

O zavisnosti izolacione moći od upadnog ugla zvučnog talasa

Husnija Kurtović

Sadržaj — Zavisnost koeficijenta transmisije τ od upadnog ugla zvučnog talasa θ nije dovoljnoobrađivana u stručnoj literaturi sve do početka ovog veka. Pretpostavljalo se da se u svim slučajevima koji se javljaju u praksi može smatrati da u prostorijama postoji difuzno i homogeno zvučno polje na osnovu čega je izveden klasičan obrazac za pomenutu zavisnost iz koga se, na primer, dobija da je za ugao $\theta = 45^\circ$ τ dva puta veće od τ_0 pri normalnoj incidenciji, ali i to da je za $\theta = 90^\circ$ $\tau = 1$, dakle da se umesto pregrade nalazi otvoren prozor. Posledica toga je bila da su se integralom za sve uglove θ dobijale suviše male vrednosti izolacione moći dok je merenjima ustanovljeno da je ova razlika oko 5 dB. U ovom radu se to objašnjava i ukazuje se na današnje tendencije i na mogućnost nalaženja preciznije zavisnosti $\tau(\theta)$.

Ključne reči — difuzno i homogeno zvučno polje, izolaciona moć, upadni ugao zvučnog talasa

I. UVOD

Zugla upotrebljava se formula koja je pomenuta u Sadržaju i o kojoj će biti reči u narednom poglavlju. Poznavanje ove zavisnosti potrebno je pre svega za pregrade prema okolini (na primer, prozori) za slučaj kad buka dolazi samo iz jednog pravca ili iz jedne ravni. Za prostorije unutar zgrade smatra se da je zvučno polje homogeno i difuzno i onda se $\tau(\theta)$ usrednjava za sve uglove od 0 do 90° . Nažalost praksa pokazuje da se tako dobijaju suviše male vrednosti izolacione moći u odnosu na merene vrednosti, što je očigledno posledica suviše velikih vrednosti τ za velike upadne uglove (u Sadržaju je pomenut apsurd za $\theta = 90^\circ$). To je dosta davno uočio Beranek [3] i predložio je da se usrednjavanje vrši samo do $\theta = 78^\circ$, smatrajući da su veći uglovi vrlo malo verovatni. On je tu bio donekle u pravu osim u slučaju kad su izvor i pregrada u istoj ravni, što se javlja, na primer, kod zajedničkog plafona dveju susednih prostorija ili kod nekih pregrada (najčešće krovnih) kad su izvori buke napolju. U ostalim slučajevima refleksije koje stižu do pregrade pod velikim upadnim uglom obično su se već višestruko reflektovale i zaista nemaju mnogo značaja. Usrednjavajući tako τ od 0 do $\theta = 78^\circ$, dobija se približno odstupanje, potvrđeno u praksi, tj. da je prosečna izolaciona moć u difuznom polju za 5 dB manja od one pri

Ovaj rad je u jednom svom delu napisan na osnovu aktivnosti realizovanih u okviru projekta 23046 Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj republike Srbije.

H.Kurtović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Srbija (e-mail: hkurtovic@etf.rs).

normalnoj incidenciji. Danas postoje i drugi predlozi [5] koji se sastoje u tome da se odbaci pretpostavka da je energija koja dolazi iz svakog prostornog ugla jednaka, što bi značilo da u prostorijama ne postoji apsolutno difuzno i homogeno zvučno polje. I o ovome će biti reči, ali je sigurno da i polazna formula (1), bar za velike vrednosti θ , nije dovoljno tačna (jer ona pretpostavlja da se klizni talasi uz površinu pregrade sasvim slobodno prostiru).

II. ZAVISNOST KOEFICIJENTA TRANSMISIJE OD UPADNOG UGLA

Opšte je poznat obrazac, pomenut u Sadržaju, po kome se izračunava koeficijent transmisije jedne masivne pregrade površinske mase m_s (a iz njega i izolaciona moć) u zavisnosti od ugla incidencije θ i on glasi [1]:

$$\tau_\theta = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega m_s \cos \theta}{2 \rho c} \right)^2} \quad (1)$$

(ρ je gustina vazduha, a c brzina zvuka). Pretpostavka je ovde da se radi o homogenoj pregradi u oblasti gde važi tzv. zakon mase, tj. u oblasti gde je normalna impedanca pregrade

$$\underline{Z}_n = j\omega m_s + \rho c / \cos \theta \quad (2)$$

Međutim i u drugim frekvencijskim oblastima, na primer u oblasti iznad frekvencije ko incidencije, dobija se isti oblik obrasca, samo reaktancu ωm_s u obrascu (1) treba zameniti reaktancom za fleksione talase koja glasi [2,3]:

$$X = \omega m_s - \frac{B' \omega^3}{c^4} \sin^4 \theta$$

gde je B' fleksiona krutost [2].

