura u skladu sa zahtevima ISO 17497-1 standarda. Na Sl. 3. dat je unutrašnji prikaz ovog modela.



Sl. 3. Unutrašnjost fizičkog modela

U reverberacionu prostoriju postavlja se obrtno postolje na čiju bazu se postavlja test uzorak. Baza obrtnog postolja predstavlja jednu ravnu površ koja je cirkularnog oblika i time obezbeđuje da uzorak na njoj ravnomerno rotira. Ulogu predajnika zvučnog signala imaju dva fiksno postavljena zvučnika, dok dva mikrofona imaju ulogu prijemnika. S obzirom da ISO standard definiše korišćenje tri mikrofona, pomoću ručice za koju je prikačen jedan od dva postojeća mikrofona obezbeđuju se tri položaja mikrofona. U komori se nalazi i jedan difuzor koji će učiniti da zvučno polje u modelu bude difuznije. Merenje se vrši u ternim opsezima, u opsegu od 2 kHz do 4 kHz.

Za izračunavanje koeficijenta difuznosti refleksija pri proizvoljnoj incidenciji zvučnog talasa s , ISO standard definiše niz koraka. Najpre je potrebno izračunati vrednost koeficijenta apsorpcije pri proizvoljnoj incidenciji zvučnog talasa α_s , a zatim vrednost istog koeficijenta ali posmatrajući njegovo dejstvo samo u spekularnom pravcu α_{spec} [3]:

$$\alpha_s = 55,3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad (1)$$

$$\alpha_{spec} = 55,3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3) \quad (2)$$

U navedenim relacijama T_1 , T_2 , T_3 i T_4 predstavljaju vreme reverberacije za različite merne uslove navedene u Tabeli 1. Konstante V i S predstavljaju zapreminu prostorije i površinu područja test uzorka, respektivno. Veličine m i c , sa

indeksima koji odgovaraju uslovima merenja iz Tabele 1, odgovaraju koeficijentu opadanja energije vazduha i brzini zvuka u vazduhu, respektivno. U ovom radu usvojena vrednost za brzinu zvuka u vazduhu za sve uslove merenja je 343,2 m/s dok je zanemaren uticaj parametra m .

Tabela 1: Četiri različita vremena reverberacije u zavisnosti od mernih uslova

| Vreme reverberacije | Test uzorak | Postolja |
|---------------------|---------------|-----------|
| T_1 | nije prisutan | ne rotira |
| T_2 | prisutan | ne rotira |
| T_3 | nije prisutan | rotira |
| T_4 | prisutan | rotira |

Na osnovu svega prethodno navedenog, koeficijent difuznosti refleksija pri proizvoljnoj incidenciji zvučnog talasa s računa se po formuli [3]:

$$s = 1 - \frac{1 - \alpha_{spec}}{1 - \alpha_s} = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad (3)$$

Izračunavanju vremena reverberacije za svaki od slučajeva iz Tabele 1, prethodi merenje impulsnog odziva prostorije. U ovom radu korišćena je MLS tehnika merenja impulsnog odziva, što u stvari znači da se za pobudu sistema koriste pseudoslučajne sekvence maksimalne dužine. One su pogodne jer je njihova autokorelaciona funkcija približno jednaka Dirakovom impulsu, pa je stoga spektar sekvence ravan. Pobudni signali sa ravnim spektrom (poput spektra belog šuma) omogućavaju korišćenje kros-korelacije (između izmerenog odziva i pobudnog signala) za izdvajanje impulsnog odziva merenog sistema [4]. Odnosno, impulсни odziv se dobija iz sledećih relacija:

