

mag. Mihael Ramšak, univ. dipl. inž. grad.
mihael.ramsak@zag.si
Zavod za gradbeništvo Slovenije,
Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana



Strokovni članek
UDK 534.836:656.11(497.4)

VPLIV KOINCIDENČNEGA EFEKTA NA ZVOČNO IZOLATIVNOST PREGRAD

INFLUENCE OF COINCIDENT EFFECT ON THE SOUND INSULATION PERFORMANCE OF BARRIERS

Povzetek

Če je hitrost zvočnega valovanja, vpadlega na pregrado, enaka hitrosti povzročenega upogibnega valovanja v pregradi, govorimo o koincidenčnem efektu. Pri frekvencah zvoka, kjer nastopi koincidenca, se zvočna izolativnost pregrade zmanjša, in sicer najbolj pri najnižji koincidenčni frekvenci, kjer potuje zvok v smeri vzporedno s pregrado. Za doseganje boljše zvočne izolativnosti pregrade je zato treba pri izbiri materiala in debeline pregrade zagotoviti, da je kritična frekvenca pregrade izven merodajnega frekvenčnega območja. Pri masivnejših pregradah je to pod merodajnim frekvenčnim območjem, pri lažjih pregradah pa nad merodajnim frekvenčnim območjem. Če se legi kritične frekvence na merodajnem frekvenčnem območju ni mogoče izogniti, je treba za zmanjšanje resonančnega odziva pri koincidenци povečati notranje dušenje v pregradi, kar pa je učinkovito le pri lažjih in manj togih pregradah.

Ključne besede: zvočni valovi, upogibni valovi, koincidenčni efekt, kritična frekvenca, zvočna izolirnost

Summary

If the speed of the sound wave incident on the barrier is equal to the speed of the induced bending wave in the barrier, this is called a coincidence effect. At the frequencies of sound where coincidence occurs, the sound insulation of the barrier is reduced, most notably at the lowest coincidence frequency, where the sound propagates parallel to the barrier. In order to achieve better sound insulation of the barrier, it is therefore necessary to ensure that the critical frequency of the barrier is outside the relevant frequency range. This can be achieved by choosing an appropriate material and the thickness of the barrier. For more massive barriers, this is below the relevant frequency range, and for lighter barriers, above the relevant frequency range. If the position of the critical frequency in the relevant frequency range cannot be avoided, the internal damping of the barrier must be increased in order to reduce the resonant response at the coincidence, which is effective only for lighter and less rigid barriers.

Key words: sound waves, bending waves, coincidence effect, critical frequency, sound reduction index

1 UVOD

Koincidenca na pregrado vpadlega zvočnega valovanja in v pregradi povzročena upogibna valovanja lahko bistveno vpliva na zvočno izolativnost pregrade. Namen prispevka je na kratko opisati pojav koincidence ter s pomočjo nekaj značilnih primerov predstaviti, kako koincidenca vpliva na zvočno izolativnost pregrade. Navedenih je tudi nekaj osnovnih usmeritev, kako se izogniti njenemu vplivu na poslabšanje zvočne izolativnosti.

2 ZVOČNA IZOLIRNOST

Eden od tradicionalnih kazalnikov za opis izolativnosti pregrad pred zvokom v zraku (sten, stropov, oken, vrat ipd.), ki se pogosto uporablja v državah Evropske unije, je izolirnost pred zvokom v zraku R , določena v posameznih frekvenčnih pasovih v frekvenčnem območju med 100 Hz in 3150 Hz. Definirana je z enačbo:

$$R = 10 \cdot \log \frac{P_{\text{inc}}}{P_{\text{trans}}} \quad (\text{dB}), \quad (1)$$

kjer je:

- P_{inc} – na pregrado vpadla zvočna moč (W),
- P_{trans} – zvočna moč, prenešena skozi pregrado (W).

Mogoče je pokazati [Hopkins, 2014], da se izolirnost pred zvokom v zraku iz enačbe (1) lahko izrazi z merljivimi vrednostmi ravni zvočnega tlaka:

$$R = L_s - L_r + 10 \cdot \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (\text{dB}), \quad (2)$$

kjer je:

- L_s – povprečna raven zvočnega tlaka v odmevnem zvočnem polju prostora z zvočnim virom (dB),
- L_r – povprečna raven zvočnega tlaka v odmevnem zvočnem polju sprejemnega prostora (dB),
- S – površina ločilne konstrukcije med sosednjima prostora (m²),
- A – ekvivalentna absorpcijska površina sprejemnega prostora (m²).

