

## MJERENJA AKUSTIČKIH SVOJSTAVA MATERIJALA

**Branko Somek,**

emeritus Akademije tehničkih znanosti Hrvatske,  
Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu,  
[branko.somek@fer.hr](mailto:branko.somek@fer.hr)

**Siniša Fajt,**

suradnik Akademije tehničkih znanosti Hrvatske,  
Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu,  
[sinisa.fajt@fer.hr](mailto:sinisa.fajt@fer.hr)

**Sažetak:** Razvoj mjerne opreme naročito je došao do izražaja u akustici i elektroakustici. Izrađeni su uređaji i razvijene su nove mjerne metode i postupci za mjerenje svojstava materijala koji se koriste za akustičku obradu različitih prostora. Uspoređivanjem rezultata dobivenih različitim načinima pokazalo se da može doći i do znatnih razlika u rezultatima. Stoga je načinjen niz mjerenja i uspoređivanja rezultata dobivenih klasičnim i novim mjernim metodama i postupcima.

### 1. Uvod

Apsorpcijski materijali imaju široku primjenu u akustičkoj obradi u građevinama, vozilima i brodovima gdje služe kao: materijali za smanjenje vremena odjeka i smanjenje neželjenih akustičkih pojava u prostorima namijenjenim za slušanje, -zaštitni materijali za smanjenje buke i vibracija motora u strojarnicama i materijali za smanjenje buke koja prolazi kroz pregradne zidove i smanjenje strukturne buke o čemu se mora naročito voditi računa pri konstrukciji broda radi postizanja dozvoljenih razina buke i vibracija.

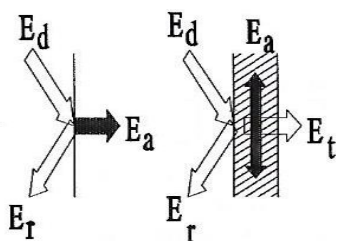
Akustička svojstva apsorpcijskih materijala određuju se različitim mjernim postupcima: metoda odječne komore, cijevna metoda (Kundtova cijev) i energetska metoda (mjerenjem zvučne energije TDS-om).

Svaka od tih metoda ima svojih prednosti i nedostataka u odnosu na jednostavnost mjerenja i točnost rezultata te primjenjivost u praksi.

### 2. Opis inovacije

Osnovni parametar apsorpcijskih materijala je koeficijent apsorpcije čijom definicijom je određena i filozofija mjerenja. Obično se definira apsorpcija kao razlika između energija izravnog i reflektiranog zvuka što ne odgovara stvarnim, fizikalnim odnosima. Fizikalni odnos energija je takav da se energija izravnog zvuka troši na reflektiranu energiju, prenesenu energiju i apsorbiranu energiju.

Takvom definicijom koeficijenta apsorpcije i dodatnim koeficijentom transmisije mogu se prikazati akustička svojstva materijala i primijeniti ih u višeslojnim kombinacijama s podlogom na koju se postavlja apsorpcijski materijal i drugim apsorpcionim materijalom s odgovarajućom frekventnom karakteristikom apsorpcije. Osim toga tako definiran parametar izravni je pokazatelj izolacijske sposobnosti materijala (npr. pregrade) i ujedno je time moguće mjeriti apsorpcijsku karakteristiku cjelokupne apsorpcijske konstrukcije.



Sl. 1 Energetski odnosi zvuka na granici dva materijala i kod pregrade:

$E_d$  – energija izravnog zvuka  
 $E_r$  – energija reflektiranog zvuka  
 $E_a$  – energija apsorbiranog zvuka  
 $E_t$  – energija prenesenog zvuka

$$E_d = E_a + E_r \quad (1)$$

$$1 = \frac{E_a}{E_d} + \frac{E_r}{E_d} \quad (2)$$

$$1 = \alpha + \left(\frac{P_r}{P_d}\right)^2 \quad (3)$$

$$1 = \alpha + r^2 \quad (4)$$

$$\alpha = 1 - r^2 \quad (5)$$

$$E_d = E_r + E_a + E_t \quad (6)$$

$$1 = \frac{E_r}{E_d} + \frac{E_a}{E_d} + \frac{E_t}{E_d} \quad (7)$$

$$1 = \left(\frac{P_r}{P_d}\right)^2 + \left(\frac{P_a}{P_d}\right)^2 + \left(\frac{P_t}{P_d}\right)^2 \quad (8)$$

