

MASTER AKADEMSKE STUDIJE
STUDIJSKI PROGRAM: INŽENJERSTVO ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE
NASTAVNI PREDMET: BUKA U ŽIVOTNOJ SREDINI

SKRIPTA REŠENIH ZADATAKA

Materijal za učenje i pripremu ispita

Momir Prašćević

NIŠ, 2022

SADRŽAJ

1.FIZIČKI I FIZIOLOŠKI KONCEPT BUKE	3
1.1 Doplerov efekat.....	3
1.2 Ravanski i sferni talasi	4
1.3 Subjektivna jačina složenog zvuka	14
2. IZVORI BUKE.....	17
2.1 Tačkasti izvori buke	17
2.2 Niz tačkastih izvora.....	18
2.3 Linijski izvori.....	21
2.4 Površinski izvori	23
2.5 Nivo buke izvora iz radne sredine.....	23
2.6 Prostiranje buke zatvoreni-otvoreni prostor.....	28
3. BUKA U ZATVORENOM PROSTORU	37
3.1 Akustička obrada prostorije.....	37
3.2 Zvučna izolacija i izolaciona moć	39
4. MODELIRANJE BUKE	45
4.1 Železnički saobraćaj.....	45
4.2 Drumski saobraćaj.....	51
5. KONTROLA BUKE	56
5.1 Barijere.....	56
5.2 Oklapanje izvora buke	61

1.FIZIČKI I FIZIOLOŠKI KONCEPT BUKE

1.1 Doplerov efekat

ZADATAK 1.1 Pešak se kreće duž železničke pruge brzinom 5 km/h. Njemu u susret kreće se voz brzinom 100 km/h. Kada mašinovođa primeti pešaka upotrebljava sirenu koja emituje zvučne talase frekvencije 500 Hz. Odrediti talasnu dužinu zvučnih talasa koju emituje sirena kada voz stoji i frekvenciju zvuka sirene na mestu pešaka, kada se voz kreće, ako je temperatura spoljne sredine 15 °C.

Rešenje: Zvučni talasi se pri datoj spoljnoj temperaturi od $\theta = 15\text{ °C}$ kreću brzinom:

$$c = c_0 + 0.6 \cdot \theta = 331 + 0.6 \cdot 15 = 340 \text{ m/s}.$$

Kada voz stoji talasna dužina zvučnih talasa koje emituje sirena ima vrednost:

$$\lambda_s = \frac{c}{f_s} = \frac{340}{500} = 0.68 \text{ m},$$

gde je f_s [Hz] - frekvencija zvučnih talasa koje emituje voz.

Kada se voz kreće brzinom $v_s = 100 \text{ km/h} = 100 \cdot (1000/3600) = 27.8 \text{ m/s}$, sirena emituje zvučne talase čija je talasna dužina:

$$\lambda = \frac{c - v_s}{f_s} = \frac{340 - 27.8}{500} = 0.624 \text{ m}.$$

Pešak koji se kreće brzinom $v_p = 5 \text{ km/h} = 5 \cdot (1000/3600) = 1.39 \text{ m/s}$, na mestu prijema registruje zvučne talase čija je talasna dužina jednaka talasnoj dužinu zvučnih talasa koju emituje sirena voza koji se kreće:

$$\lambda = \frac{c - v_p}{f_p},$$

gde je f_p [Hz] - frekvencija zvučnih talasa koje registruje pešak.

Frekvencija na mestu prijema se može izračunati izjednačavanjem talasnih dužina zvučnih talasa:

$$\frac{c - v_p}{f_p} = \frac{c - v_s}{f_s} \Rightarrow f_p = f_s \frac{c - v_p}{c - v_s} = 500 \frac{340 - 1.39}{340 - 27.8} = 542.26 \text{ Hz}.$$

Napomena: Ukoliko nije dat podatak o temperaturi sredine kroz koju se prostire zvučni talas, u narednim zadacima za brzinu prostiranja zvučnih talasa biće korišćena izračunata vrednost u ovom zadatku.

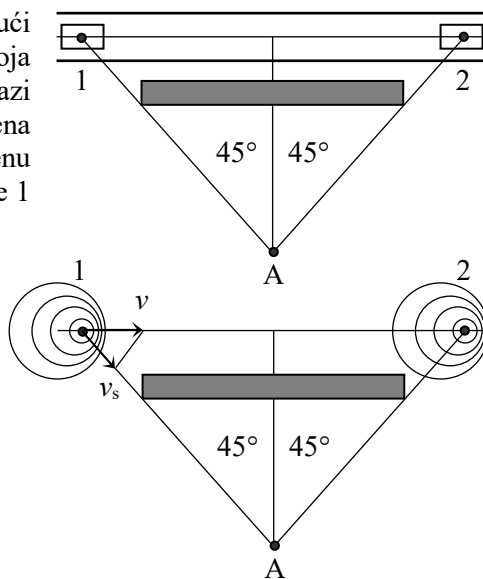
ZADATAK 1.2 Ulicom je prošlo vozilo hitne pomoći emitujući sirenom signal frekvencije 2000 Hz. Posmatrač se nalazi u tački A koja je blokom zgrada zaklonjena od ulice. U trenucima kada vozilo prolazi kroz tačke 1 i 2, do posmatrača dolazi direktan zvuk koji emituje sirena vozila. Ako se vozilo kretalo brzinom 120 km/h, odrediti promenu frekvencije koju posmatrač registruje pri prolasku vozila kroz tačke 1 i 2, pri temperaturi spoljne sredine 15 °C.

Rešenje: Komponenta brzine izvora, v_s [m/s], koja utiče na promenu talasne dužine zvučnih talasa iznosi:

$$v_s = v \cos(45^\circ) = 33.3 \cdot (\sqrt{2} / 2),$$
$$v_s = 23.5 \text{ m/s},$$

gde je $v = 120 \cdot (1000 / 3600) = 33.3 \text{ m/s}$ - brzina vozila.

Talasna dužina zvučnih talasa koje emituje vozilo prolaskom kroz određenu tačku jednaka je:



$$\text{Tačka 1} \\ \lambda' = \frac{c - v_s}{f_s},$$

$$\text{Tačka 2} \\ \lambda'' = \frac{c + v_s}{f_s},$$

gde je $f_s = 2000 \text{ Hz}$ - frekvencija zvučnih talasa koje emituje vozilo.

Na mestu prijema posmatrač registruje zvučne talase čija je frekvencija:

$$f_p' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{c - v_s} f_s = \frac{340}{340 - 23.5} 2000 = 2148.5 \text{ Hz}, \quad f_p'' = \frac{c}{\lambda''} = \frac{c}{c + v_s} f_s = \frac{340}{340 + 24} 2000 = 1870.7 \text{ Hz}.$$

Posmatrač registruje veću frekvenciju zvučnih talasa kada mu se izvor približava u odnosu na talasnu dužinu zvučnih talasa kada se izvor udaljava za $2148.5 - 1870.7 = 277.8 \text{ Hz}$.

1.2 Ravanski i sferni talasi

ZADATAK 1.3 Odrediti trenutnu vrednost zvučnog pritiska i brzine oscilovanja progresivnog neprigušenog ravnog zvučnog talasa na rastojanju 2 m od izvora zvuka, nakon 20 s emitovanja zvuka sa amplitudom pritiska 10 mPa, na frekvenciji 1000 Hz.

Rešenje: Trenutna vrednost zvučnog pritiska, $p(x, t)$, progresivnog neprigušenog ravnog zvučnog talasa određena je izrazom:

$$p(x, t) = A_p \cos(\omega t - kx) = A_p \cos\left(2\pi f t - \frac{2\pi f}{c} x\right),$$

gde je: A_p [Pa] - amplituda zvučnog pritiska, ω [rad/s] - kružna učestanost emitovanih zvučnih talasa, f [Hz] - frekvencija emitovanih zvučnih talasa, t [s] - vremenski interval od početka emitovanja zvučnih talasa, x [m] - rastojanje posmatrane tačke od izvora zvuka i k [1/m] - fazna konstanta koja se može izračunati nekim od sledećih izraza:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

gde je λ [m] - talasna dužina emitovanih zvučnih talasa.

Za date vrednosti u zadatku, trenutna vrednost zvučnog pritiska na rastojanju 2 m od izvora i nakon 20 s emitovanja zvuka iznosi:

$$p(2, 20) = 10^{-2} \cos\left(2\pi \cdot 1000 \cdot 20 - \frac{2\pi \cdot 1000}{340} \cdot 2\right) = 7.39 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}.$$

Polazeći od osnovnog izraza koji definiše trenutnu vrednost pomeraja čestica elastične sredine, $\xi(x, t)$, pri nailasku zvučnih talasa:

$$\xi(x, t) = A_\xi \sin(\omega t - kx),$$

gde je A_ξ [m] - amplituda pomeraja čestica elastične sredine, kao i relacija koje ovu veličinu povezuju sa trenutnim vrednostima zvučnog pritiska, $p(x, t)$, i brzine oscilovanja čestica elastične sredine, $v(x, t)$:

$$p(x, t) = -K \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x}, \quad v(x, t) = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial t},$$

može se izračunati specifična akustička impedansa sredine, Z_s [kg/m²s], kroz koju se prostire zvučni talas.

Specifična akustička impedansa određuje reakciju sredine na prostiranje zvučnih talasa i određena je odnosom:

$$Z_s = \frac{p(x, t)}{v(x, t)}.$$

Koristeći navedene relacije, dobija se da je:

$$p(x, t) = -K \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x} = K k A_\xi \cos(\omega t - kx),$$

$$v(x,t) = \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial t} = \omega A_{\xi} \cos(\omega t - kx),$$

tako da izraz za specifičnu akustičku impedansu ravanskih neprigušenih zvučnih talasa dobija oblik:

$$Z_s = \frac{p(x,t)}{v(x,t)} = \frac{K k \xi_m \cos(\omega t - kx)}{\omega \xi_m \cos(\omega t - kx)} = \frac{\rho c^2 \frac{\omega}{c}}{\omega} = \rho c.$$

Specifična akustička impedansa vazduha pri sobnoj temperaturi i normalnom pritisku ima približno vrednost:

$$Z_s = \rho c = 400 \text{ kg/m}^2 \text{ s}.$$

Napomena: Ukoliko u zadatku nisu dati podaci za njeno izračunavanje (gustina sredine, temperatura, pritisak ...), u narednim zadacima za specifičnu akustičku impedansu biće korišćena izračunata vrednost u ovom zadatku.

Trenutna vrednost brzine oscilovanja čestica elastične sredine na rastojanju 2 m od izvora i nakon 20 s emitovanja zvuka iznosi:

$$v(2,20) = \frac{p(2,20)}{\rho c} = \frac{7.39 \cdot 10^{-3}}{400} \cdot 1.85 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}.$$

ZADATAK 1.4 Odrediti trenutnu vrednost zvučnog pritiska i brzine oscilovanja ravanskog neprigušenog progresivnog zvučnog talasa na rastojanju 10 m od izvora, 5 s nakon uključenja, ako je amplituda pomeraja čestica elastične sredine 5 mm, na frekvenciji 1000 Hz.