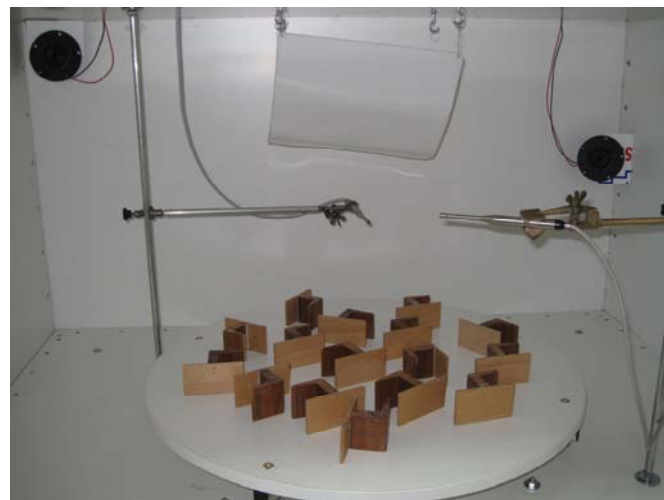
$$\begin{aligned} y[n] &= (h * s)[n] \\ \phi_{sy} &= h[n] * \phi_{ss} \\ h[n] &= \phi_{sy} \end{aligned} \quad (4)$$

Pri čemu je $y[n]$ izmereni izlaz sistema na čijem je ulazu MLS sekvenca $s[n]$.

U ovom radu za dobijanje impulsnog odziva korišćen je softver pod nazivom *Dirac (Dual Input Room Acoustics Calculator)*. Dvokanalnim snimanjem, *Dirac* daje stereo signale, pa je bilo potrebno korišćenjem *Sound Forge 9.0* softvera izvršiti razdvajanje na mono signale. Nakon izmerenog impulsnog odziva, vrši se njegova integracija i dobija se tzv. Šrederova kriva opadanja. U okviru posebno napisanog Matlab koda, ova kriva služi za dobijanje vremena reverberacije.

Reljefni test uzorak, u vidu drvenih figura, koji je korišćen u toku merenja koeficijenta difuznosti refleksija prikazan je na Sl. 4. Figure su ravnomerno raspoređene po baznoj ploči koja rotira konstantnom brzinom. Konstantna ugaona brzina rotiranja postiže se korišćenjem namenski napravljenog motora vrlo složene građe, koji se nalazi na dnu reverberacione prostorije (Sl. 5.).

Dok se postolja okreće, za svaku kombinaciju pozicije izvora i prijemnika, multipl pseudoslučajne sekvence maksimalne dužine se neprekidno zrači sa izvora i registruje na prijemu. Ukupno trajanje jednog merenja treba da bude jednako vremenu punog okreta postolja, što u ovom slučaju iznosi 1 min.