Ekvivalentna absorpcijska površina A sprejemnega prostora se določi z enačbo:

$$A = \frac{0,163 \cdot V}{T} \quad (\text{m}^2), \quad (3)$$

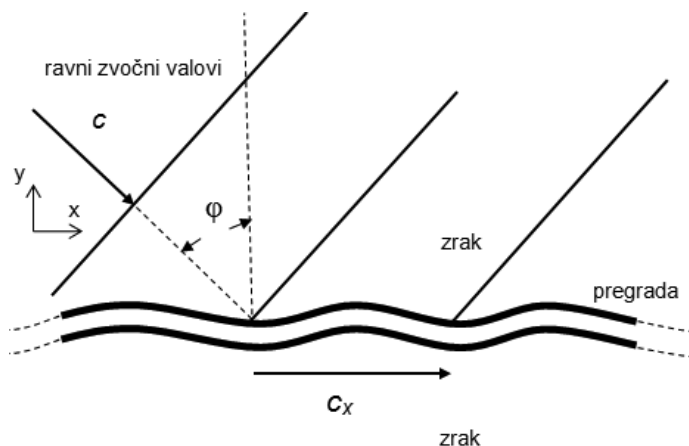
kjer je:

- V – prostornina sprejemnega prostora (m³),
- T – odmevni čas v sprejemnem prostoru (v opremljenem prostoru $T_0 \approx 0,5$ s).

Odmevni čas v prostoru je po definiciji čas, ki je potreben, da raven zvočnega tlaka v prostoru po izključitvi zvočnika s šumom pade za 60 dB.

3 KOINCIDENČNI EFEKT IN KRITIČNA FREKVENCA

Pri vpadu ravnih zvočnih valov na neskončno veliko pregrado nastane na površini pregrade sled zvočnih valov, ki se širi po pregradi s hitrostjo $c_x = c / \sin \varphi$ (slika 1), pri čemer je c hitrost zvočnih valov v zraku.



Slika 1. Poševni vpad zvoka na pregrado vzbudi v pregradi upogibne valove.

Sled zvočnega valovanja vzbudi v pregradi upogibne valove. Če je pregrada homogena in tanka, se v njej vzbudijo čisti upogibni valovi, kjer lahko vpliv strižnih deformacij in rotacijske vztrajnosti prereзов pregrade zanemarimo. Hitrost upogibnih valov je v tem primeru ([Cremer, 1988], [Hopkins, 2014]):

$$c_b = \sqrt[4]{\frac{B}{m}} \cdot \sqrt{2\pi \cdot f} \quad (\text{m/s}), \quad (4)$$

kjer je:

- B – upogibna togost na enoto širine pregrade (Nm),
- m – masa na enoto površine pregrade (kg/m²),
- f – frekvenca (Hz).

Enačba (4) pokaže, da je hitrost upogibnih valov odvisna tudi od frekvence, torej da je pri različnih frekvencah različna. Govorimo o t. i. disperziji upogibnih valov.

V primeru, ko je hitrost sledi zvočnega valovanja c_x na pregradi enaka hitrosti c_b povzročena upogibna valovanja v pregradi, govorimo o koincidenči (ujemanju) sledi zvočnega valovanja z vzbujenimi upogibnimi valovi v pregradi oziroma o t. i. koincidenčnem efektu [Cremer, 1942]. Pri tem velja:

$$c_x = c_b = \frac{c}{\sin \varphi} \quad (\text{m/s}), \quad (5)$$

kjer je φ vpadni kot zvoka na pregrado (slika 1).