Zajedničko za sve frekvencijske oblasti je to da se zanemaruju gubici snage u samom materijalu koji u pregradi iznose po jedinici površine [4] $P_v^n = \omega m_s \eta v^2$, gde je v brzina vibracija, a η faktor gubitaka. To znači da se u rednoj vezi komponentata, datih obrascem (2), pored otpornosti zračenja $\rho c / \cos \theta$ pojavljuje još jedna otpornost, $\omega m_s \eta$, i da je sada τ_θ , izračunato na klasičan način [1]:

$$\tau_\theta = \frac{1}{\left(1 + \frac{\omega m_s \eta \cos \theta}{2 \rho c} \right)^2 + \left(\frac{\omega m_s \cos \theta}{2 \rho c} \right)^2} \quad (3)$$

Kad se radi o krutim pregradama, η je reda veličine 0,01, pa se može ostati pri obrascu (1), jer će prvi član

imenitelja u (3) ostati znatno manji od drugog člana i τ_θ će biti vrlo približno jedan za $\theta = 90^\circ$. Ali uticaj η u (3) ujedno znači da se sve u ovom radu ne odnosi ni u kom slučaju na porozne i druge apsorbujuće pregrade.

Polazna formula (1) može se izvesti i po opštem obrascu da je snaga koju po jedinici površine apsorbuje pregrada (i ujedno snaga koja kroz pregradu prolazi na drugu stranu jer je ovde praktično $\alpha = \tau$) jednaka:

$$J_\tau = p_{\max}^2 \operatorname{Re} \left[\frac{1}{Z_n} \right] \quad (4)$$

gde je p_{\max} pritisak na površini pregrade čije se τ analizira. Njegov iznos zavisi od faktora refleksije koji je:

$$r = \frac{Z_n - \rho c / \cos \theta}{Z_n + \rho c / \cos \theta} = \beta e^{j\delta} \quad (5)$$

a ravan je:

$$p_{\max} = p(1 + \beta),$$

gde je p zvučni pritisak dolazećeg talasa koji pogađa jedinicu površine pod uglom θ . Ako se u ovaj obrazac uvrsti β nađeno preko (5) uz korišćenje (2), dobija se iz (4) da je intenzitet zvuka koji je prošao kroz pregradu:

$$J_{\tau\theta} = \frac{p^2 \cos \theta}{\rho c} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega m_s \cos \theta}{2 \rho c} \right)^2}.$$

Prvi razlomak je upravo raspoloživa snaga po jedinici površine (J_u), a to znači da je drugi razlomak τ_θ .

Ovaj način nalaženja τ_θ može se iskoristiti i za slučaj kad je $\theta = 90^\circ$. Tada na površini pregrade umesto p_{\max} vlada pritisak kliznog talasa p . Ovo je izvedeno u literaturi [1,2] i važi za pregrade kod kojih je $|Z_n| \gg \rho c$. Dobija se da je:

$$\tau_{90} = \tau_0 / 4 \quad (6)$$

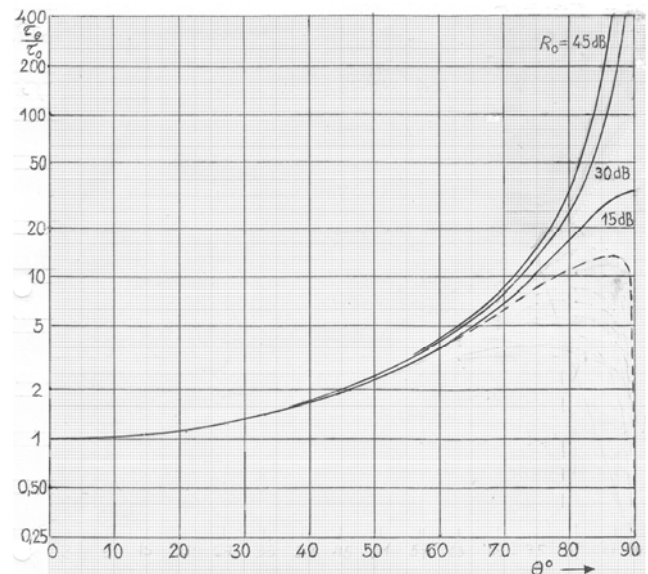
U teorijskoj analizi prenošenja buke kroz zidove kanala ventilacionih sistema rezultat (6) se uveliko koristi, a nije jasno zašto se ne pominje u prostornoj akustici.