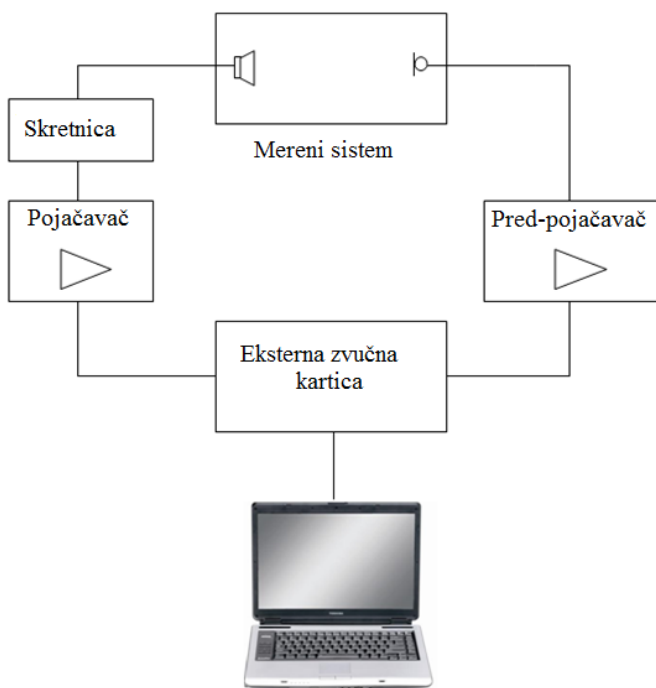
Sl. 4. Slika korišćenog test uzorka



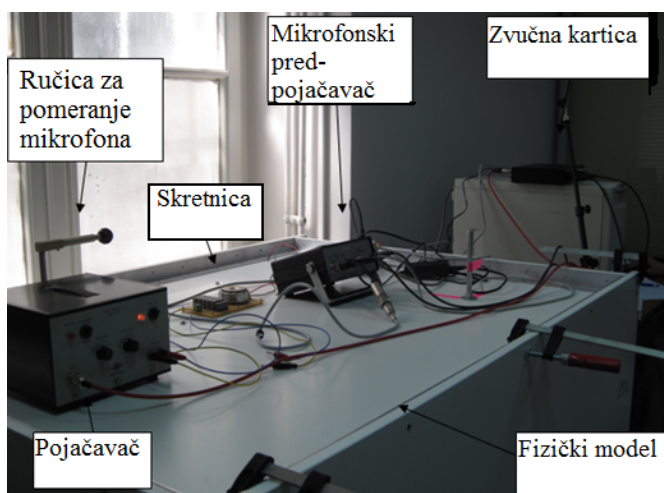
Sl. 5. Motor za ravnomernu rotaciju postolja

Za ispravan rad aparature korišćen je niz uređaja, a način na koji su međusobno povezani prikazan je blok šemom na Sl. 6. Tok kretanja signala je kružan, jer eksterna zvučna kartica koja je povezana sa računarom istovremeno generiše i prima MLS sekvence. Nakon generisanja, MLS sekvenca iz linijskog izlaza eksterne zvučne kartice ide do pojačavača, nakon koga sledi skretnica za dati zvučnik. Zatim se MLS sekvenca kroz zvučnik emituje u mereni sistem. Nakon refleksije od reljefnu površinu, data sekvenca stiže do mikrofona koji ima ulogu prijemnika. Odatle signal putuje do dvokanalnog mikrofonskog pred-pojačavača, nakon čega signal stiže na mikrofonski ulaz zvučne kartice. Prilikom merenja korišćena je eksterna zvučna kartica tipa *M-Audio ProFire 610*. Ovaj audio interfejs visoke rezolucije omogućava 6x10 simultanih analognih/digitalnih ulaza i izlaza, frekvenciju odabiranja 96 kHz, do 24 bita za digitalni audio, odnos signal/šum od -108 dB, itd.

Način povezivanja uređaja u realnom okruženju prikazan je na Sl. 7.



Sl. 6. Blok šema merne aparature



Sl.7. Način povezivanja uređaja u realnom okruženju

Cilj merenja ovim fizičkim modelom je dobijanje koeficijenta difuznosti refleksija pri proizvoljnoj incidenciji zvučnog talasa, bez osvrtnja na prostornu uniformnost difuzno reflektovane energije.

4. REZULTATI MERENJA

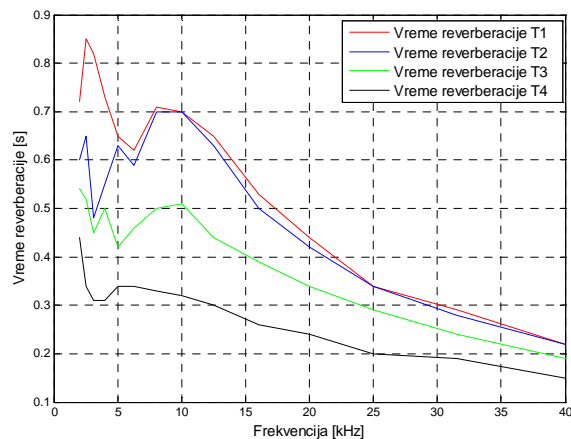
Pre početka merenja, potrebno je izmeriti koeficijent difuznosti refleksija same bazne ploče, kako bi se proverio kvalitet postavke, i to na sledeći način [3]:

$$s_{base} = 55,3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_3 T_3} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_3 - m_1) \quad (5)$$