Rešenje: Trenutna vrednost pomeraja čestica elastične sredine, $\xi(x,t)$, pri nailasku zvučnih talasa data je izrazom:

$$\xi(x,t) = A_{\xi} \sin(\omega t - kx).$$

Kako su poznate veličine koje određuju trenutnu vrednost pomeraja čestica, trenutna vrednost zvučnog pritiska određuje se koristeći relaciju koja povezuje ove dve veličine:

$$\begin{aligned} p(x,t) &= -K \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial x} = K k A_{\xi} \cos(\omega t - kx) = \rho c^2 \frac{2\pi f}{c} A_{\xi} \cos\left(2\pi f t - \frac{2\pi f}{c} x\right) \\ &= 2\pi \rho c f A_{\xi} \cos\left(2\pi f t - \frac{2\pi f}{c} x\right) = A_p \cos(\omega t - kx). \end{aligned}$$

Trenutna vrednost zvučnog pritiska na rastojanju 10 m od izvora i nakon 5 s emitovanja zvuka iznosi:

$$p(10,5) = 2\pi \cdot 400 \cdot 1000 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cos\left(2\pi \cdot 1000 \cdot 5 - \frac{2\pi \cdot 1000 \cdot 5}{340} \cdot 10\right) = -10684 \text{ Pa}.$$

Na sličan način se određuje trenutna vrednost brzine čestica:

$$v(x,t) = \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial t} = \omega A_{\xi} \cos(\omega t - kx) = 2\pi f A_{\xi} \cos\left(2\pi f t - \frac{2\pi f}{c} x\right) = A_v \cos(\omega t - kx).$$

Trenutna vrednost brzine čestica na rastojanju 10 m od izvora i nakon 5 s emitovanja zvuka iznosi:

$$v(10,5) = 2\pi \cdot 1000 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cos\left(2\pi \cdot 1000 \cdot 5 - \frac{2\pi \cdot 1000 \cdot 5}{340} \cdot 10\right) = 26.7 \text{ m/s}.$$

ZADATAK 1.5 Ravanski neprigušeni progresivni zvučni talas ima efektivnu vrednost zvučnog pritiska od 0.1 Pa. Odrediti efektivnu vrednost brzine oscilovanja i pomeraja čestica elastične sredine na frekvenciji 1000 Hz.

Rešenje: Efektivne vrednosti zvučnog pritiska p i brzine oscilovanja v čestica, povezane su relacijom koja definiše specifičnu akustičku impedansu:

$$Z_s = \frac{p}{v} = \rho c.$$

Efektivna vrednost brzine oscilovanja čestica može se izračunati primenom gornjeg izraza:

$$v = \frac{p}{Z_s} = \frac{p}{\rho c} = \frac{0.1}{400} = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}.$$

Izraz koji definiše efektivnu vrednost pomeraja čestica, ξ , dobija se polazeći od izraza za trenutnu vrednost pomeraja

$$\xi(x, t) = A_\xi \sin(\omega t - kx)$$

i relacije koja povezuje pomeraj i brzinu. Trenutna vrednost brzine određena je izrazom:

$$v(x, t) = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial t} = \omega A_\xi \cos(\omega t - kx) = A_v \cos(\omega t - kx).$$

Efektivna vrednost veličine čija se trenutna vrednost menja po prostoperiodičnom zakonu, određuje se deljenjem amplitude kvadratnim korenom broja 2:

$$v = \frac{A_v}{\sqrt{2}} = \frac{\omega A_\xi}{\sqrt{2}} = \omega \xi,$$

tako da je efektivna vrednost pomeraja čestica:

$$\xi = \frac{v}{\omega} = \frac{v}{2\pi f} = \frac{2.5 \cdot 10^{-4}}{2\pi \cdot 1000} = 3.98 \cdot 10^{-8} \text{ m}.$$

ZADATAK 1.6 Zvučno polje se formira oscilovanjem klipne membrane u idealno glatkoj i dugoj cevi po zakonu $\xi(t) = 4 \cdot 10^{-5} \sin 100t + 4 \cdot 10^{-5} \cos 100t$ [m]. Odrediti efektivne vrednosti zvučnog pritiska i brzine oscilovanja čestica.

Rešenje: Oscilovanjem klipne membrane u idealno glatkoj i dugoj cevi se formiraju ravanski zvučni talasi, čija je efektivna vrednost svih veličina koje definišu zvučno polje (zvučni pritisak, brzina, pomeraj, energija) jednaka u svim tačkama.

Zakon koji definiše pomeraj klipne membrane, a samim tim i pomeraj čestica sredine kroz koju se prostire zvučni talas, dat je kao zbir dve sinhronne oscilacije. Rezultujuća oscilacija se određuje postupkom koji definiše slaganje sinhronih oscilacija. Kako pojedinačne prostoperiodične oscilacije moraju biti istog tipa potrebno je prvo jednu od dve date, konvertovati u drugi tip prostoperiodične oscilacije:

$$\xi(t) = 4 \cdot 10^{-5} \sin 100t + 4 \cdot 10^{-5} \cos 100t = 4 \cdot 10^{-5} \sin 100t + 4 \cdot 10^{-5} \sin(100t + \frac{\pi}{2}).$$

Prikazani oblik omogućava određivanje amplituda i početnih faza pojedinačnih oscilacija:

$$\xi(t) = A_1 \sin(100t + \varphi_1) + A_2 \sin(100t + \varphi_2),$$

$$A_1 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}, A_2 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}, \varphi_1 = 0, \varphi_2 = \frac{\pi}{2}.$$

Koeficijenti koji određuju amplitudu i početnu fazu rezultujuće oscilacije imaju vrednosti:

$$K_1 = A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2 = 4 \cdot 10^{-5} \cos(0) + 4 \cdot 10^{-5} \cos(\pi/2) = 4 \cdot 10^{-5},$$

$$K_2 = A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2 = 4 \cdot 10^{-5} \sin(0) + 4 \cdot 10^{-5} \sin(\pi/2) = 4 \cdot 10^{-5}.$$

Rezultujuća amplituda određuje se kao:

$$A_\xi = \sqrt{K_1^2 + K_2^2} = \sqrt{(4 \cdot 10^{-5})^2 + (4 \cdot 10^{-5})^2} = 4 \cdot 10^{-5} \sqrt{2} \text{ m},$$

a rezultujuća faza kao:

$$\varphi = \arctg \frac{K_2}{K_1} = \arctg \frac{4 \cdot 10^{-5}}{4 \cdot 10^{-5}} = \frac{\pi}{4}.$$

Rezultujuća oscilacija koja definiše pomeraj membrane ima oblik:

$$\xi(t) = A_\xi \sin(100t + \varphi) = 4 \cdot 10^{-5} \sqrt{2} \sin(100t + \frac{\pi}{4}).$$

Brzina oscilovanja čestica sredine kroz koju se prostire zvučni talas određena je prvim izvodom pomeraja čestica:

$$v(t) = \frac{d\xi(t)}{dt} = 100A_\xi \cos(100t + \varphi) = A_v \cos(100t + \varphi).$$

Efektivna vrednost brzine čija se trenutna vrednost menja po prostoperiodičnom zakonu, određuje se deljenjem amplitude kvadratnim korenom broja 2:

$$v = \frac{A_v}{\sqrt{2}} = \frac{100A_\xi}{\sqrt{2}} = \frac{100 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{2}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

Efektivna vrednost zvučnog pritiska ravanskih zvučnih talasa je povezana sa brzinom čestica preko specifične akustičke impedance:

$$\frac{p}{v} = \rho c \Rightarrow p = v \cdot \rho c = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 400 = 1.6 \text{ Pa}.$$

gde je ρ - gustina sredine (vazduha) a c - brzina zvučnih talasa.

ZADATAK 1.7 Odrediti trenutnu vrednost zvučnog pritiska i brzine oscilovanja progresivnog prigušenog ravnog zvučnog talasa na rastojanju 2 m od izvora zvuka, nakon 20 s emitovanja zvuka sa amplitudom pritiska 10 mPa, na frekvenciji 1000 Hz, ako je prigušenje sredine 0.5 dB/m.

Rešenje: Trenutna vrednost zvučnog pritiska, $p(x, t)$, progresivnog prigušenog ravnog zvučnog talasa određena je izrazom:

$$p(x, t) = A_p e^{-\beta x} \cos(\omega t - kx) = A_p e^{-\beta x} \cos\left(2\pi f t - \frac{2\pi f}{c} x\right),$$

gde je β [dB/m] - prigušenje sredine, odnosno slabljenje zvučnih talasa pri prostiranju kroz sredinu.

Za date vrednosti u zadatku trenutna vrednost zvučnog pritiska na rastojanju 2 m od izvora i nakon 20 s emitovanja zvuka iznosi:

$$p(2, 20) = 10^{-2} e^{-0.5 \cdot 2} \cos\left(2\pi \cdot 1000 \cdot 20 - \frac{2\pi \cdot 1000}{340} \cdot 2\right) = 2.72 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}.$$

Polazeći od osnovnog izraza koji definiše trenutnu vrednost pomeraja čestica elastične sredine pri nailasku zvučnih talasa

$$\xi(x, t) = A_\xi e^{-\beta x} \sin(\omega t - kx),$$

i relacija koje ovu veličinu povezuju sa trenutnim vrednostima zvučnog pritiska i brzine oscilovanja čestica elastične sredine:

$$p(x, t) = -K \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x}; \quad v(x, t) = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial t},$$

može se izračunati specifična akustička impedansa sredine, Z_s [kg/m²s], kroz koju se prostire zvučni talas.

Specifična akustička impedansa određuje reakciju sredine na prostiranje zvučnih talasa i određena je odnosom:

$$Z_s = \frac{p(x, t)}{v(x, t)}.$$

Koristeći navedene relacije, dobija se da je:

$$p(x, t) = -K \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x} = [KkA_\xi \cos(\omega t - kx) + K\beta A_\xi \sin(\omega t - kx)]e^{-\beta x},$$

$$v(x, t) = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial t} = \omega A_\xi e^{-\beta x} \cos(\omega t - kx),$$

tako da izraz za specifičnu akustičku impedansu ravanskih prigušenih zvučnih talasa dobija oblik:

$$Z_s(x,t) = \frac{p(x,t)}{v(x,t)} = \frac{[KkA_\xi \cos(\omega t - kx) + K\beta A_\xi \sin(\omega t - kx)]e^{-\beta x}}{\omega A_\xi e^{-\beta x} \cos(\omega t - kx)},$$

$$Z_s(x,t) = \frac{\left[\rho c^2 \frac{\omega}{c} A_\xi \cos(\omega t - kx) + \rho c^2 \beta A_\xi \sin(\omega t - kx) \right] e^{-\beta x}}{\omega A_\xi e^{-\beta x} \cos(\omega t - kx)},$$

$$Z_s(x,t) = \rho c + \frac{\rho c^2 \beta}{\omega} \tan(\omega t - kx).$$

Specifična akustička impedansa za prigušene ravne zvučne talase nije konstantna veličina, već je njena vrednost promenljiva i zavisi od rastojanja do izvora zvuka i od proteklog vremena od početka emitovanja zvučnih talasa. Ima konstantni deo koji odgovara specifičnoj akustičkoj impedansi neprigušenih zvučnih talasa i promenljivi deo koji se menja po prostoperiodičnom zakonu. Za slučaj kada je prigušenje sredine jednako nuli ($\beta = 0$) dobija se izraz za specifičnu akustičku impedansu neprigušenih ravanskih zvučnih talasa.

Trenutna vrednost brzine oscilovanja čestica elastične sredine za neprigušene ravne zvučne talase menja se po zakonu:

$$v(x,t) = \frac{p(x,t)}{r c + \frac{r c^2 \beta}{\omega} \tan(\omega t - kx)} = \frac{p(x,t)}{r c + \frac{r c^2 \beta}{2 \rho f} \tan(2 \rho f t - \frac{2 \rho f}{c} x)}.$$

Trenutna vrednost brzine oscilovanja čestica elastične sredine na rastojanju 2 m od izvora i nakon 20 s emitovanja zvuka iznosi:

$$v(x,t) = \frac{2.72 \cdot 10^{-3}}{400 + \frac{400 \cdot 340 \cdot 0.5}{2 \cdot 3.14 \cdot 1000} \tan\left(2 \cdot 3.14 \cdot 1000 \cdot 20 - \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1000}{340} \cdot 2\right)} = 6.6 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}.$$

ZADATAK 1.8 Izvor ravanskih prigušenih zvučnih talasa osciluje sa amplitudom pomeraja čestica elastične sredine 5 μm , na frekvenciji 1000 Hz. Ako je koeficijent prigušenja sredine 0.5 dB/m, odrediti na rastojanju 2.5 m od zvučnog izvora efektivnu vrednost zvučnog pritiska i brzine oscilovanja čestica elastične sredine.