Na slici 1 ucrtan je tok zavisnosti τ_θ / τ_0 prema obrascu (1) za neke vrednosti izolacione moći pregrade

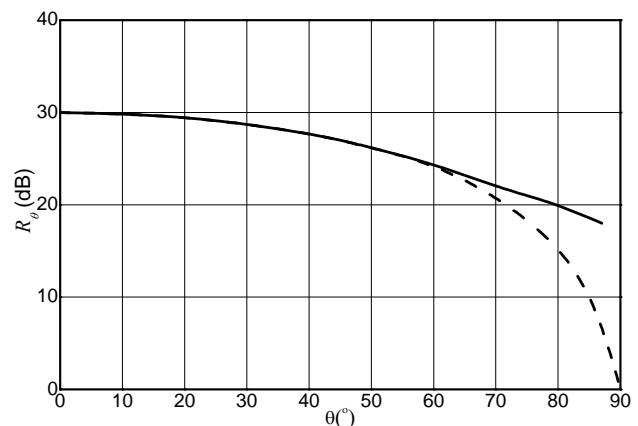
$$R_0 = 10 \lg(1/\tau_0).$$

Sve krive na slici 1 završavaju se na 90° u tački gde je τ_{90} onoliko puta veće od τ_0 koliko je potrebno da bude $\tau_{90} = 1$, a u stvari bi trebalo da se zbog (6) završavaju u desnom donjem uglu dijagrama na slici 1. Na slici 2 data je crticama u zavisnosti od θ izolaciona moć pregrade koja ima $R_0 = 30$ dB, izračunata prema obrascu (1). Ona za $\theta = 90^\circ$ ima $R = 0$ dB. Iz rada [6] (iz koga se uzgred vidi i aktuelnost celog problema), gde je na slici 3 pod (a) prikazana izmerena zavisnost $R(\theta)$ za materijal koji na 500 Hz u difuznom polju ima $R = 30$ dB, vidi se da drastičan pad izolacione moći prema $\theta = 90^\circ$ ne postoji. Na istoj slici se vidi pod (b) da teorijski dijagrami imaju još jedan nedostatak: ne uzimaju u obzir uticaj koincidencije. On se ne vidi pod (a) zato što je frekvencija 500 Hz očigledno niža od frekvencije koincidencije (f_c) koja je za difuzno polje definisan za $\theta = 90^\circ$, a za sve

frekvencije niže od f_c nema ugla pri kojem dolazi do ove pojave. Frekvencija 1600 Hz (pod b na slici 3, kad je i R veće) očigledno je iznad f_c .



Sl. 1. Zavisnost τ_θ / τ_0 prema obr. (1). Crticama je data moguća zavisnost τ_θ / τ_0 (vidi IV)



Sl. 2. Izolaciona moć izračunata prema aproksimaciji na sl. 1. (Crticama je dato R_θ za $R_0 = 30$ dB).

III. USREDNJAVANJE KOEFICIJENTA TRANSMISIJE

Iznose τ_θ koji bi se očitivali sa slici 1 treba pomnožiti sa $\sin(2\theta)$ i integraliti od 0 do θ_{\lim} [1,2] (po statističkoj teoriji: do 90°) i tako dobiti tzv. statistički koeficijent transmisije τ u homogenom i difuznom zvučnom polju iz koga se nalazi izolaciona moć R koja reprezentuje (posebno za pojedine frekvencije) neku pregradu. Ako se to uradi za τ na slici 1 dobiće se vrednosti u drugom redu Tabele 1

Ako se integraljenje vrši prema Beranekovom predlogu [3] do $\theta_{\lim} = 78^\circ$, onda je formula nešto drukčija i glasi:

$$\tau = \frac{\int_0^{78} \tau_\theta \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{78} \sin \theta \cos \theta d\theta} \quad (7)$$

Pomoću nje se dobijaju vrednosti u trećem redu Tabele 1, a to je τ , odn. R koje se približno dobija i merenjem.