Dimenzije napravljene reverberacione prostorije u kojoj se sprovodi merenje su 1,34x0,98x0,76, odnosno zapremina prostorije je približno 1 m³, što zadovoljava uslove ISO

17497-1 standarda. Prečnik bazne ploče je 70 cm, pa je samim tim površina područja test uzorka 0,38 m².

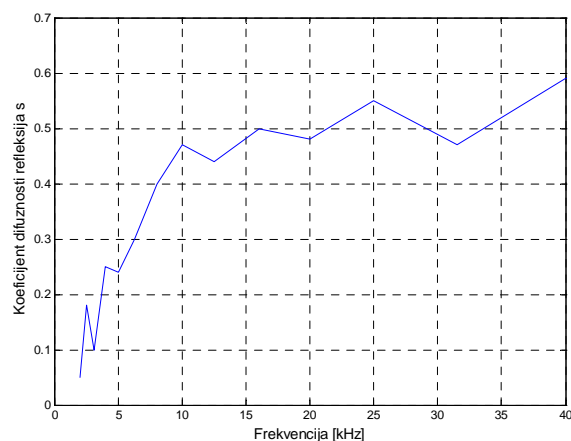
Koristeći Relacije (1), (2), (3), (5) i iste oznake kao u ISO standardu, dobijaju se rezultati za vreme reverberacije u zavisnosti od frekvencije, koji su prikazani na Sl. 8.



Sl. 8. Dobijeni rezultati merenja za vremena reverberacije

Vremena reverberacije za sva četiri slučaja dobijaju se usrednjavanjem po frekvencijama pojedinačnih vremena reverberacije.

Konačno za koeficijent difuznosti refleksija pri proizvoljnoj incidenciji zvučnog talasa, dobija se kriva prikazana na Sl. 9.



Sl. 9. Dobijeni rezultati merenja za koeficijent difuznosti refleksija

Koeficijent difuznosti refleksija po pravilu raste sa porastom frekvencije. U dobijenim rezultatima koeficijent s se kreće oko vrednosti 0,5 i beleži rast sa povećanjem frekvencije. Postoji nekoliko izuzetaka u tom porastu ali oni mogu biti posledica oblika korišćenog reljefa. Može se zaključiti da su dobijeni rezultati prihvatljivi jer ipak zadovoljavaju neke zakonitosti, a razlozi za dobijanje malobrojnih odstupanja mogu biti razni, te je sledeće poglavlje posvećeno diskusiji na tu temu.

5. DISKUSIJA: UTICAJ APARATURE NA TAČNOST REZULTATA MERENJA

Posmatrajući pojedinačna vremena reverberacije, uočen je mali pad na opsegu od 2 kHz do 4 kHz. Vreme reverberacije direktno utiče na tačnost merenja, te je stoga u ovom poglavlju analiziran uticaj aparature na tačnost dobijenih rezultata.

U cilju otkrivanja problema pojave pada vremena reverberacije na određenim frekvencijama, izvršena su tri različita merenja (Sl. 10.). U prvom merenju izmereno je vreme reverberacije u slučaju kada se koristi standardna bazna ploča koja ne rotira i na kojoj se ne nalazi uzorak. Smanjenje vremena reverberacije može prouzrokovati postojanje sopstvene rezonance između ploče i dna prostorije, jer sopstvena rezonanca crpi energiju zvučnog talasa. Zbog toga se u sledećem merenju koristila podebljana ploča koja smanjenjem rastojanja između postolja i dna treba da spreči ovu pojavu. Pad vremena reverberacije je opet registrovan. Daljim ispitivanjem aparature na tačnost merenja, pojavljuje se zazor između ploča kao još jedan mogući uzrok ovog problema. U sledećem merenju, pored delimičnog zaptivanja ploča, koriste se dodatne stege koje treba da spreče pojavu fuge. Fuga smanjuje apsorpciju, pa je zato štetna prilikom merenja. Rezultati su nakon ovog merenja bili bolji, ali i dalje nezadovoljavajući.