Ker je frekvenca sledi zvočnega valovanja na pregradi enaka frekvenci vpadlega zvočnega valovanja, sledi iz enačbe (5), da je projekcija valovne dolžine zvoka na pregrado enaka valovni dolžini upogibnega valovanja pregrade:

$$\lambda_b = \frac{\lambda}{\sin \varphi} \quad (\text{m}) \quad (5a)$$

Frekvenca, pri kateri nastane koincidenčni efekt, se imenuje koincidenčna frekvenca. Iz enačb (4) in (5) dobimo:

$$f_{co} = \frac{c^2}{2\pi (\sin \varphi)^2} \cdot \sqrt{\frac{m}{B}} \quad (\text{Hz}) \quad (6)$$

Iz enačbe (6) sledi, da je najnižja koincidenčna frekvenca pri vpadnem kotu zvoka $\varphi = \pi/2$, torej takrat, ko zvok v zraku potuje vzporedno s pregrado. Imenuje se kritična frekvenca:

$$f_{cr} = \frac{c^2}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{m}{B}} \quad (\text{Hz}) \quad (7)$$

Za tanko in homogeno pregrado je kritična frekvenca ([Cramer, 1988], [Fahy, 1994]):

$$f_{cr} = \frac{c^2}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{m \cdot 12 \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot h^3}} \quad (\text{Hz}), \quad (7a)$$

kjer je:

- c – hitrost zvoka v zraku (m/s),
- m – masa na enoto površine pregrade (kg/m²),
- E – dinamični modul elastičnosti pregrade (N/m²),
- h – debelina pregrade (m),
- ν – prečna kontrakcija.

Omenimo, da tanka enoslojna homogena plošča predstavlja dober približek dejanske pregrade, če lahko deformacije pregrade v smeri pravokotno na pregrado zanemarimo ter so resonance nihajnih podsistemov v pregradi nad obravnavanim frekvenčnim območjem (npr. resonance sten votlin v votličavi opeki, resonance medprostorov v votličavi opeki ipd.). Če je pregrada sestavljena iz več slojev ter izpolnjuje navedena kriterija, se jo lahko obravnava kot enojno homogeno pregrado, pri čemer se upošteva vpliv lastnosti posameznih slojev na skupno obnašanje pregrade (skupna masa, skupna togost, skupno dušenje).

Koincidenčni efekt je prisoten pri kritični frekvenci, kjer je hitrost upogibnih valov enaka hitrosti zvoka v zraku, ter na frekvenčnem območju nad kritično frekvenco, kjer je hitrost upogibnih valov večja od hitrosti zvoka v zraku (enačba (5)). Na frekvenčnem območju pod kritično frekvenco je hitrost upogibnih valov v pregradi manjša od hitrosti zvoka v zraku, zato se v pregradi kot odziv na sled zvočnega valovanja na pregradi vzbudijo le vsiljeni upogibni valovi.

Do sedaj smo opazovali odziv pregrade na vzbujanje z vpadnimi ravnimi zvočnimi valovi. Pojav pa lahko opazujemo tudi v obratni smeri, torej da imamo v pregradi že vzbujene upogibne valove in nas zanima, kako pregrada zaradi teh valov seva zvok. Iz do sedaj opisanega sledi, da bo pregrada sevala zvok pri kritični frekvenci in nad njo, pod kritično frekvenco pa sevanja zvoka ne bo. To v realnosti seveda ne drži, saj je jasno, da pregrade sevajo zvok tudi pri nižjih frekvencah pod kritično frekvenco. Razlog je v tem, da je pri opisu koincidenčnega efekta privzeto, da je pregrada neomejena, kar v realnosti seveda ni mogoče. V pregradi s končnimi merami se zaradi odbojev upogibnih valov od robov pregrade in od diskontinuitet v pregradi oblikujejo stoječi upogibni valovi (nihajne oblike), katerih sevanje zvoka je drugačno od sevanja neskončne pregrade. Izkaže pa se, da je za opis vpliva koincidenčnega efekta na zvočno izolirnost pregrade model neskončne plošče zadovoljiv, če se upošteva vse vpadne kote zvoka φ na ploščo med 0° in 78° [Hongisto, 2000].

4 VPLIV KOINCIDENČNEGA EFEKTA NA ZVOČNO IZOLIRNOST ENOJNE PREGRADE

Zvočno izolirnost tanke homogene neskončne ravne pregrade, izpostavljene difuznemu (razpršenemu) zvočnemu polju, se za frekvenčno območje pri kritični frekvenci in nad njo do loči z enačbo ([Davy, 2009], [Hongisto, 2000]):

$$R = 20 \cdot \log(m \cdot f) + 10 \cdot \log \left[\eta \left(\frac{f}{f_{cr}} - 1 \right) \right] - 44 \quad (\text{dB}),$$

za $f \approx f_{cr}$ in $f > f_{cr}$ (8)

Glede na kritično frekvenco se lahko razdelijo enojne pregrade v naslednje značilne skupine [Fasold, 1987]:

- pregrade z »majhno« upogibno togostjo – kritična frekvenca ≥ 1600 Hz,
- pregrade z »veliko« upogibno togostjo – kritična frekvenca ≤ 200 Hz,
- ostale pregrade – kritična frekvenca med 200 Hz in 1600 Hz.