Rešenje: Čestice sredine kroz koju prolazi ravanski prigušeni zvučni talas osciluju po zakonu:

$$\xi(x,t) = A_\xi e^{-\beta x} \sin(\omega t - kx).$$

Koristeći relaciju koja povezuje zvučni pritisak i pomeraj može se definisati zakon po kojem se menja zvučni pritisak u funkciji rastojanja do izvora zvuka i proteklog vremena od početka emitovanja zvučnih talasa:

$$p(x,t) = -K \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial x} = [KkA_\xi \cos(\omega t - kx) + K\beta A_\xi \sin(\omega t - kx)]e^{-\beta x},$$

$$p(x,t) = KA_\xi e^{-\beta x} [k \cos(\omega t - kx) + \beta \sin(\omega t - kx)].$$

Izraz u uglastoj zagradi predstavlja zbir dve sinhronne oscilacije. Rezultujuća oscilacija se određuje postupkom koji definiše slaganje sinhronih oscilacija. Kako pojedinačne prostoperiodične oscilacije moraju biti istog tipa potrebno je prvo jednu od dve date, konvertovati u drugi tip prostoperiodične oscilacije:

$$p(x,t) = KA_\xi e^{-\beta x} [k \cos(\omega t - kx) + \beta \cos(\omega t - kx - \pi/2)].$$

Prikazani oblik omogućava određivanje amplituda i početnih faza pojedinačnih oscilacija:

$$p(x,t) = KA_\xi e^{-\beta x} [A_1 \cos(\omega t - kx - \varphi_1) + A_2 \cos(\omega t - kx - \varphi_2)],$$

$$A_1 = k, A_2 = \beta, \varphi_1 = 0, \varphi_2 = \frac{\pi}{2}.$$

Koeficijenti koji određuju amplitudu i početnu fazu rezultujuće oscilacije imaju vrednosti:

$$K_1 = A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2 = k \cos(0) + \beta \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = k,$$

$$K_2 = A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2 = k \sin(0) + \beta \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = \beta.$$

Rezultujuća amplituda se određuje kao:

$$A = \sqrt{K_1^2 + K_2^2} = \sqrt{k^2 + \beta^2},$$

a rezultujuća faza kao:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{K_2}{K_1} = \operatorname{arctg} \frac{\beta}{k}.$$

Rezultujuća oscilacija koja definiše zvučni pritisak ima oblik:

$$p(x, t) = KA_{\xi} A e^{-\beta x} \cos(\omega t - kx - \varphi) = KA_{\xi} \sqrt{k^2 + \beta^2} e^{-\beta x} \cos(\omega t - kx - \varphi) = A_p \cos(\omega t - kx - \varphi).$$

Efektivna vrednost zvučnog pritiska na rastojanju 2.5 m od izvora zvuka, čija se trenutna vrednost menja po prostoperiodičnom zakonu, određuje se deljenjem amplitude kvadratnim korenom broja 2:

$$\begin{aligned} p &= \frac{A_p}{\sqrt{2}} = \frac{KA_{\xi} \sqrt{k^2 + \beta^2} e^{-\beta x}}{\sqrt{2}} = \frac{\rho c^2 A_{\xi} \sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 + \beta^2} e^{-\beta x}}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{400 \cdot 340 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1000}{340}\right)^2 + 0.5^2} e^{-0.5 \cdot 2.5}}{\sqrt{2}} = 2.54 \text{ Pa.} \end{aligned}$$

Brzina oscilovanja čestica sredine kroz koju se prostire zvučni talas određena je prvim izvodom pomeraja čestica:

$$v(x, t) = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial t} = \omega A_{\xi} e^{-\beta x} \cos(\omega t - kx) = A_v \cos(\omega t - kx).$$

Efektivna vrednost brzine na rastojanju 2.5 m od izvora zvuka se određuje deljenjem amplitude kvadratnim korenom broja 2:

$$v = \frac{\omega A_{\xi} e^{-\beta x}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f A_{\xi} e^{-\beta x}}{\sqrt{2}} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1000 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0.5 \cdot 2.5}}{\sqrt{2}} = 6.4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

ZADATAK 1.9 Sferni izvor zvuka poluprečnika 3 cm zrači energiju u slobodnom prostoru, na frekvenciji 200 Hz. Na udaljenosti 5 m od izvora zvuka stvara se zvučni pritisak čija je efektivna vrednost 0.1 Pa. Izračunati efektivnu vrednost zvučnog pritiska i brzine oscilovanja čestica na površini izvora.

Rešenje: Sferni izvor zvuka emituje sferne zvučne talase čiji se zvučni pritisak na površini talasnog fronta, u obliku sfere poluprečnika r , menja po zakonu:

$$p(r, t) = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr) = A_p \cos(\omega t - kr),$$

gde je: r - rastojanje posmatrane tačke do izvora, A - konstanta koja zavisi od karakteristika izvora zvuka.

Efektivna vrednost zvučnog pritiska na nekom rastojanju r od izvora zvuka dobija se deljenjem amplitude zvučnog pritiska kvadratnim korenom broja 2:

$$p = \frac{A_p}{\sqrt{2}} = \frac{A}{r\sqrt{2}} \sim \frac{1}{r}.$$

Dakle, efektivna vrednost zvučnog pritiska je obrnuto proporcionalna rastojanju do izvora zvuka, tako da je odnos efektivnih vrednosti zvučnih pritisaka na dva različita rastojanja do izvora zvuka dat relacijom:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\frac{1}{r_2}}{\frac{1}{r_1}} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Korišćenjem gornje relacije je moguće odrediti zvučni pritisak na bilo kojem rastojanju ukoliko je poznata vrednost zvučnog pritiska na nekom rastojanju. Tako je zvučni pritisak na površini sfere:

$$p_1 = p_2 \frac{r_2}{r_1} = 0.1 \cdot \frac{5}{0.03} = 16.67 \text{ Pa}.$$

Odnos zvučnog pritiska i brzine oscilovanja definiše specifičnu akustičku impedansu, koja za slučaj sfernih zvučnih talasa ima oblik:

$$Z_s = \frac{p}{v} = \frac{\rho c k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}}.$$

Proizvod fazne konstante i rastojanja definiše tip zvučnih talasa. Na površini sfere ima vrednost:

$$k r_1 = \frac{2\pi f}{c} r_1 = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 200}{340} \cdot 0.03 = 0.11 \ll 1.$$

Dakle, proizvod fazne konstante i rastojanja je na površini sfere mnogo manji od jedinice, tako da na površini sfere zvučni talasi imaju oblik sfernih talasa. U ovom slučaju se specifična akustička impedansa na površini sfere može aproksimirati izrazom:

$$Z_s(r = r_1) = \frac{p_1}{v_1} = \frac{\rho c k r_1}{\sqrt{1 + k^2 r_1^2}} \approx \rho c k r_1.$$

Efektivna vrednost brzine oscilovanja na površini sfere ima vrednost:

$$v_1 = \frac{p_1}{\rho c k r_1} = \frac{p_1}{\rho c \cdot k r_1} = \frac{16.67}{400 \cdot 0.11} = 0.379 \text{ m/s}.$$

ZADATAK 1.10 Izvor zvuka oblika sfere, poluprečnika 1cm, nalazi se u slobodnom prostoru. Odrediti maksimalnu teorijsku vrednost zvučnog pritiska na udaljenosti 50 cm od sredine sfere ako izvor emituje zvučne talase na frekvenciji 50 Hz.

Rešenje: Maksimalna teorijska vrednost zvučnog pritiska na određenom rastojanju od centra sfere se dobija pri oscilovanju lopte sa maksimalnom amplitudom, koja iznosi, s obzirom na njene dimenzije, $A_\xi = 0.01 \text{ m}$.

Sfera osciluje po zakonu koji definiše pomeraj površine sfere i čestica u okolnoj sredini:

$$\xi(r, t) = \frac{A}{r} \sin(\omega t - kr) = A_\xi \sin(\omega t - kr).$$

Brzina oscilovanja čestica sredine kroz koju se prostire zvučni talas određena je prvim izvodom pomeraja čestica:

$$v(r, t) = \frac{\partial \xi(r, t)}{\partial t} = \omega A_\xi \cos(\omega t - kr) = A_v \cos(\omega t - kr).$$

Efektivna vrednost brzine kojom osciluje površina sfere se određuje deljenjem amplitude kvadratnim korenom broja 2:

$$v_1 = \frac{A_v}{\sqrt{2}} = \frac{\omega A_\xi}{\sqrt{2}} = 2\pi f \frac{A_\xi}{\sqrt{2}} = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot \frac{0.01}{\sqrt{2}} = 2.2 \text{ m/s}.$$

Proizvod fazne konstante i rastojanja definiše tip zvučnih talasa. Na površini sfere ima vrednost:

$$k r_1 = \frac{2\pi f}{c} r_1 = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{340} \cdot 0.01 = 9.2 \cdot 10^{-3} \ll 1.$$

Dakle, na površini sfere je proizvod fazne konstante i rastojanja mnogo manji od jedinice, tako da zvučni talasi na površini sfere imaju oblik sfernih talasa. U ovom slučaju se specifična akustička impedansa na površini sfere može aproksimirati izrazom:

$$Z_s(r = r_1) = \frac{p_1}{v_1} = \frac{\rho c k r_1}{\sqrt{1 + k^2 r_1^2}} \approx \rho c k r_1.$$

Efektivna vrednost zvučnog pritiska na površini sfere ima vrednost:

$$p_1 = v_1 \rho c k r_1 = 2.2 \cdot 400 \cdot 9.2 \cdot 10^{-3} = 8.1 \text{ Pa}.$$

Zvučni pritisak na bilo kojem rastojanju se može odrediti ukoliko je poznata vrednost zvučnog pritiska na nekom rastojanju (npr. površini sfere). Tako je zvučni pritisak na rastojanju 0.5 m od centra izvora zvuka:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{r_1}{r_2} \Rightarrow p_2 = p_1 \frac{r_1}{r_2} = 8.1 \cdot \frac{0.01}{0.5} = 0.162 \text{ Pa}.$$

ZADATAK 1.11. Tačkasti izvor zvuka zvučne snage 1.6 mW emituje zvučne talase u slobodnom prostoru na frekvenciji 340 Hz. Odrediti trenutnu vrednost zvučnog pritiska i brzine oscilovanja čestica elastične sredine na rastojanju 3 m od izvora, 10 s nakon uključenja.