$$1 = r^2 + \alpha + t^2 \quad (9)$$

$$\alpha = 1 - r^2 - t^2 \quad (10)$$

## 2.1 Mjerenje koeficijenta metodom odječne komore

Metoda odječne komore definirana je promjenom vremena odjeka odnosno apsorpcije nakon unošenja apsorpcijskog materijala. Ta metoda je zasnovana na definiciji apsorpcije kao razlike energija izravnog i reflektiranog zvuka. Izraz za koeficijent apsorpcije je izveden iz Sabineove formule za proračun vremena odjeka prostorije:

$$\alpha_x = 0,16 \cdot \frac{v}{s_x} \cdot \left( \frac{1}{T_x} - \frac{1}{T} \right) + \alpha \quad (11)$$

uz uvjete mjerenja i karakteristike komore dane ISO-preporukama. Količina apsorpcijskog materijala mora biti dovoljno velika kako bi velika bila i razlika T i  $T_x$ . Na rubovima ploča nastaje efekt difrakcije, što povećava apsorpciju i unosi pogrešku u mjerenju. Za porozne materijale pod komercijalnim nazivom LIP/S-5 i LIP-6 dani su podaci proizvođača mjereni metodom odječne komore.

f[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
LIP/S-5	0.29	0.55	0.92	1.10	1.10	1.05
LIP-6	0.31	0.55	0.98	1.04	1.10	0.94

## 2.1 Mjerenje koeficijenta apsorpcije cijevnom metodom

Mjerenje koeficijenta apsorpcije cijevnom metodom pomoću Kundtove cijevi zasniva se također na definiciji apsorpcije kao razlike energija izravnog i reflektiranog zvuka. Mjerenjem vrijednosti maksimuma i minimuma zvučnih tlakova stojnih valova u cijevi ustanovljuje se vrijednost koeficijenta apsorpcije prema posebno baždarenoj skali cijevnog voltmetra. Frekvencijsko područje mjerenja određeno je dimenzijama (duljinom i promjerom) cijevi. Zato su korištene dvije izmjenljive cijevi svaka za svoje frekventno područje:

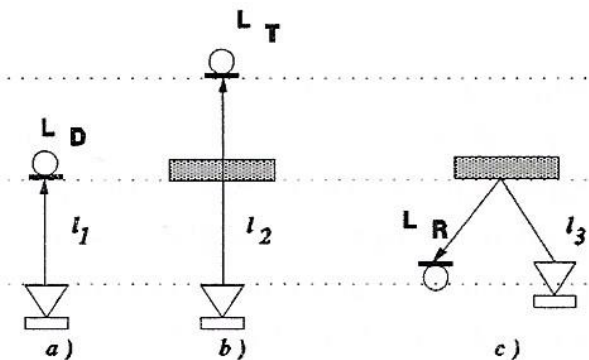
- velika cijev:  $l = 1 \text{ m}$ ,  $2r = 98 \text{ mm}$ ,  $f = 100 \text{ Hz}$  do  $1.8 \text{ kHz}$  i
- mala cijev:  $l = 30 \text{ cm}$ ,  $2r = 28 \text{ mm}$ ,  $f = 800 \text{ Hz}$  do  $6.5 \text{ kHz}$

f[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
LIP/S-5	0.10	0.15	0.38	0.67	0.90	0.89
LIP-6	0.10	0.16	0.42	0.76	0.96	0.94

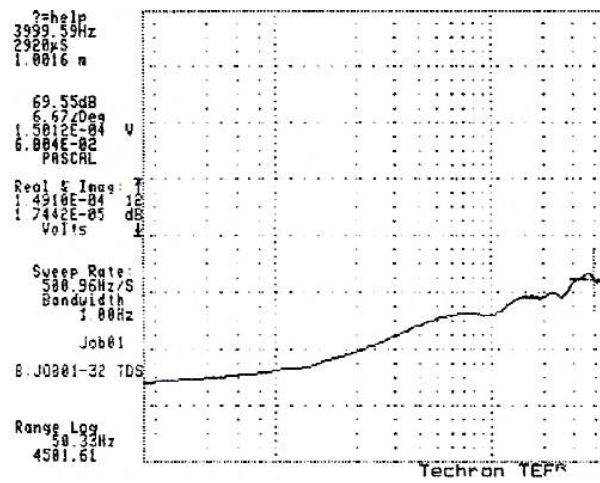
Odstupanja rezultata kod mjerenja različitih uzoraka istog materijala kreću se unutar granica  $\pm 10 \%$  ali su moguća i ekstremna odstupanja od  $18 \%$  do kojih dolazi uglavnom na frekvencijama  $800 \text{ Hz}$  i  $1 \text{ kHz}$  koje su granične frekvencije pojedinih cijevi.