V preglednici 1 so predstavljeni nekateri značilni materiali s pripadajočimi najmanjšimi oziroma največjimi debelinami, ki jih še uvrščajo v skupini z »majhno« oziroma z »veliko« upogibno togostjo.

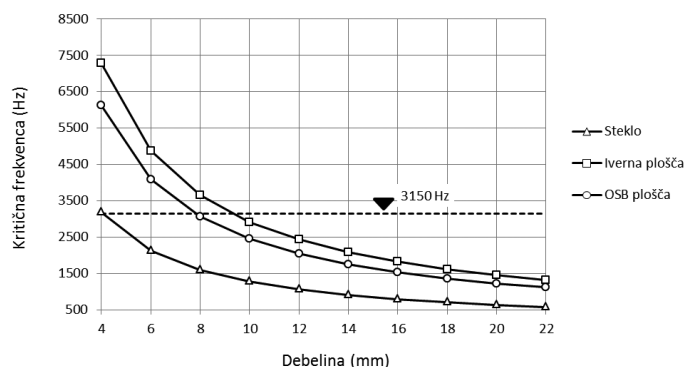
Pregrade z veliko upogibno togostjo ($f_c \leq 200$ Hz)		Pregrade z majhno upogibno togostjo ($f_c \geq 1600$ Hz)	
Sestava pregrade	Debelina (mm)	Sestava pregrade	Debelina (mm)
Težki beton	> 85	Mavčno-kartonske plošče	< 20
Lahki beton	> 120	Vezane plošče	< 13
Porobeton	> 220	Lesocementne plošče	< 45
Opeka	> 115	Steklo, jeklo, aluminij	< 7

Preglednica 1. Toge in gibke pregrade iz nekaterih značilnih gradbenih materialov.

Če opazujemo frekvenčno območje med 100 Hz in 3150 Hz, ki se v gradbeni akustiki privzema za merodajno [SIST, 2021], ugotovimo, da se pri bolj togih pregradah večina merodajnega frekvenčnega območja nahaja nad kritično frekvenco, pri pregradah z majhno upogibno togostjo pa se večina merodajnega frekvenčnega območja nahaja pod kritično frekvenco.

Pri bolj togih pregradah, ki so pretežno tudi masivnejše, s povečanjem debeline pregrade znižujemo kritično frekvenco pod merodajno frekvenčno območje, kar ugodno vpliva na zvočno izolirnost. Na merodajnem frekvenčnem območju je v tem primeru mogoče povečevati zvočno izolirnost s povečanjem mase in/ali upogibne togosti. Vpliv povečanja notranjega dušenja z dodajanjem materialov z večjim notranjim dušenjem na zvočno izolirnost je zaradi velike mase in upogibne togosti v tem primeru običajno zanemarljiv.

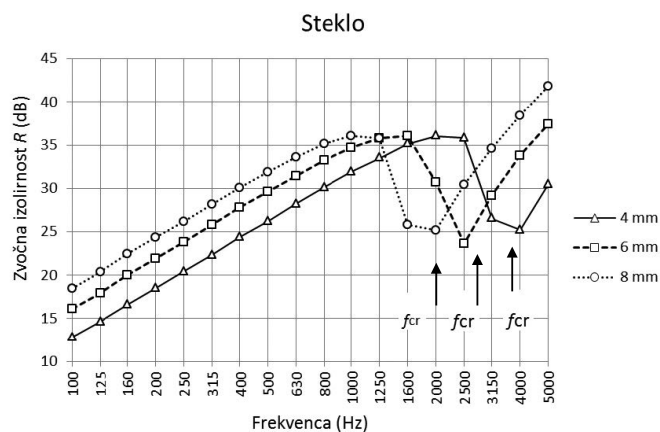
Pri pregradah z majhno upogibno togostjo je kritična frekvenca na zgornjem ali celo nad zgornjim delom merodajnega frekvenčnega območja (graf na sliki 2). Zvočno izolirnost take pregrade je vsekakor mogoče povečati s povečanjem mase pregrade. Maso pregrade povečamo z odebelitvijo pregrade, pri čemer pa poleg mase praviloma povečamo tudi upogibno