Rešenje: Tačkasti izvor zvuka emituje sferne zvučne talase čiji se zvučni pritisak na površini talasnog fronta u obliku sfere poluprečnika r menja po zakonu:

$$p(r, t) = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr) = A_p \cos(\omega t - kr).$$

Efektivna vrednost zvučnog pritiska se određuje deljenjem amplitude kvadratnim korenom broja 2:

$$p = \frac{A_p}{\sqrt{2}} = \frac{A}{r\sqrt{2}}.$$

S druge strane, efektivna vrednost zvučnog pritiska za tačkaste izvore zvuka se može odrediti ukoliko je poznata zvučna snaga izvora primenom sledećeg izraza:

$$p = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\rho c P_a}{4\pi}}.$$

Izjednačavanjem izraza za efektivne vrednosti zvučnog pritiska može se odrediti nepoznata konstanta A u izrazu za trenutnu vrednost zvučnog pritiska:

$$\frac{A}{r\sqrt{2}} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\rho c P_a}{4\pi}} \Rightarrow A = \sqrt{\frac{\rho c P_a}{2\pi}}.$$

Izraz za trenutnu vrednost zvučnog pritiska sada ima oblik:

$$p(r, t) = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\rho c P_a}{2\pi}} \cos\left(2\pi f t - \frac{2\pi f}{c} r\right).$$

Trenutna vrednost zvučnog pritiska na rastojanju 3 m od izvora i 10 s nakon njegovog uključenja ima vrednost:

$$p(3, 10) = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{400 \cdot 1.6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3.14}} \cos\left(2 \cdot 3.14 \cdot 340 \cdot 10 - \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 340}{340} \cdot 3\right) = -0.0185 \text{ Pa}.$$

Proizvod fazne konstante i rastojanja definiše tip zvučnih talasa. Na rastojanju 3 m od izvora ima vrednost:

$$kr = \frac{2\pi f}{c} r = \frac{2\pi \cdot 340}{340} \cdot 3 = 6\pi \gg 1.$$

Dakle, na rastojanju 3 m od izvora je proizvod fazne konstante i rastojanja mnogo veći od jedinice, tako da zvučni talasi imaju oblik ravanskih talasa. U ovom slučaju se specifična akustička impedansa može aproksimirati izrazom:

$$Z_s = \frac{p(3, 10)}{v(3, 10)} = \frac{\rho c k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} \approx \rho c.$$

Trenutna vrednost brzine oscilovanja čestica sredine na rastojanju 3 m od izvora ima vrednost:

$$v(3, 10) = \frac{p(3, 10)}{\rho c} = -\frac{0.0185}{400} = -4.63 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}.$$

ZADATAK 1.12 Izvor ravanskih zvučnih talasa emituje zvučne talase na frekvenciji 500 Hz. Ako čestice elastične sredine osciluju amplitudom pomeraja 10 μm , odrediti efektivnu vrednost zvučnog pritiska i gustinu energije zvuka formiranog zvučnog polja.

Rešenje: Čestice sredine pod dejstvom ravanskih zvučnih talasa osciluju po zakonu:

$$\xi(x, t) = A_\xi \sin(\omega t - kx).$$

Relacije koje povezuju trenutnu vrednost pomeraja sa trenutnim vrednostima zvučnog pritiska i brzine oscilovanja čestica elastične sredine:

$$p(x,t) = -K \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial x}, \quad v(x,t) = \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial t},$$

omogućavaju određivanje izraza za izračunavanje trenutnih vrednosti zvučnog pritiska i brzine oscilovanja:

$$p(x,t) = -K \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial x} = KkA_{\xi} \cos(\omega t - kx) = A_p \cos(\omega t - kx),$$

$$v(x,t) = \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial t} = \omega A_{\xi} \cos(\omega t - kx) = A_v \cos(\omega t - kx).$$

Amplitude zvučnog pritiska i brzine oscilovanja imaju vrednosti:

$$A_p = KkA_{\xi} = \rho c^2 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 400 \cdot 500 \cdot 10^{-5} = 12.56 \text{ Pa},$$

$$A_v = \omega A_{\xi} = 2\pi f A_{\xi} = 2 \cdot 3.14 \cdot 500 \cdot 10^{-2} = 3.14 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}^2.$$

Gustina energije zvuka je određena proizvodom efektivnih vrednosti zvučnog pritiska i brzine oscilovanja čestica:

$$E = \frac{pv}{c} = \frac{A_p A_v}{c\sqrt{2}\sqrt{2}} = \frac{A_p A_v}{2c} = \frac{12.56 \cdot 3.14 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 340} = 5.8 \cdot 10^{-4} \text{ J/m}^3$$

U gornjem izrazu su efektivne vrednosti veličina određene deljenjem amplituda kvadratnim korenom broja 2.

ZADATAK 1.13 Sferni izvor zvuka emituje zvučne talase u slobodnom prostoru na frekvenciji 100 Hz. Amplituda zvučnog pritiska, na rastojanju 1 m od izvora zvuka, ima vrednost 4 Pa. Odrediti:

- zvučnu snagu sfernog izvora zvuka i intenzitet zvuka na rastojanju 1 m od izvora zvuka,
- brzinu oscilovanja čestica elastične sredine i zvučni pritisak na rastojanju 10 m od izvora zvuka.

Rešenje: Sferni izvor zvuka emituje sferne zvučne talase čiji se zvučni pritisak na površini talasnog fronta, u obliku sfere poluprečnika r , menja po zakonu:

$$p(r,t) = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr) = A_p \cos(\omega t - kr).$$

Amplituda zvučnog pritiska zavisi od rastojanja do izvora zvuka:

$$A_p = \frac{A}{r},$$

gde je A - konstanta koja zavisi od karakteristika izvora zvuka (zvučne snage i direktivnosti izvora).

- Na rastojanju 1 m od izvora zvuka se efektivna vrednost zvučnog pritiska određuje deljenjem amplitude na tom rastojanju kvadratnim korenom broja 2.

$$p_1 = \frac{A_p}{\sqrt{2}} = \frac{4}{\sqrt{2}} = 2.83 \text{ Pa}.$$

Efektivna vrednost intenziteta zvuka određena je kvadratom zvučnog pritiska:

$$I = \frac{p^2}{\rho c},$$

tako da na rastojanju 1 m od izvora ima vrednost:

$$I_1 = \frac{p_1^2}{\rho c} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2.$$

Intenzitet zvuka, s druge strane, opada sa kvadratom rastojanja i zavisi od zvučne snage:

$$I = \frac{P_a}{4\pi r^2}.$$

Poznavanje intenziteta zvuka na nekom rastojanju omogućava određivanje zvučne snage izvora:

$$P_a = 4\pi r_1^2 I_1 = 4 \cdot 3.14 \cdot 1^2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 0.251 \text{ W}.$$

- Intenzitet zvuka se može povezati sa zvučnim pritiskom i zvučnom snagom izvora izrazima:

$$I = \frac{p^2}{\rho c}, I = \frac{P_a}{4\pi r^2},$$

koji omogućavaju izvođenje zavisnosti zvučnog pritiska od zvučne snage:

$$\frac{p^2}{\rho c} = \frac{P_a}{4\pi r^2} \Rightarrow p = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\rho c P_a}{4\pi}}.$$

Gornji izraz omogućava da se izračuna vrednost zvučnog pritiska na bilo kojem rastojanju, ako je poznata zvučna snaga izvora:

$$p_2 = \frac{1}{r_2} \sqrt{\frac{\rho c P_a}{4\pi}} = \frac{1}{10} \sqrt{\frac{400 \cdot 0.251}{4 \cdot 3.14}} = 0.283 \text{ Pa}.$$

Proizvod fazne konstante i rastojanja definiše tip zvučnih talasa. Na rastojanju 10 m od izvora ima vrednost:

$$kr_2 = \frac{2\pi f}{c} r_2 = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 100}{340} \cdot 10 = 18.5 \gg 1.$$

Dakle, na rastojanju 10 m od izvora je proizvod fazne konstante i rastojanja mnogo veći od jedinice, tako da zvučni talasi imaju oblik ravanskih talasa. U ovom slučaju se specifična akustička impedansa može aproksimirati izrazom:

$$Z_s = \frac{p_2}{v_2} = \frac{\rho c k r_2}{\sqrt{1 + k^2 r_2^2}} \approx \rho c.$$

Brzina oscilovanja čestica sredine na rastojanju 10m od izvora ima vrednost:

$$v_2 = \frac{p_2}{\rho c} = \frac{0.283}{400} = 7.1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}.$$

ZADATAK 1.14 Intenzitet tačkastog izvora zvuka, koji zrači akustičku energiju na učestanosti 100 Hz, iznosi 0.1 mW/m^2 na rastojanju 1 m od izvora zvuka. Odrediti koliki je zvučni pritisak, brzina oscilovanja čestica elastične sredine, kao i gustina energije zvuka pri idealnim uslovima nastajanja i prostiranja zvučnih talasa.

Rešenje: Relacija koja povezuje intenzitet zvuka sa zvučnim pritiskom omogućava određivanje zvučnog pritiska na istom rastojanju:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \Rightarrow p = \sqrt{I \rho c} = \sqrt{0.1 \cdot 400} = 0.2 \text{ Pa}.$$

Proizvod fazne konstante i rastojanja definiše tip zvučnih talasa. Na rastojanju 1 m od izvora ima vrednost:

$$kr = \frac{2\pi f}{c} r = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 100}{340} \cdot 1 = 1.84.$$

Kosinus faznog pomeraja zvučnog pritiska i brzine oscilovanja, φ , ima vrednost:

$$\cos \varphi = \frac{kr}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} = \frac{1.84}{\sqrt{1 + (1.84)^2}} = 0.88.$$

Specifična akustička impedansa povezuje veličine zvučnog pritiska i brzine oscilovanja i može se odrediti pomoću izraza:

$$Z_s = \frac{p}{v} = \frac{\rho c k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} = \rho c \cos \varphi,$$

odakle se može odrediti brzina oscilovanja čestica sredine:

$$v = \frac{p}{\rho c \cos \varphi} = \frac{0.2}{400 \cdot 0.88} = 5.68 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}.$$

Gustina energije zvuka definisana je zvučnim pritiskom i brzinom oscilovanja:

$$E = \frac{1}{2} \left[\frac{p^2}{\rho c^2} + \rho v^2 \right].$$

Gornji izraz se može transformisati da omogućava određivanje gustine energije na osnovu već određenih veličina:

$$E = \frac{1}{2} \left[\frac{p^2}{\rho c^2} + \rho \frac{p^2}{(\rho c \cos \varphi)^2} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{p^2}{\rho c^2} + \frac{p^2}{\rho c^2 \cos^2 \varphi} \right] = \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{\rho c^2} \left(1 + \frac{1}{\cos^2 \varphi} \right).$$

Konačno, gustina energije ima vrednost:

$$E = \frac{1}{2} \frac{(0.2)^2}{400 \cdot 340} \left(1 + \frac{1}{(0.88)^2} \right) = 3.37 \cdot 10^{-7} \text{ J/m}^3.$$

1.3 Subjektivna jačina složenog zvuka

ZADATAK 1.15 U tabeli su dati rezultati merenja zvuka na centralnim frekvencijama terci. Odrediti nivo zvuka koji bi pokazao instrument sa linearnom frekvencijskom karakteristikom i subjektivnu jačinu složenog zvuka.

f_0 [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
L [dB]	62	68	72	74	72	70	60	64	74	76	68	64

Rešenje: Ukupni nivo emitovanog složenog zvuka dobija se jednostavnim energijskim sabiranjem nivoa svih komponentata koje čine zvuk:

$$L = 10 \log \sum_{i=1}^{12} 10^{L_i/10} = 10 \log(10^{62/10} + 10^{68/10} + 10^{72/10} + 10^{74/10} + 10^{72/10} + 10^{70/10} + 10^{60/10} + 10^{64/10} + 10^{74/10} + 10^{76/10} + 10^{68/10} + 10^{64/10}) = 81.8 \text{ dB}.$$

Subjektivna jačina složenog zvuka širokog spektra, koji sadrži veoma veliki broj gusto raspoređenih komponentata koje pokrivaju široki opseg frekvencija, određuje se primenom Stivensenove metode, polazeći od spektra složenog zvuka po tercama.