## 2.2. Mjerenje koeficijenta apsorpcije energetsom metodom

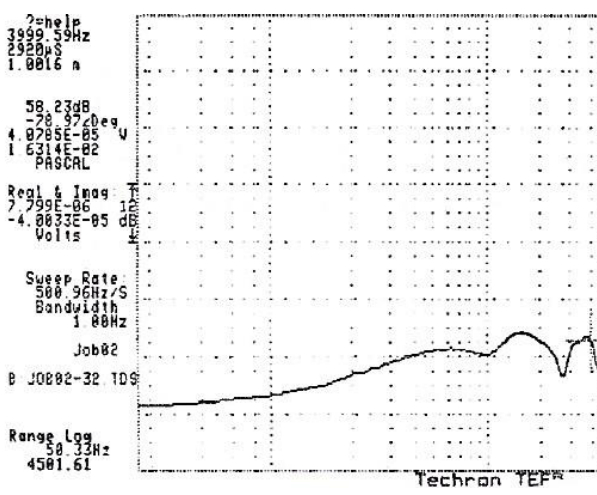
Mjerenje koeficijenta apsorpcije energetsom metodom osniva se na stvarnim fizikalnim odnosima energija izravnog, prenesenog, apsorbiranog i reflektiranog zvuka. Mjerenje zvučne energije uz korištenje spektrometrije s vremenskim pomakom (TDS) moguće je mjeriti frekvencijske karakteristike s točnim vremenskim odnosno prostornim lociranjem izravnog, prenesenog i odbijenog zvuka. Proračunom se tada utvrđuje apsorbirana energija odnosno koeficijent apsorpcije. Na sl. 2 prikazana je postavka mjerenja. Udaljenost  $l_1 = 0.5 \text{ m}$  i udaljenosti  $l_2 = l_3 = 1 \text{ m}$ . Na sl. 3. prikazana je frekvencijska karakteristika energije direktnog zvuka  $L_D$ . Na sl. 4 je prikazana frekvencijska karakteristika energije prenesenog zvuka  $L_T(\text{LIP/S-5})$ . Na sl. 5 je prikazana frekvencijska karakteristika energije prenesenog zvuka  $L_T(\text{LIP-6})$ . Na sl. 6 je prikazana frekvencijska karakteristika energije reflektiranog zvuka  $L_R(\text{LIP/S-5})$ . Na sl. 7 je prikazana frekvencijska karakteristika energije reflektiranog zvuka  $L_R(\text{LIP-6})$ .



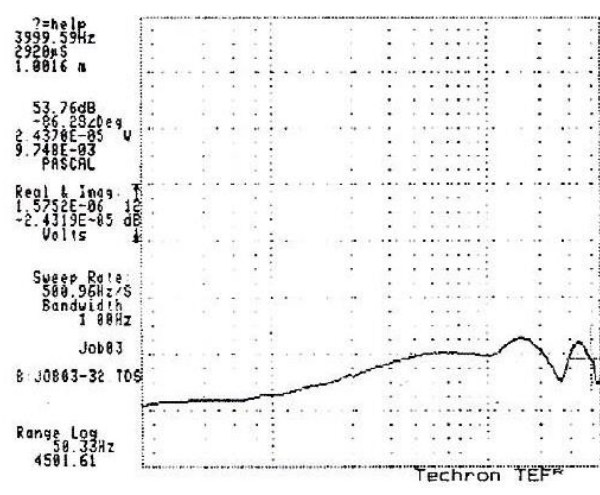
Sl. 2 Postavka mjerenja koeficijenta apsorpcije energijsko metodom



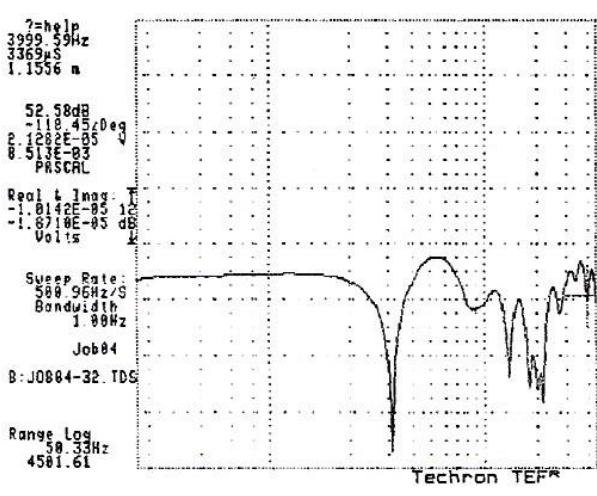
Sl. 3 Frekvencijska karakteristika energije direktnog zvuka  $L_D$