Slika 2. Kritične frekvence pregrad z majhno upogibno togostjo za nekatere značilne materiale.

togost pregrade, s čimer se zniža njena kritična frekvenca. To pa na žalost pomeni, da se padec zvočne izolirnosti pregrade na območju kritične frekvence pomakne v merodajno frekvenčno območje. Da se to ne bi zgodilo, je torej treba oblikovati pregrado na tak način, da masa pregrade sicer naraste, upogibna togost pa se pri tem ne poveča. Če to ni mogoče, ostane edina možnost povečanje notranjega dušenja v pregradi, npr. z dodajanjem slojev materialov z večjim notranjim dušenjem, kar pa je, za razliko od masivnejših pregrad, v tem primeru učinkovit ukrep.

Steklo je npr. material, za katerega je pri običajnih debelinah kritična frekvenca vedno v merodajnem frekvenčnem območju (spodnja krivulja v grafu na sliki 2).



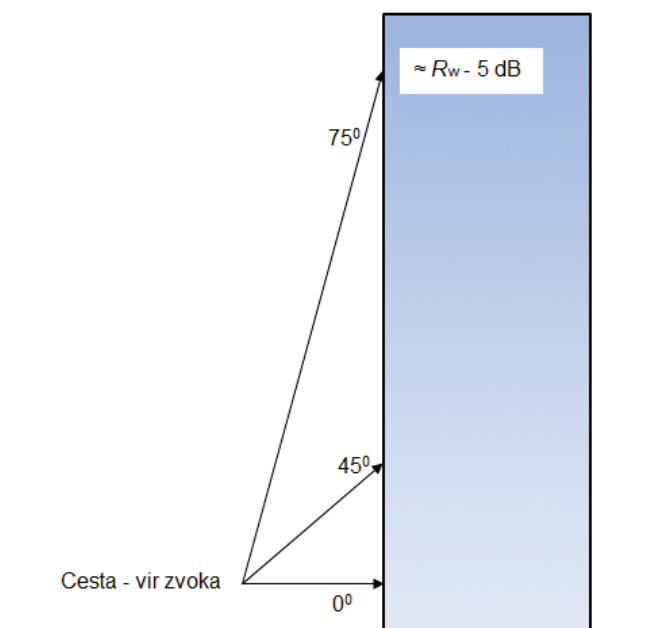
Slika 3. Zvočne izolirnosti stekel različnih debelin, izpostavljenih difuznemu zvočnemu polju.

Iz grafa na sliki 3 se vidi, da je zmanjšanje zvočne izolirnosti največje pri kritični frekvenci. Zvočne izolirnosti v grafu na sliki 3 so vrednosti v terčnih frekvenčnih pasovih, zato so lokacije kritičnih frekvenc označene le okvirno. Iz grafa se tudi opazi, da se znižanje zvočne izolirnosti pri kritični frekvenci s povečevanjem debeline stekla pomika proti nižjim frekvencam (enačba (7a)).

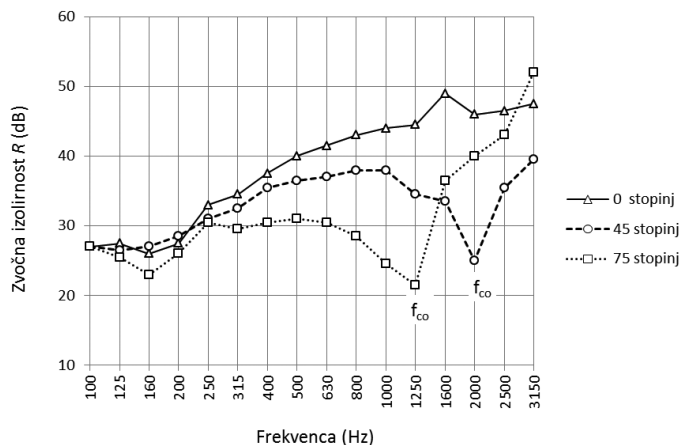
Padec zvočne izolirnosti je največji pri kritični frekvenci in na frekvenčnem območju v njeni neposredni okolici le v primeru, če zvok vpada na pregrado tudi v smeri, ki je skoraj vzporedna z ravnino pregrade ($\varphi \approx 90^\circ$). Če pa zvok vpada na pregrado pre-

težno pod poljubnim vpadnim kotom na območju $0 \leq \varphi < 90^\circ$ in ne blizu 90° , je največji padec zvočne izolirnosti pregrade pri koincidenčni frekvenci, ki ustreza temu vpadnemu kotu (enačba (6)), ne pri kritični frekvenci. Značilni primer te vrste je npr. vpad hrupa (= neželenega zvoka) cestnega prometa na fasado visoke stavbe v različnih nadstropjih (slika 4).