Za svaku centralnu frekvenciju terce se sa Stivensenovog dijagrama određuje indeks glasnosti u sonima, S_i , na osnovu nivoa zvuka tercnog opsega. Rezultati očitavanja prikazani su u tabeli:

f_0 [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
L [dB]	62	68	72	74	72	70	60	64	74	76	68	64
S_i [son]	2.45	4.32	6.21	7.41	7.01	6.61	3.8	5.2	9.9	11.8	7.8	6.6

Ukupna glasnost složenog zvuka, S , određuje se primenom formule kojom se daje određena prednost terci sa najvećim indeksom glasnošću, $S_{\max}$:

$$S = S_{\max} + F \left(\sum_i S_i - S_{\max} \right).$$

Koeficijent F uzima u obzir pojasnu širinu korišćenog filtra i efekat maskiranja. Ima vrednost 0.15 za terčni spektar složenog zvuka. Za podatke date u tabeli:

$$S = 11.8 + 0.15[(2.45 + 4.32 + 6.21 + 7.41 + 7.01 + 6.61 + 3.8 + 5.2 + 9.9 + 11.8 + 7.8 + 6.6) - 11.8] = 21.9 \text{ son}.$$

Subjektivna jačina složenog zvuka se nalazi iz relacije koja povezuje subjektivnu jačinu i glasnost zvuka:

$$\Lambda = 40 + 33 \log S = 40 + 33 \log(21.9) = 84.5 \text{ fon}.$$

Iz praktičnih razloga, koji podrazumevaju da smanjivanje broja očitavanja indeksa glasnosti utiče na smanjivanje mogućnosti greške, subjektivna jačina se može odrediti iz preračunatog oktavnog spektra složenog zvuka na osnovu poznatog tercnog spektra. Tercne nivoe je potrebno prethodno pretvoriti u oktavne energijskim sabiranjem nivoa tri susedne terce. Za svaku centralnu frekvenciju oktave, na osnovu nivoa zvuka oktavnog opsega, sa Stivensenovog dijagrama se određuje indeks glasnosti u sonima, S_i . Postupak je na dalje isti kao i kod terčnih nivoa, s tom razlikom što koeficijent F ima vrednost 0.3. Rezultati preračunavanja oktavnih nivoa i očitavanja indeksa glasnosti dati su u tabeli:

f_0 [Hz]	100	125	160	200	250	315	400		500	630	800	1000	1250
L [dB]	62	68	72	74	72	70	60		64	74	76	68	64
$L = 10 \log \sum_{i=1}^3 10^{L_i/10}$ oktavni nivo [dB]	$10 \log(10^{6.2} + 10^{6.8} + 10^{7.2}) = 73.8$			$10 \log(10^{7.4} + 10^{7.2} + 10^{7.0}) = 77.1$				$10 \log(10^6 + 10^{6.4} + 10^{7.4}) = 74.6$			$10 \log(10^{7.6} + 10^{6.8} + 10^{6.4}) = 76.9$		
S_i [son]	6.53			9.37				9.67			13.41		

Ukupna glasnost složenog zvuka, S , određena preko oktavnih nivoa ima vrednost:

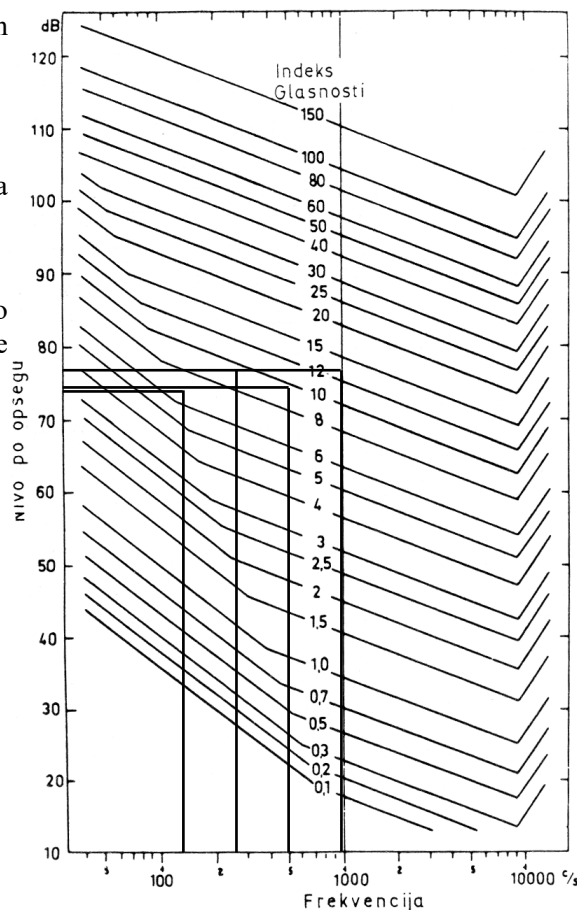
$$S = 13.41 + 0.3[(6.53 + 9.37 + 9.67 + 13.41) - 13.41],$$

$$S = 21.98 \text{sona.}$$

Subjektivna jačina složenog zvuka se nalazi iz relacije koja povezuje subjektivnu jačinu i glasnost zvuka:

$$\Lambda = 40 + 33 \log S = 40 + 33 \log(21.98) = 84.5 \text{ fona.}$$

Primenom oba načina dobija se ista subjektivna jačina, što favorizuje korišćenje oktavnog metoda za određivanje subjektivne jačine složenog zvuka.



ZADATAK 1.16 Generator zvuka proizvodi zvuk koji se propušta kroz filter propusnog opsega od 50 do 3200 Hz i preko zvučnika emituje u slobodan prostor. Spektar emitovanog zvuka je takav da je energija po jedinici frekvencije jednaka. Ukupni nivo emitovanog zvuka je 80 dB. Odrediti subjektivnu jačinu i glasnost složenog zvuka.

Rešenje: Generator zvuka proizvodi zvuk čija je energija po jedinici frekvencije jednaka. Ako se emitovani spektar posmatra po oktavama, onda je u svakoj narednoj oktavi energija emitovanog zvuka (intenzitet zvuka) dvostruko veća nego u prethodnoj, jer svaka naredna oktava ima dva puta širi frekvencijski opseg od prethodne. Frekvencijski opseg emitovanog zvuka se može podeliti u 6 oktava, čije su granične frekvencije date u drugoj vrsti tabele. Granične frekvencije su određene imajući na umu da je za oktavne opsege gornja granična frekvencija dvostruko veća od donje.

Centralne frekvencije oktava, f_0 [Hz], određene su kao geometrijska sredina gornje, f_g [Hz], i donje granične frekvencije, f_d [Hz]:

$$f_0 = \sqrt{f_d f_g}.$$

f [Hz]	50-100	100-200	200-400	400-800	800-1600	1600-3200
f_0 [Hz]	$\sqrt{50 \cdot 100}$ = 70	$\sqrt{100 \cdot 200}$ = 140	$\sqrt{200 \cdot 400}$ = 280	$\sqrt{400 \cdot 800}$ = 560	$\sqrt{800 \cdot 1300}$ = 1120	$\sqrt{1600 \cdot 3200}$ = 2240
I	I_1	$2 I_1$	$4 I_1$	$8 I_1$	$16 I_1$	$32 I_1$
L [dB]	62	65	68	71	74	77
S_i [son]	2	4	5.5	8	12.3	17.5

Ukupni intenzitet zvuka se određuje kao zbir intenziteta zvuka po oktavama:

$$I_u = \sum_{i=1}^6 I_i = I_1 + 2I_1 + 4I_1 + 8I_1 + 16I_1 + 32I_1 = 63I_1.$$

Ukupni nivo zvuka od 80 dB transformacijom se svodi na izraz:

$$L = 10 \log \frac{I_u}{I_0} = 10 \log \frac{63I_1}{I_0} = 10 \log \frac{I_1}{I_0} + 10 \log 63,$$

$$L = L_1 + 10 \log 63,$$

iz kojeg se može izračunati nivo zvuka koji odgovara intenzitetu zvuka I_1 :

$$L_1 = L - 10 \log 63 = 62 \text{ dB}.$$

Intenzitet zvuka po oktavama se udvostručuje, tako da je nivo zvuka po oktavama za 3 dB veći u odnosu na prethodnu oktavu:

$$L_2 = L_1 + 3 \text{ dB} = 65 \text{ dB}, L_3 = L_2 + 3 \text{ dB} = 68 \text{ dB},$$

$$L_4 = L_3 + 3 \text{ dB} = 71 \text{ dB}, L_5 = L_4 + 3 \text{ dB} = 74 \text{ dB},$$

$$L_6 = L_5 + 3 \text{ dB} = 77 \text{ dB}.$$

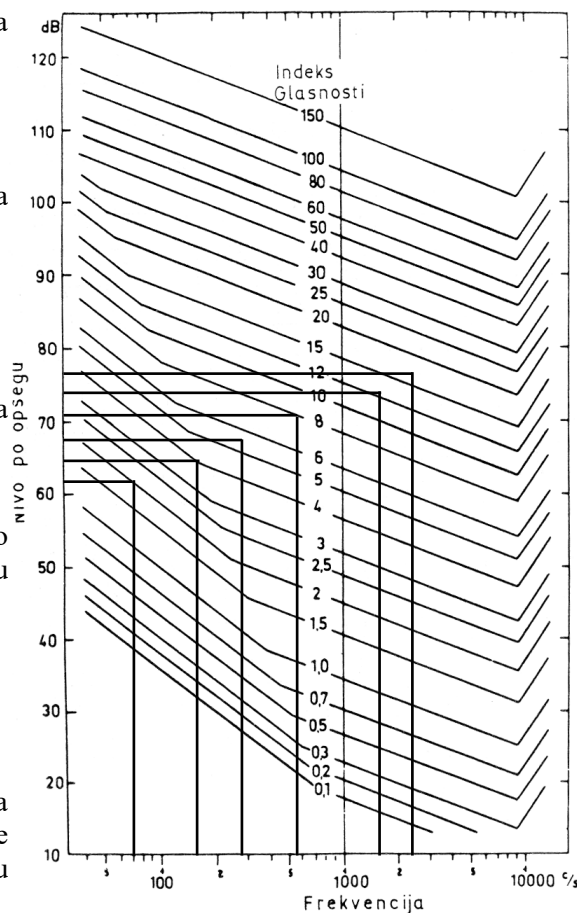
Za svaku centralnu frekvenciju oktave, na osnovu nivoa zvuka oktavnog opsega, sa Stivensenovog dijagrama se određuje indeks glasnosti u sonima, S_i . Rezultati očitavanja su prikazani u tabeli.

Ukupna glasnost složenog zvuka, S , određena preko oktavnih nivoa, ima vrednost:

$$S = 17.5 + 0.3[(2 + 4 + 5.5 + 8 + 12.3 + 17.5) - 17.5] = 27 \text{ son}.$$

Subjektivna jačina složenog zvuka se nalazi iz relacije koja povezuje subjektivnu jačinu i glasnost zvuka:

$$\Lambda = 40 + 33 \log S = 40 + 33 \log(27) = 87.2 \text{ fon}.$$



2. IZVORI BUKE

2.1 Tačkasti izvori buke

ZADATAK 2.1 Oko male mašine koja se smeštena na tvrdoj podlozi na otvorenom prostoru meren je nivo buke na rastojanju od 4 m od mašine. Merenje A-ponderisanog nivoa je izvršeno na polusferi u četiri podjednako udaljena pravca (sever – 76 dB, istok – 80 dB, jug – 78 dB, zapad - 82) i direktno iznad mašine – 84 dB. Izračunati A-ponderisani nivo zvučne snage mašine, indeks usmerenosti izvora buke u sva četiri pravca i A-ponderisani nivo buke na rastojanju 10 m od mašine u svim pravcima.