Tabela 1

R_0	15 dB	20 dB	30 dB	45 dB
R (za $\theta_{lim} = 90^\circ$)	$R_0 - 5,6\text{dB}$	$R_0 - 6,8\text{dB}$	$R_0 - 8,6\text{dB}$	$R_0 - 9,2\text{dB}$
R (za $\theta_{lim} = 78^\circ$)	$R_0 - 4,5\text{dB}$	$R_0 - 4,9\text{dB}$	$R_0 - 5,0\text{dB}$	$R_0 - 5,1\text{dB}$

Bez obzira na θ_{lim} , formula tipa (7) pretpostavlja da je snaga koja iz difuznog i homogenog zvučnog polja dolazi do pregrada jednaka po jedinici prostornog ugla za bilo koje θ . Neka novija istraživanja [5,6] osporavaju to i na osnovu svojih merenja pokazuju da raspodela upadne snage zavisi od ugla θ , pa čak i od položaja izvora u prostoriji, bez obzira na difuznost prostorije (što ima logike). To se svodi na to da faktor usrednjavanja $\sin(2\theta)$ od koga potiče obr. (7) treba pomnožiti jednom ponderacionim faktorom koji pokazuje da je upadna snaga po jedinici prostornog ugla sa povećanjem ugla θ sve manja. Srednja vrednost tog ponderacionog faktora za razne položaje izvora je približno neka Gausova raspodela $G(\theta)$ koja, aproksimirana polinomom, [5] glasi (za θ u radianima):

$$G(\theta) = 0,98089 + 0,10095\theta - 0,80939\theta^2 + 0,22932\theta^3 \quad (8)$$

Formula (7) sada postaje:

$$\tau = \frac{\int_0^{90} G(\theta)\tau_\theta \sin\theta \cos\theta d\theta}{\int_0^{90} \sin\theta \cos\theta d\theta} \quad (9)$$

Ali i u ovom slučaju ima nezgoda. Prva je već u tome što se ponderacioni faktor (Gausova raspodela) u pomenuta dva rada [5] i [6] donekle razlikuje. Druga, značajnija, je u tome što se primenom obr. (9) i zavisnosti τ po obrascu (1) dobija, na primer, za $R_0 = 30$ dB da je

$$R = R_0 - 2,8 \text{ dB},$$

a ne

$$R_0 - 5 \text{ dB},$$

kako navodno merenja potvrđuju [3]. Slično se dobija i za druge vrednosti R_0 . S druge strane, negde se i u mnogo starijoj literaturi [7] navodi bez objašnjenja da je u difuznom polju izolaciona moć pregrada za 3 dB manja nego pri normalnoj incidenciji. Najzad, dobro je što obr.(8) prihvata postojanje pravaca talasa i sa velikim θ , ali je pitanje da li je difuznost polja baš toliko degradirana da je snaga po jedinici prostornog ugla već na 45° opala na polovinu, što daje (8).

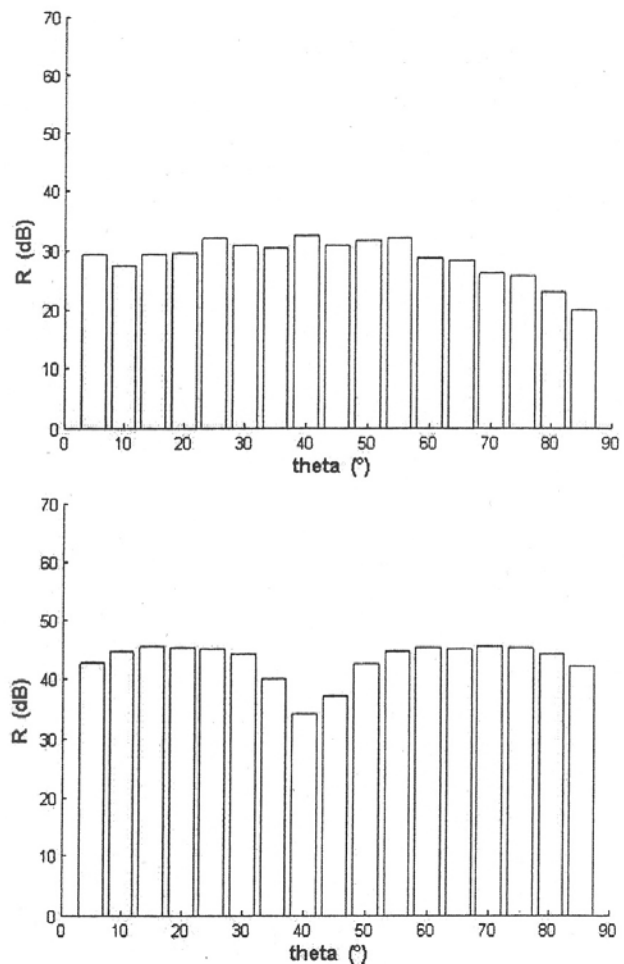
IV. MOGUĆA REALNA ZAVISNOST τ_θ

Iz svega napred izloženog očigledno je da nerealna odstupanja izolacione moći R (za difuzno polje) od R_0 (drugi red Tabele 1) potiču od suviše velikog porasta τ za velike uglove incidencije. Razlozi za to postoje, ali njih ne uzima u obzir teorija kojom se dolazi do obr.(1). Napravljen je pokušaj da se usvoji $\tau_{90} = \tau_0 / 4$ i da se smanji τ u oblasti većih uglova incidencije kako bi se postiglo da usrednjavanjem bude približno $R = R_0 - 5$ dB. Pritom bi obrazac za usrednjavanje ostao onaj koji važi za homogeno i difuzno zvučno polje (koji inače obuhvata i