Vrednost R_w na sliki 4 je ovrednotena zvočna izolirnost, ki predstavlja enoštevnično vrednost zvočne izolativnosti pregrade, določeno po standardu [SIST, 2021]. V stavbi je bilo z meritvami ugotovljeno [Volovšek, 1983], da je dosežena ovrednotena zvočna izolirnost oken v najvišjih nadstropjih za okoli 5 dB nižja od vrednosti, ki je bila za enaka okna ugotovljena z meritvami v laboratoriju. Dosežena zvočna izolirnost oken v posame-



Slika 4. Zmanjšanje zvočne izolirnosti oken v višjih nadstropjih zaradi večjega vpadnega kota zvoka na izpostavljeno fasado stavbe.



Slika 5. Pri večanju vpadnega kota zvoka na fasado (slika 4) se koincidenčna frekvenca in s tem padec zvočne izolirnosti pomika proti sredini merodajnega frekvenčnega območja.

znih terčnih frekvenčnih pasovih je za tri značilne vpadne kote (slika 4) predstavljena v grafu na sliki 5.

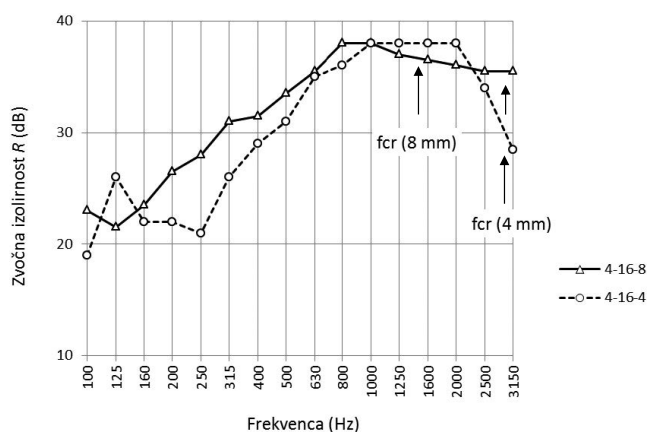
Iz grafa na sliki 5 je lepo vidno, da pri skoraj pravokotnem vpadu zvoka na okno (v pritličju) praktično ni vpliva koincidence, pri poševnem vpadu zvoka na okno pa se koincidenčna frekvenca f_{co} z večanjem vpadnega kota znižuje, pri čemer se padec zvočne izolirnosti pomika proti sredini merodajnega frekvenčnega območja. To pa povzroči že omenjeni padec R_w v višjih nadstropjih stavbe.

5 VPLIV KOINCIDENČNEGA EFEKTA NA ZVOČNO IZOLIRNOST DVOJNE PREGRADE

Koincidenčni efekt se seveda pojavi tudi pri dvojnih in večkratnih pregradah, npr. pri dvojni ali trojni zasteklitvi oken ipd., pri čemer pa je njegov učinek na skupno zvočno izolirnost pregrade odvisen od celotne sestave pregrade. V grafu na sliki 6 je za značilni primer predstavljena primerjava zvočnih izolirnosti izolacijskega stekla s sestavo »steklo 4 mm - medprostor zrak 16 mm - steklo 4 mm« ter izolacijskega stekla s sestavo »steklo 4 mm - medprostor zrak 16 mm - steklo 8 mm«.