Rešenje: Indeks usmerenosti izvora buke se izračunava kao razlika izmerenih nivoa buke u odgovarajućem pravcu i usrednjenog nivoa buke na polusferi koji se izračunava kao:

$$\bar{L}_{pA} = 10 \log \frac{1}{5} (10^{0.1 \cdot L_{pA1}} + 10^{0.1 \cdot L_{pA2}} + 10^{0.1 \cdot L_{pA3}} + 10^{0.1 \cdot L_{pA4}} + 10^{0.1 \cdot L_{pA5}}) \text{ [dB]}$$
$$\bar{L}_{pA} = 10 \log \frac{1}{5} (10^{7.6} + 10^{7.8} + 10^8 + 10^{8.2} + 10^{8.4}) = 81 \text{ dB}$$

Izračunati usrednjeni nivo buke je za slučaj kada se izvor buke nalazi na tvrdoj podlozi i emituje buke u polusferu. Ako izvor emituje buku u sferu (bez tvrde podloge ispod mašine) usrednjeni nivo buke biće manji za 3 dB:

$$\bar{L}_{pA} = 78 \text{ dB}.$$

Indeks usmerenosti izvora buke se može izračunati kao:

$$G = L_{pA} - \bar{L}_{pA}.$$

Tako da je:

$$\begin{aligned} G_S &= 76 - 78 = -2 \text{ dB} \\ G_J &= 78 - 78 = 0 \text{ dB} \\ G_I &= 80 - 78 = 2 \text{ dB} \\ G_Z &= 82 - 78 = 4 \text{ dB} \\ G_G &= 84 - 78 = 6 \text{ dB} \end{aligned}$$

Izračunate vrednosti za indeks usmerenosti uključuju indeks usmerenosti samog izvora zvuka i indeks usmerenosti +3 dB zbog pozicije izvora buke na tvrdoj podlozi.

Zvučna snaga se može dobiti iz jednačine koja daje vezu zvučnog pritiska i zvučne snage izvora buke za tačkasti izvor buke:

$$\begin{aligned} L_{pA} &= L_{WA} + G - 20 \log r - 11 \\ L_{WA} &= L_{pA} - G + 20 \log r + 11 \end{aligned}$$

Ako se koriste vrednosti za sever:

$$L_{WA} = 76 - (-2) + 20 \log 4 + 11 = 101 \text{ dB}.$$

Ista vrednost se dobija i pri korišćenju podataka za druge pravce, npr. za jug:

$$L_{WA} = 78 - 0 + 20 \log 4 + 11 = 101 \text{ dB}.$$

A-ponderisani nivoi zvučnog pritiska u svim pravcima se sada mogu izračunati kao:

$$L_{pA} = L_{WA} + G - 20 \log r - 11.$$

Tako da je:

$$L_{pA(S)} = L_{WA} + G_S - 20 \log r - 11 = 101 - 2 - 20 - 11 = 68 \text{ dB}$$

$$L_{pA(J)} = L_{WA} + G_J - 20 \log r - 11 = 101 + 0 - 20 - 11 = 70 \text{ dB}$$

$$L_{pA(I)} = L_{W1} + G_J - 20 \log r - 11 = 101 + 2 - 20 - 11 = 72 \text{ dB}$$

$$L_{pA(Z)} = L_{WZ} + G_J - 20 \log r - 11 = 101 + 4 - 20 - 11 = 74 \text{ dB}$$

Slabljenje nivoa buke od tačke na rastojanju 4 m do rastojanja od 10 m može se izračunati i kao:

$$\Delta L = 20 \log \frac{r_2}{r_1} = 20 \log \frac{10}{4} = 20 \log 10 - 20 \log 4 = 20 - 12 = 8 \text{ dB}$$

2.2 Niz tačkastih izvora

ZADATAK 2.2 Deset tačkastih izvora buke iste zvučne snage od 1 mW nalaze se na istoj liniji na međusobnom rastojanju od 1 m.

- Odrediti nivo buke u tački R koja se nalazi na rastojanju 10 m od linije izvora i pod uglom od 10° u odnosu na prvi izvor buke u nizu;
- Odrediti nivo buke u istoj tački za slučaj beskonačnog broja izvora.

Rešenje: a) Za konačan broj tačkastih izvora buke, istog nivoa zvučne snage L_{W1} , koji se nalaze na međusobnom rastojanju b , nivo buke na rastojanju r_0 od linije izvora se može izračunati primenom izraza:

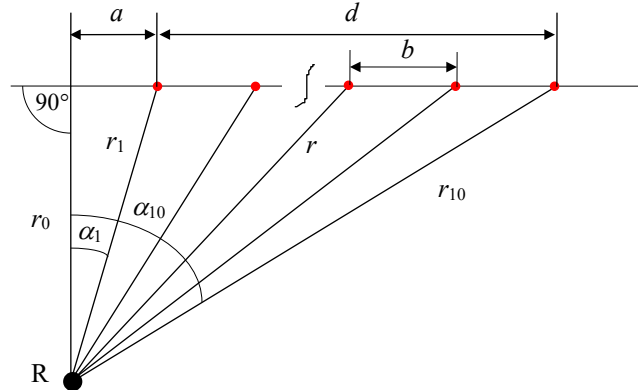
$$L_p = L_{W1} + 10 \log \left(\frac{\alpha_{10} - \alpha_1}{r_0 b} \right) + \Delta L - 8,$$

gde je α_1 - ugao pod kojim se iz prijemne tačke vidi prvi izvor u nizu tačkastih izvora:

$$\alpha_1 [\text{rad}] = \frac{\pi}{180^\circ} \alpha_1 [^\circ] = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot 10^\circ = \frac{\pi}{18}.$$

Broj tačkastih izvora buke je veći od 3. Takođe, važi da je:

$$\frac{r_0}{b \cos \alpha_1} = \frac{10}{\cos \frac{\pi}{18}} = 10.15 > \frac{1}{\pi},$$



čime su ispunjena oba uslova da se korekcionni faktor ΔL može zanemariti, $\Delta L \approx 0$.

Međusobno rastojanje prvog i zadnjeg izvora u nizu ima vrednost:

$$d = (n-1)b = (10-1) \cdot 1 = 9 \text{ m}.$$

Rastojanje a sa slike se određuje kao:

$$a = r_0 \tan \alpha_1 = 10 \tan \frac{\pi}{18} = 1.76 \text{ m},$$

tako da je ugao pod kojim se sa pozicije prijemne tačke vidi zadnji izvor u nizu:

$$\alpha_{10} = \arctg \frac{a+d}{r_0} = \arctg \frac{1.76+9}{10} = 0.82 \text{ rad} = (47^\circ).$$

Nivo zvučne snage jednog tačkastog izvora buke ima vrednost:

$$L_{W1} = 10 \log \frac{P_a}{P_0} = 10 \log \frac{10^{-3}}{10^{-12}} = 90 \text{ dB}.$$

Nivo buke na poziciji tačke R je:

$$L_p = L_{W1} + 10 \log \left(\frac{\alpha_{10} - \alpha_1}{r_0 b} \right) + \Delta L - 8 = 90 + 10 \log \left(\frac{0.82 - \pi/18}{10} \right) - 8 = 70.1 \text{ dB}.$$

b) Za slučaj beskonačnog broja tačkastih izvora buke, razlika uglova pod kojima se sa pozicije prijemne tačke vide prvi i zadnji izvor u nizu teži π , tako da je nivo buke na poziciji prijemne tačke:

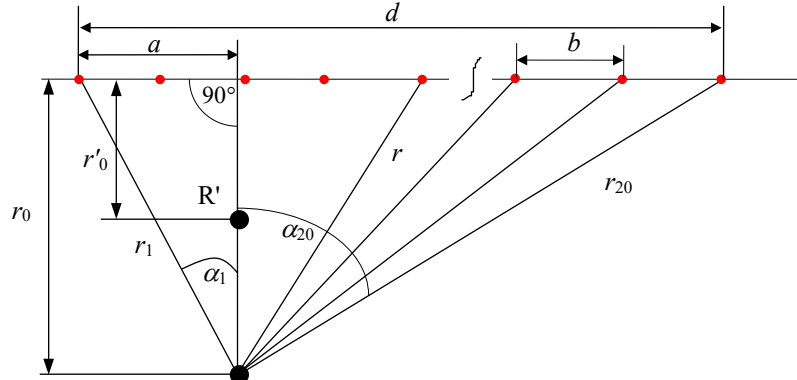
$$L_p = L_{W_1} + 10 \log \left(\frac{\alpha_n - \alpha_1}{r_0 b} \right) - 8,$$

$$L_p = L_{W_1} + 10 \log \left(\frac{\pi}{r_0 b} \right) - 8 = L_{W_1} - 10 \log r_0 b + 10 \log \pi - 8 = L_{W_1} - 10 \log r_0 b + 5 - 8 = L_{W_1} - 10 \log r_0 b - 3,$$

$$L_p = 90 - 10 \log 10 - 3 = 77 \text{ dB}.$$

ZADATAK 2.3. Dvadeset tačkastih izvora buke iste zvučne snage se nalaze na istoj liniji na međusobnom rastojanju od 0.5 m. U tački R, koja se nalazi na rastojanju 30 m od linije izvora i pod uglom od -10° u odnosu na prvi izvor, izmeren je nivo buke od 110 dB. Odrediti zvučnu snagu izvora i nivo buke u tački R' koja se nalazi na istoj liniji kao i tačka R, na rastojanju 15 m od linije izvora.

Rešenje:



Za konačan broj tačkastih izvora buke istog nivoa zvučne snage L_{W_1} , koji se nalaze na međusobnom rastojanju b , nivo buke na rastojanju r_0 od linije izvora se može izračunati primenom izraza:

$$L_p = L_{W_1} + 10 \log \left(\frac{\alpha_{20} - \alpha_1}{r_0 b} \right) + \Delta L - 8,$$

gde je α_1 - ugao pod kojim se iz prijemne tačke vidi prvi izvor u nizu tačkastih izvora:

$$\alpha_1 [\text{rad}] = \frac{\pi}{180^\circ} \alpha_1 [^\circ] = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot (-10^\circ) = -\frac{\pi}{18}.$$

Broj tačkastih izvora buke je veći od 3. Takođe, važi da je:

$$\frac{r_0}{b \cos \alpha_1} = \frac{30}{0.5 \cos(-\frac{\pi}{18})} = 61 > \frac{1}{\pi},$$

čime su ispunjena oba uslova da se korekcionni faktor ΔL može zanemariti.

Međusobno rastojanje prvog i zadnjeg izvora u nizu ima vrednost:

$$d = (n-1)b = (20-1) \cdot 0.5 = 9.5 \text{ m}.$$

Rastojanje a sa slike određuje se kao:

$$a = r_0 \operatorname{tg} \alpha_1 = 30 \left| \operatorname{tg} \left(-\frac{\pi}{18} \right) \right| = 5.3 \text{ m},$$

tako da je ugao pod kojim se sa pozicije prijemne tačke vidi zadnji izvor u nizu:

$$\alpha_{20} = \operatorname{arctg} \frac{d-a}{r_0} = \operatorname{arctg} \frac{9.5-5.3}{30} = 0.14 \text{ rad} = (8^\circ).$$

Nivo zvučne snage jednog tačkastog izvora buke se određuje na osnovu poznatog nivoa buke na rastojanju 30 m od linije izvora i izračunatih parametara:

$$L_{W_1} = L_p - 10 \log \left(\frac{\alpha_{20} - \alpha_1}{r_0 b} \right) + 8 = 110 - 10 \log \left(\frac{0.14 + \pi/18}{30 \cdot 0.5} \right) + 8 = 134.8 \text{ dB}.$$

Zvučna snaga izvora buke je određena nivoom zvučne snage:

$$L_{W_1} = 10 \log \frac{P_a}{P_0} \Rightarrow P_a = P_0 10^{0.1 L_{W_1}} = 10^{-12} \cdot 10^{13.48} = 30.2 \text{ W}.$$

Kada je poznata zvučna snaga tačkastih izvora buke, nivo buke se može odrediti na bilo kojem rastojanju od linije izvora. Prethodno je potrebno odrediti uglove pod kojima se sa pozicije nove prijemne tačke vide prvi i zadnji izvor buke u nizu:

$$\alpha'_1 = -\arctg \frac{a}{r'_0} = \arctg \frac{5.3}{15} = -0.34 \text{ rad} (= -19.5^\circ),$$

$$\alpha'_{20} = \arctg \frac{9.5 - 5.3}{15} = 0.27 \text{ rad} (= 15.6^\circ).$$