Sl. 10. Merenje sa standardnom baznom pločom (gore levo), sa podebljanom pločom (gore desno) i sa dodatnim zaptivanjem (dole)

Još jedan od razloga dobijanja ovakvih rezultata može biti i frekvencija koincidencije materijala od kojih su napravljeni zidovi fizičkog modela. S obzirom na to da ploče nisu apsolutno krute, pri kosoj incidenciji zvučnih talasa, na njima se javljaju tzv. fleksioni talasi, zbog kojih ploča prinudno osciluje. Brzina prostiranja fleksionih talasa zavisi od vrste i debljine materijala od kojeg su ploče izrađene. Pojava fleksionih talasa može u znatnoj meri smanjiti izolacionu moć zidova modela kad dođe do tzv. koincidencije. Ploče koje su korišćene za izradu ovog fizičkog modela predstavljaju neki oblik plastificirane iverice, a za takav materijal frekvencija koincidencije nalazi se između 2,1 kHz (drvo) i 3,4 kHz (gips), što donekle odgovara frekvencijskom opsegu pada vremena reverberacije.

Još jedan mogući faktor koji utiče na tačnost rezultata jeste broj i položaj difuzora koji se smeštaju u aparaturu. Ovaj i svi prethodno navedeni uticaji su još uvek u fazi ispitivanja.

6. ZAKLJUČAK

Sa metodom merenja koeficijenta difuznosti refleksija propisanom od strane ISO organizacije, poboljšava se predikcija ponašanja zvučnog talasa u prostorijama. U većini praktičnih slučajeva, prilikom korišćenja fizičkog modela prostorija, akustički dizajneri i dalje moraju da nagadaju većinu vrednosti, ali zato set uspešnih merenja na fizičkom modelu često može da posluži prilikom rada u realnim prostorijama. Prema definiciji, koeficijent difuznosti refleksija sadrži ograničene informacije o prostornoj raspodeli reflektovanog zvuka, jer zavisi samo od raspršene energije, a ne i od načina na koji se ta raspršena energija preraspoređuje. Zato je korišćenje mernih rezultata u tom slučaju beskorisno.

Koeficijent difuznosti refleksija predstavlja bitan faktor u akustičkom dizajnu prostorija, stoga je njegova tačnost veoma bitna. Vrlo često mali nedostaci aparature, mogu uticati na tačnost dobijenih rezultata. To dalje zahteva dublju analizu, a ponekad i izradu novog fizičkog modela.

Na samom kraju, treba napomenuti da opisani set merenja predstavlja prvo merenje koeficijenta difuznosti refleksija na ovaj način na nivou zemalja u okruženju. Usled toga dobijeni ne-idealni rezultati merenja u Laboratoriji za akustiku u Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, ne treba da zabrinjavaju, jer će se rad na ovu temu sigurno nastaviti u godinama koje dolaze.

LITERATURA

- [1] M. Vorlander, E. Mommertz, "Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients", *Applied Acoustics* 60 (2000) 187-199, 1999.
- [2] Prof. dr Miomir Mijić, tema "Refleksija zvuka", predavanja iz predmeta Elektroakustika, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd 2009.
- [3] ISO 17497-1: "Akustika-sketering osobine površina"- Prvi deo: "Merenje koeficijenta difuznosti refleksija pri proizvoljnoj incidenciji u reverberacionoj komori", 2004.
- [4] A. Farina, F. Righini, "Software implementation of an MLS analyzer, with tools for convolution, auralization and inverse filtering", 097-AES97.