Kritična frekvenca 8 mm debelega stekla je okoli 1,5 kHz (odvisno od njegove mase in upogibne togosti – enačba (7)), kritična frekvenca 4 mm debelega stekla pa je okoli 3 kHz. V primeru zasteklitve 4-16-4 imata obe stekli kritično frekvenco pri 3 kHz in najbolj prepuščata zvok ravno pri tej frekvenci in neposredno okoli nje, kar povzroči na tem frekvenčnem območju znatni padec zvočne izolirnosti celotne pregrade. Drugače je v primeru zasteklitve 4-16-8, kjer je kritična frekvenca 8 mm debelega stekla okoli 1,5 kHz, kritična frekvenca 4 mm debelega stekla pa okoli 3 kHz. V tem primeru steklo 8 mm nekoliko omeji prepuščanje zvoka celotne pregrade pri 3 kHz, vendar hkrati povzroči večje prepuščanje zvoka pri 1,5 kHz, kjer pa manj prepušča zvok 4 mm debelo steklo. Posledica navedenega je padec zvočne izolirnosti zasteklitve 4-16-8 na območjih obeh kritičnih frekvenc, ki pa je znatno manjši od padca zvočne izolirnosti zasteklitve 4-16-4 na frekvenčno bolj omejenem območju okoli 3 kHz.

Za izbrani primer le bežno omenimo, da je večja zvočna izolirnost zasteklitve 4-16-8 na pretežnem delu frekvenčnega območja pod frekvenco okoli 1000 Hz posledica večje mase te zasteklitve glede na maso zasteklitve 4-16-4.



Slika 6. Primerjava zvočne izolirnosti oken z dvojno zasteklitvijo, kjer sta obe stekli v enem primeru enaki, v drugem primeru pa različni.

6 SKLEP

Koincidenčni efekt pomembno vpliva na zvočno izolirnost pregrade, še posebno v frekvenčnem območju kritične frekvence, saj je v tem frekvenčnem območju padec zvočne izolirnosti pregrade lahko znaten. Pomembno je zato, da je kritična frekvenca pregrade izven merodajnega frekvenčnega območja, ki se v gradbeni akustiki privzema med 100 Hz in 3,15 kHz.

V primerih masivnih pregrad se stremi za tem, da je kritična frekvenca pod merodajnim frekvenčnim območjem, v primerih lažjih in bolj gibkih pregrad pa za tem, da je njihova kritična frekvenca nad merodajnim frekvenčnim območjem (preglednica 1). V primerih dvojnih in večkratnih pregrad se je treba izogibati slojem z enako kritično frekvenco, npr. zasteklitvam z več enako debelimi stekli ipd. V kolikor to zaradi kakršnihkoli drugih razlogov ni primerno ali pa celo ni mogoče, je treba zagotoviti večje notranje dušenje slojev s kritično frekvenco na merodajnem frekvenčnem območju, in sicer z namenom zmanjšati resonančni odziv zaradi koincidence. Povečanje notranjega dušenja bo učinkovito zlasti v primerih slojev z majhno upogibno togostjo, malo učinkovito ali celo neučinkovito pa bo v primerih masivnejših in bolj togih pregrad.

7 ZAHVALA

Prispevek temelji na raziskavah, financiranih v okviru programske skupine ARRS - P2 - 0273 Gradbeni objekti in materiali ter v okviru infrastrukturnega programa ARRS - IO - 0032 Preizkušanje materialov in konstrukcij.

8 LITERATURA

Cremer, L., Theorie der Schalldämmung Wände bei schrägem Einfall, Akustische Zeitschrift, 7, 81-104, 1942.

Cremer, L., Heckl, M., Ungar, E. E., Structure-Borne Sound, Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies, 2nd ed., Springer Verlag, Berlin, 1988.

Davy, J. L., Predicting the sound insulation of single leaf walls: Extension of Cremer's model, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 126 (4), 1871-1877, 2009.

Fahy, F., Sound and Structural Vibrations - Radiation, Transmission and Response. 4th ed., Academic Press Limited, London, 1994.

Fasold, W., Sonntag, E., Winkler, H., Bau- und Raumakustik, VEB Verlag, Berlin, 1987.

Hongisto, V., Sound insulation of doors - part 1: Prediction models for structural and leak transmission, Journal of Sound and Vibration, 230 (1), 133-148, 2000.

Hopkins, C., Sound Insulation. 2nd ed., Routledge, London, New York, 2014.

SIST, SIST EN ISO 717-1: 2021, Akustika: Vrednotenje zvočne izolirnosti v stavbah in zvočne izolirnosti gradbenih elementov - Del 1: Izolirnost pred zvokom v zraku, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2021.

Volovšek, S., Vpliv sestave fasadnih sten in oken na zvočno zaščito zgradb pred zunanjim hrupom - 3. del, Končno poročilo o rezultatih preiskav, Raziskovalna Skupnost Slovenije, 1983.