verovatnoću prostornog ugla i od njega zavisnu raspodelu zvučnu snagu) koji glasi:

$$\tau = \int_0^{90} \tau_\theta \sin(2\theta) d\theta$$

Zavisnost τ_θ u oblasti od 0 do 45° neće se dirati jer u udžbeničkoj literaturi čiji su autori poznati akustičari stoji kao primer da je na 45° izolaciona moć $R_{45} = R_0 - 3$ dB, što valjda nešto znači. Dalje, prema većim uglovima θ , tok krive je prilagođen prethodno iznetom zahtevu $R = R_0 - 5$ dB, ali nije uzeto u obzir, što sigurno stoji, da zvučna snaga po jedinici prostornog ugla za veliko θ sigurno u izvesnoj meri (ali u kolikoj?) opada. Takva moguća kriva zavisnosti τ_θ/τ_0 data je crticama na sl. 1 sa pretpostavkom da bi ona mogla da važi za sve vrednosti R_0 . Prema ovoj krivoj ucrtana je na sl. 2 je punom linijom izolaciona moć R_θ za $R_0 = 30$ dB i ona se bolje slaže sa sl.3. Izostavljen je krajnje nesiguran deo za najviše uglove θ , kao što je to učinjeno i na sl. 3a.

Sl. 3. Rezultati merenja R_θ iz lit. [6] za 500 Hz i 1600 Hz

V. ZAKLJUČAK

Iz svega izloženog vidi se da problem proračuna, a pritom i merenja R_θ , nije još definitivno rešen. Pokazalo se da R_θ zavisi i od veličine R (za difuzno polje), što je za svaki proračun polazni podatak, ali da ne zavisi u tolikoj meri da se ne bi mogao koristiti jedinstveni tok zavisnosti, kao što je na primer onaj na slici 2 (puna linija). On bi posebno bio značajan za tzv. merodavnu (jednobrajnu)

izolacionu moć, da se iz R_w nađe $R_{w\theta}$, uz napomenu da se uz takav ili neki drugi utvrđeni tok zavisnosti od θ , mora posebno voditi računa o frekvenciji koincidencije.

LITERATURA

- [1] H. Kurtović: "Osnovi tehnike akustike", Naučna knjiga, Beograd, 1989
- [2] L. Cremer: "Vorlesungen ueber Technische Akustik", Springer-Verlag, Berlin, 1975.
- [3] L. Beranek: "Noise reduction", McGraw Hill Book Company, 1960.
- [4] M. Heckl, H.A. Mueller: "Taschenbuch der Technischen Akustik", Springer-Verlag, Berlin 1975.
- [5] H.-J. Kang, J.-G. Ih, H.-S. Kim, J.-S. Kim: "An experimental investigation on the directional distribution of incident energy for the prediction of sound transmission loss", Applied Acoustics 63, 2002
- [6] C. Brutel-Vuilmet, C. Guigou-Carter, M. Villot: "A Study of the Influence of Incidence Angle on Sound Reduction Index Using NAH-Phonoscropy", Acta Acustica united with Acustica, Vol. 93, 2007
- [7] W. Fasold, E. Sonntag: "Bauakustik", Verlagsgesellschaft Rudolf Mueller, 1971

ABSTRACT

The dependence of the sound transmission coefficient τ on the incidence angle θ of a sound wave was not sufficiently investigated before the present century. The previous theoretical studies were based on the assumption of the existence of a homogenous and diffuse sound field in a closed space what led to a formula which gives for $\theta = 45^\circ$ a τ which is double τ_0 (for normal incidence), but also a $\tau = 1$ for $\theta = 90^\circ$, meaning an open window instead of a panel. The consequence is that an angle averaged transmission loss becomes lower than the measurement results show, which is about 5 dB. This paper gives the necessary explanations, presents the temporary tendencies and indicates the possibilities to find a more precise $\tau(\theta)$.

ABOUT THE DEPENDENCE OF THE TRANSMISSION LOSS ON THE INCIDENCE ANGLE OF THE SOUND WAVE

Husnija Kurtović