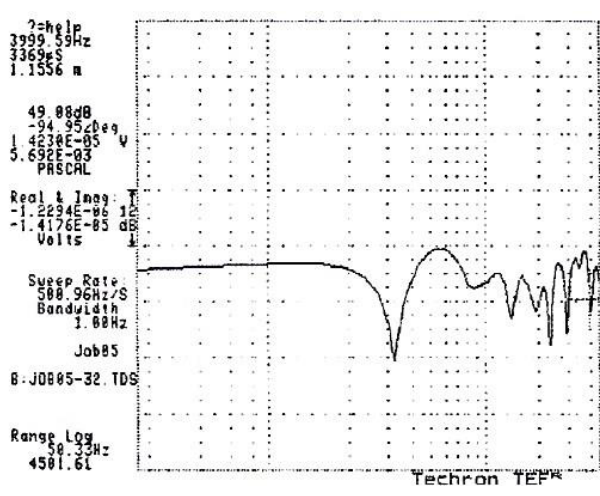
Sl. 4 Frekvencijska karakteristika energije prenesenog zvuka  $L_T(LIP/S-5)$



Sl. 5 Frekvencijska karakteristika energije prenesenog zvuka  $L_T(LIP-6)$



Sl. 6 Frekvencijska karakteristika energije reflektiranog zvuka  $L_R(LIP/S-5)$



Sl. 7 Frekvencijska karakteristika energije reflektiranog zvuka  $L_R(LIP-6)$

Na osnovu izmjerenih frekvencijskih karakteristika energija izravnog, reflektiranog i prenesenog zvuka može se konstruirati frekvencijska karakteristika apsorbirane energije i to prema obim definicijama apsorbirane energije s razlučivošću koja je neovisna o broju mjerenja.

### **3. Zaključak**

Mjerenje koeficijenta apsorpcije metodom odječne komore uz pogreške zbog efekta difrakcije ima nedostatak što se moraju osigurati uvjeti mjerenja i karakteristike komore propisani ISO preporukama. Mjerenje koeficijenta apsorpcije cijevnom metodom uz greške koje se javljaju na graničnim frekvencijama cijevi ima nedostatak što je mjerenje ograničeno na mjerenje uzoraka malih dimenzija, promjerom cijevi, što ne daje stvarnu sliku apsorpcijske konstrukcije. Predložena energetska metoda mjerenja koeficijenta apsorpcije uz korištenje spektrometrije s vremenskim pomakom omogućuje mjerenje apsorpcije apsorpcijskih konstrukcija u laboratorijskim uvjetima i u stvarnim uvjetima primjene, te je višestruko provjerena i koristi se za istraživanja kao i za mjerenja za korisnike iz privrede. Prednost te metode nad ostalim je u tome, što može dati frekvencijsku karakteristiku stvarnog koeficijenta apsorpcije uzimajući u obzir prenesenu energiju, koja je primjenjiva u višeslojnim kombinacijama i ujedno daje informaciju o izolacijskoj sposobnosti materijala. Nedostatak energetske metode je vrlo visok stupanj slobode podešavanja parametara mjerenja koji bitno utječu na točnost rezultata. Usporedbom rezultata mjerenja navedenih metoda utvrđeno je da se odstupanja kreću unutar  $\pm 10\%$ . Nakon akustičke obrade određenog prostora potrebno je provesti kontrolna mjerenja, odnosno utvrditi utjecaj ukupne mase apsorpcionog materijala i načina učvršćenja na ukupnu apsorpciju zvuka tj. vrijeme odjeka što omogućuje jednostavna primjena predložene energetske metode.

### **Literatura:**

- [1] T. Jelaković: Zvuk, sluh, arhitektonska akustika, Zagreb, Školska knjiga, 1978.
- [2] Brüel & Kjær, Technical Review, No. 3, 1978.
- [3] Brüel & Kjær, Acoustic Noise Measurements, 1969.
- [4] Techron, Operator's Manual Tef System 12 Plus Analyzer, Elkhart, 1988.