I u ovoj tački su ispunjena oba uslova da se korekcionni faktor ΔL može zanemariti, $\Delta L \approx 0$, jer je:

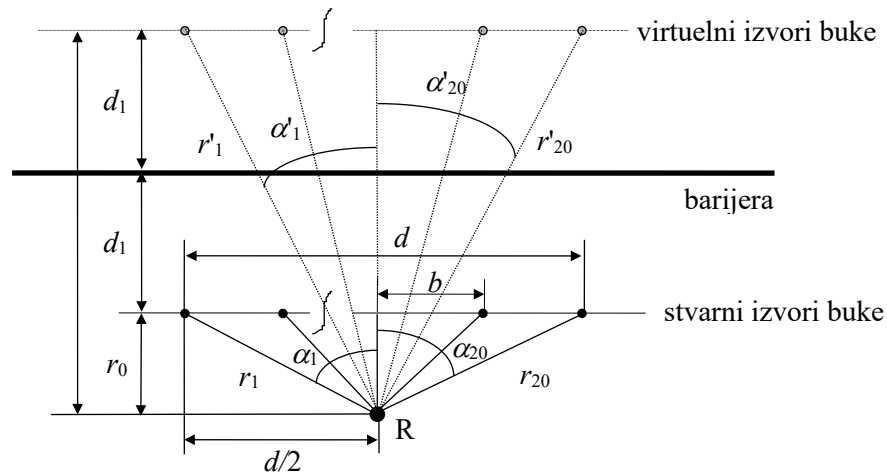
$$\frac{r'_0}{b \cos \alpha'_1} = \frac{15}{0.5 \cos(-0.34)} = 31.8 > \frac{1}{\pi},$$

tako da je nivo buke na rastojanju 15 m od linije izvora:

$$L_p = L_{W_1} + 10 \log \left(\frac{\alpha'_{20} - \alpha'_1}{r'_0 b} \right) - 8 = 134.8 + 10 \log \left(\frac{0.27 + 0.34}{15 \cdot 0.5} \right) - 8 = 116 \text{ dB}.$$

ZADATAK 2.4 Dvadeset tačkastih izvora buke iste zvučne snage od 1 mW nalaze se na istoj liniji na međusobnom rastojanju od 1 m. Paralelno liniji izvora, na rastojanju 1.5 m, nalazi se beskonačna barijera. Odrediti nivo buke u tački R koja se nalazi na rastojanju 2.5 m od barijere i 1 m od linije izvora na sredini grupe izvora.

Rešenje:



Postavljanjem barijere za zvučnu zaštitu dolazi do povećanja nivoa buke na strani izvora buke zbog efekta reflektovanih zvučnih talasa od barijere. Dejstvo barijere na strani izvora buke i efekat reflektovanih zvučnih talasa se može zameniti virtuelnim izvorima buke čiji se položaj u odnosu na barijeru dobija kao lik u ogledalu. Barijera se tada može ukloniti i ukupni nivo buke odrediti kao energetski zbir nivoa koji potiču od stvarnih i virtuelnih izvora buke.

Nivo buke koji u tački R stvaraju stvarni izvori buke određen je jednačinom:

$$L_p = L_{W_1} + 10 \log \left(\frac{\alpha_{20} - \alpha_1}{r_0 b} \right) + \Delta L - 8.$$

Međusobno rastojanje prvog i zadnjeg izvora u nizu ima vrednost:

$$d = (n - 1)b = (20 - 1) \cdot 1 = 19 \text{ m}.$$

Uglovi pod kojim se sa pozicije prijemne tačke vidi prvi i zadnji izvor u nizu stvarnih izvora buke sa pozicije tačke R, s obzirom da se tačka nalazi na sredini grupe izvora, jednaki su po apsolutnim vrednostima i određuju se kao:

$$-\alpha_1 = \alpha_{20} = \operatorname{arctg} \frac{d/2}{r_0} = \operatorname{arctg} \frac{19/2}{1} = 1.47 \text{ rad } (= 84^\circ).$$

Ispunjena su oba uslova da se korekcionni faktor ΔL može zanemariti, broj izvora je veći od 3 i važi:

$$\frac{r_0}{b \cos \alpha_1} = \frac{1}{\cos(-1.47)} = 9.9 > \frac{1}{\pi}.$$

Nivo zvučne snage jednog tačkastog izvora buke ima vrednost:

$$L_{W_1} = 10 \log \frac{P_a}{P_0} = 10 \log \frac{10^{-3}}{10^{-12}} = 90 \text{ dB},$$

tako da je nivo buke u tački R koji generiše stvarni izvori buke:

$$L_p = L_{W_1} + 10 \log \left(\frac{\alpha_{20} - \alpha_1}{r_0 b} \right) - 8 = 90 + 10 \log \left(\frac{1.47 + 1.47}{1 \cdot 1} \right) - 8 = 86.7 \text{ dB}.$$

Nivo buke koji u tački R stvaraju virtuelni izvori buke određen je jednačinom:

$$L'_p = L_{W_1} + 10 \log \left(\frac{\alpha'_{20} - \alpha'_1}{r'_0 b} \right) - 8.$$

Tačka R je od linije virtuelnih izvora buke udaljena za:

$$r'_0 = r_0 + 2d_1 = 1 + 2 \cdot 1.5 = 4 \text{ m}.$$

Međusobno rastojanje prvog i zadnjeg izvora u nizu ima istu vrednost kao i kod stvarnih izvora buke. Uglovi pod kojima se sa pozicije prijemne tačke vidi prvi i zadnji izvor u nizu virtuelnih izvora buke sa pozicije tačke R su jednaki po apsolutnim vrednostima i određuju se kao:

$$-\alpha'_1 = \alpha'_{20} = \operatorname{arctg} \frac{d/2}{r'_0} = \operatorname{arctg} \frac{19}{4} = 1.17 \text{ rad } (= 67.2^\circ).$$

Ispunjena su oba uslova da se korekcionni faktor ΔL može zanemariti, broj izvora je veći od 3 i važi:

$$\frac{r'_0}{b \cos \alpha'_1} = \frac{4}{\cos(1.17)} = 10.2 > \frac{1}{\pi}.$$

Nivo buke u tački R koji generišu virtuelni izvori buke:

$$L'_p = L_{W_1} + 10 \log \left(\frac{\alpha'_{20} - \alpha'_1}{r'_0 b} \right) - 8 = 90 + 10 \log \left(\frac{1.17 + 1.17}{4} \right) - 8 = 79.7 \text{ dB}.$$

Ukupni nivo buke se određuje kao energijska suma nivoa buke koji stvaraju stvarni i virtuelni izvori buke:

$$L_R = 10 \log(10^{0.1 L_p} + 10^{0.1 L'_p}) = 10 \log(10^{8.67} + 10^{7.97}) = 87.5 \text{ dB}.$$

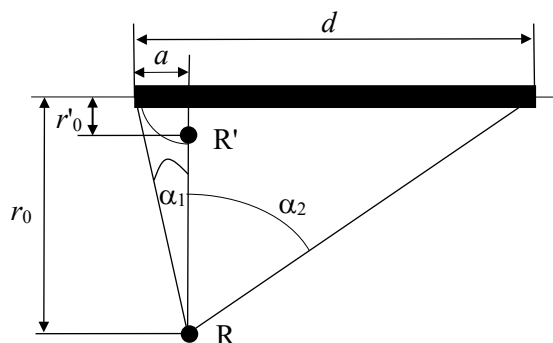
2.3 Linijski izvori

ZADATAK 2.5 Lokomotiva dužine 9.5 m stvara u tački R, koja se nalazi na rastojanju 30 m od linije izvora i pod uglom od -10° u odnosu na levi kraj lokomotive, nivo buke od 70 dB. Odrediti zvučnu snagu lokomotive i nivo buke u tački R' koja se nalazi na istoj liniji kao i tačka R, na rastojanju 1 m od linije izvora.

Rešenje: Lokomotiva kao izvor buke predstavlja linijski tip izvora koji na rastojanju r_0 generiše nivo buke koji zavisi od nivoa zvučne snage izvora po jedinici dužine i određuje se kao:

$$L_p = L_{WL} + 10 \log \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{r_0 d} \right) - 8,$$

gde je α_1 - ugao pod kojim se vidi levi kraj izvora (lokomotive) koji u radijanima ima vrednost:



$$\alpha_1[\text{rad}] = \frac{\pi}{180} \alpha_1[^\circ] = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot (-10^\circ) = -\frac{\pi}{18}.$$

Rastojanje a sa slike određuje se kao:

$$a = r_0 |\operatorname{tg} \alpha_1| = 30 \cdot \left| \operatorname{tg} \left(-\frac{\pi}{18} \right) \right| = 5.3 \text{ m},$$

tako da je ugao pod kojim se vidi desni kraj izvora buke:

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{d-a}{r_0} = \operatorname{arctg} \frac{9.5-5.3}{30} = 0.14 \text{ rad } (=8^\circ).$$

Nivo zvučne snage po jedinici dužine linijskog izvora se određuje na osnovu poznatog nivoa buke na rastojanju 30 m od linije izvora i izračunatih parametara:

$$L_{WL} = L_p - 10 \log \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{r_0 d} \right) + 8 = 70 - 10 \log \left(\frac{0.14 + \pi/18}{30 \cdot 9.5} \right) + 8 = 107.6 \text{ dB}.$$

Zvučna snaga po jedinici dužine lokomotive određena je nivoom zvučne snage i ima vrednost:

$$L_{WL} = 10 \log \frac{P'_a}{P_0} \Rightarrow P'_a = P_0 \cdot 10^{0.1 L_{WL}} = 10^{-12} \cdot 10^{10.76} = 57.5 \text{ mW}.$$

Ukupna zvučna snaga lokomotive se određuje kao:

$$P_a = P'_a \cdot d = 0.0575 \cdot 9.5 = 0.55 \text{ W}.$$

Kada je poznata zvučna snaga linijskog izvora buke, nivo buke se može odrediti na bilo kojem rastojanju od izvora. Prethodno je potrebno odrediti uglove pod kojima se sa pozicije nove prijemne tačke vide levi i desni kraj izvora buke:

$$\alpha'_1 = -\operatorname{arctg} \frac{a}{r'_0} = -\operatorname{arctg} \frac{5.3}{1} = -1.38 \text{ rad } (= -79.3^\circ),$$

$$\alpha'_2 = \operatorname{arctg} \frac{d-a}{r'_0} = \operatorname{arctg} \frac{9.5-5.3}{1} = 1.34 \text{ rad } (= 76.6^\circ).$$

Nivo buke na rastojanju 1 m od lokomotive ima vrednost:

$$L'_p = L_{WL} + 10 \log \left(\frac{\alpha'_2 - \alpha'_1}{r'_0 d} \right) - 8 = 107.6 + 10 \log \left(\frac{1.34 + 1.38}{9.5} \right) - 8 = 94.2 \text{ dB}.$$

ZADATAK 2.6 Na rastojanju 7.5 m od ose saobraćajnice izmeren je nivo od 75 dB pri prolasku jednog automobila. U istoj tački je izmeren je isti nivo buke pri prolasku niza identičnih automobila na jednakom međusobnom rastojanju. Izračunati nivo buke na rastojanju od 30 m od ose saobraćajnice za oba slučaja.

Rešenje: U prvom slučaju reče je o tačkastom izvoru zvuka pa je slabljenje zvuka:

$$\Delta L = 20 \log \frac{r_2}{r_1} = 20 \log \frac{30}{7.5} = 12 \text{ dB}.$$

U drugom slučaju reče je o linskom izvoru buke pa je slabljenje zvuka:

$$\Delta L = 10 \log \frac{r_2}{r_1} = 10 \log \frac{30}{7.5} = 6 \text{ dB}.$$

Nivo buke na rastojanju 30 m za prvi slučaj jednog automobila iznosi:

$$L_2 = L_1 - 12 = 75 - 12 = 63 \text{ dB},$$

a u drugom slučaju niza automobila:

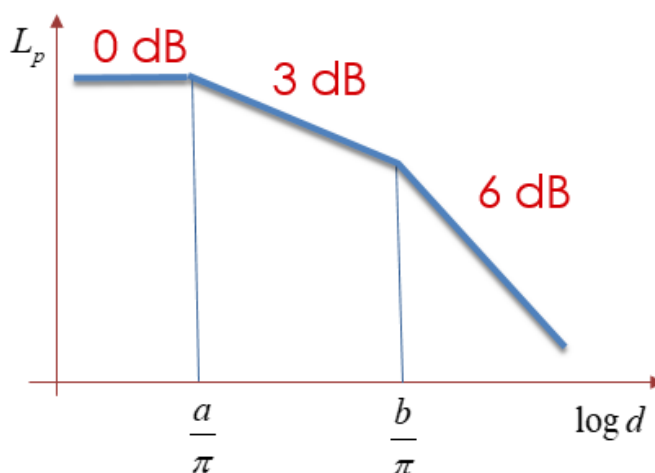
$$L_2 = L_1 - 6 = 75 - 6 = 69 \text{ dB}.$$

Dakle, iako je izmereni nivo buke na rastojanju od 7.5 m za oba slučaja bio isti, na rastojanju od 30 m se nivo buke razlikuje jer kod linijskih izvora buke nivo buke sporije opada.

2.4 Površinski izvori

ZADATAK 2.7 Nivo zvučnog pritiska neposredno pored fasadnog zida dimenzija 12.5 m x 4 m je 69 dB. Proceniti nivo buke u tačkama na rastojanju 1 m, 2 m, 4 m, 8 m. i 80 m koje se nalaze na centralnoj liniji u odnosu na fasadni zid.

Rešenje: U zavisnosti od rastojanja od zida on se može posmatrati kao površinski, linijski ili tačkasti izvor buke.



Na rastojanjima manjim od $a/\pi=1.3$ nivo zvučnog pritiska je isti kao pored fasadnog zida:

$$L_1 = 69 \text{ dB}$$

Na rastojanjima između $a/\pi=1.3$ m i $b/\pi=4$ m fasadni zid se posmatra kao linijski i na tim rastojanjima nivo buke opada 3 dB sa dupliranjem rastojanja, tako da je:

$$L_2 = L_{1.3} - 10 \log \frac{2}{1.3} = 67 \text{ dB}$$

$$L_4 = L_{1.3} - 10 \log \frac{4}{1.3} = 64 \text{ dB}$$

Iznad $b/\pi=4$ m fasadni zid se posmatra kao tačkasti i na tim rastojanjima nivo buke opada 6 dB sa dupliranjem rastojanja, tako da je:

$$L_8 = L_4 - 20 \log \frac{8}{4} = 58 \text{ dB}$$

$$L_{80} = L_4 - 20 \log \frac{80}{4} = 38 \text{ dB}$$

2.5 Nivo buke izvora iz radne sredine

ZADATAK 2.8. U prostoriji sa difuznim zvučnim poljem radi nepoznat broj izvora buke iste zvučne snage. Nivo buke u prostoriji se unošenjem još tri ista izvora buke poveća za 4 dB. Odrediti prvobitan broj izvora buke ako oni emituju zvuk širokog frekvencijskog spektra.

Rešenje: Izvori buke iste zvučne snage u prostoriji sa difuznim zvučnim poljem generišu isti intenzitet zvuka, jer on za neku prostoriju zavisi, pored njenih apsorpcionih karakteristika, samo od zvučne snage izvora:

$$P_{a_1} = P_{a_2} = \dots = P_{a_n} \Rightarrow I_1 = I_2 = \dots = I_n = I,$$

tako da n izvora buke generiše rezultujući intenzitet jednak zbiru intenziteta zvuka koji potiče od pojedinačnih izvora buke:

$$I_R = nI.$$

Unošenjem još 3 izvora buke, rezultujući intenzitet zvuka se povećava:

$$I'_R = (n+3)I.$$

Promena nivoa buke je određena odnosom rezultujućih intenziteta:

$$\Delta L = L'_R - L_R = 10 \log \frac{I'_R}{I_0} - 10 \log \frac{I_R}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{I'_R}{I_0}}{\frac{I_R}{I_0}} = 10 \log \frac{I'_R}{I_R}.$$

Zamenom dobijenih izraza za rezultujuće intenzitete zvuka u gornji izraz, dobija se jednačina u kojoj je nepoznat samo prvobitan broj izvora n :

$$\Delta L = 10 \log \frac{(n+3)I}{nI} = 10 \log \frac{n+3}{n}.$$

Nepoznata veličina se određuje rešavanjem gornje jednačine:

$$\frac{n+3}{n} = 10^{\Delta L/10},$$

$$n+3 = n \cdot 10^{\Delta L/10},$$

$$n + n \cdot 10^{\Delta L/10} = 3,$$

$$n(1 + 10^{\Delta L/10}) = 3 \Rightarrow n = \frac{3}{10^{\Delta L/10} - 1} = \frac{3}{10^{4/10} - 1} = 2.$$

Dakle, prvobitan broj izvora buke u prostoriji je bio 2. Nivo buke u prostoriji se poveća za 4 dB unošenjem još tri ista izvora buke.

ZADATAK 2.9. U prostoriji dimenzija $20 \times 10 \times 10$ m je instalirano 50 mašina iste zvučne snage. Vreme reverberacije prostorije sa 50 mašina je 2s. Ako se zbog potreba tehnološkog procesa u istoj prostoriji montira još 100 takvih mašina, odrediti za koliko će se povećati nivo buke u prostoriji ako je apsorpcija jedne mašine 0.5 m^2 .

Rešenje: Dimenzije prostorije određuju njenu zapreminu i površinu graničnih zidova:

$$V = 20 \cdot 10 \cdot 10 = 2000 \text{ m}^3,$$

$$S = 2 \cdot (20 \cdot 10 + 20 \cdot 10 + 10 \cdot 10) = 1000 \text{ m}^2.$$

Vreme reverberacije definiše akustičke karakteristike prostorije:

$$T = 0.162 \frac{V}{A} \Rightarrow A = 0.162 \frac{V}{T} = 162 \text{ m}^2.$$

Ukupna apsorpcija prostorije određena je apsorpcijom graničnih zidova i apsorpcijom mašina instaliranih u prostoriji:

$$A = S \cdot \bar{\alpha} + n \cdot A_m,$$

gde je:

$\bar{\alpha}$ - srednji koeficijent apsorpcije graničnih zidova, n - broj mašina, A_m - apsorpcija jedne mašine, $[\text{m}^2]$.

Srednji koeficijent apsorpcije graničnih zidova ima vrednost:

$$\bar{\alpha} = \frac{A - n \cdot A_m}{S} = \frac{162 - 50 \cdot 0.5}{1000} = 0.137.$$

Kako je srednji koeficijent apsorpcije prostorije manji od 0.3, ispunjeni su uslovi za homogeno i difuzno zvučno polje u prostoriji, tako da je intenzitet zvuka određen izrazom:

$$I = \frac{4 \cdot \sum_{i=1}^n P_{ai}}{A},$$

gde je $\sum_{i=1}^n P_{ai}$ - ukupna zvučna snaga svih izvora buke u prostoriji.

Kada je u prostoriji instalirano n mašina iste zvučne snage P_a , intenzitet zvuka u prostoriji jednak je:

$$I = \frac{4 \cdot \sum_{i=1}^n P_{ai}}{A} = \frac{4 \cdot n \cdot P_a}{A} = \frac{4 \cdot 50 \cdot P_a}{A} = \frac{200 P_a}{A}.$$

Unošenjem još n' mašina iste zvučne snage, povećava se ukupna apsorpcija prostorije

$$A' = A + n' \cdot A_m.$$

Povećava se i ukupna zvučna snaga instaliranih izvora buke u prostoriji, tako da je ukupni intenzitet zvuka:

$$I' = \frac{4 \sum_{i=1}^{n+n'} P_{ai}}{A'} = \frac{4 \cdot (n+n') \cdot P_a}{A+n' A_m} = \frac{4 \cdot (50+100) \cdot P_a}{A+n' A_m} = \frac{600 P_a}{A+n' A_m}.$$

Povećanje nivoa buke određeno je odnosom rezultujućih intenziteta:

$$\Delta L = L' - L = 10 \log \frac{I'}{I_0} - 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{I'/I_0}{I/I_0} = 10 \log \frac{I'}{I}.$$

Zamena dobijenih izraza za rezultujuće intenzitete zvuka u gornji izraz omogućava izračunavanje povećanja nivoa buke na osnovu podataka o apsorpciji:

$$\Delta L = 10 \log \frac{\frac{600 P_a}{A+n' A_m}}{\frac{200 P_a}{A}} = 10 \log \frac{3A}{A+n' A_m} = 10 \log \frac{3 \cdot 162}{162 + 100 \cdot 0.5} = 3.6 \text{ dB}.$$

ZADATAK 2.10. U proizvodnoj hali radi 50 mašina iste zvučne snage. Apсорpcija prazne hale iznosi 20 m^2 , a prosečna apsorpcija svake mašine 0.2 m^2 . Izračunati:

- koliko se još mašina može uneti u halu a da se nivo ne poveća za više od 3 dB,
- koliko je teorijsko maksimalno povećanje nivoa bez obzira na broj unetih mašina.

Rešenje: a) Intenzitet zvuka u hali je određen ukupnom zvučnom snagom instaliranih izvora buke u hali i ukupnom apsorpcijom koja je određena apsorpcijom graničnih zidova hale (apsorpcija prazne hale - A_0) i apsorpcijom mašina - A_m . Za slučaj kada u hali ima n mašina intenzitet zvuka iznosi:

$$I = \frac{4 \sum_i P_{ai}}{A} = \frac{4 \cdot n \cdot P_a}{A_0 + n \cdot A_m}.$$

Kada se u prostoriju unese još n' mašina iste zvučne snage, povećava se ukupna apsorpcija i ukupna zvučna snaga instaliranih izvora buke u hali, tako da je ukupni intenzitet zvuka:

$$I' = \frac{4 \sum_i P_{ai}}{A'} = \frac{4 \cdot (n+n') \cdot P_a}{A_0 + (n+n') \cdot A_m}.$$

Prema uslovu zadatka, maksimalno povećanje nivoa buke unošenjem još n' mašina iste zvučne snage može da iznosi 3 dB, tako da je odnos intenziteta:

$$\Delta L = L' - L = 10 \log \frac{I'}{I_0} - 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{I'}{I} \Rightarrow \frac{I'}{I} = 10^{\Delta L/10} = 10^{3/10} = 2.$$

Dakle, intenzitet zvuka nakon unošenja još n' mašina iste zvučne snage može da bude maksimalno dvostruko veći od prethodnog intenziteta zvuka:

$$I' = 2 \cdot I.$$

Zamena dobijenih izraza za rezultujuće intenzitete zvuka u gornji izraz omogućava izračunavanje nepoznatog broja mašina n' :

$$\frac{4(n+n')P_a}{A_0 + (n+n')A} = 2 \frac{4nP_a}{A_0 + nA},$$

$$(n+n')(A_0 + nA) = 2n[A_0 + (n+n')A],$$

$$n(A_0 + nA) + n'(A_0 + nA) = 2n(A_0 + nA) + 2nn'A,$$

$$n'(A_0 + nA) - 2nn'A = 2n(A_0 + nA) - n(A_0 + nA),$$

$$n'(A_0 - nA) = n(A_0 + nA),$$

$$n' = n \frac{A_0 + nA}{A_0 - nA} = 50 \cdot \frac{20 + 50 \cdot 0.2}{20 - 50 \cdot 0.2} = 150.$$

U halu se može uneti još 150 mašina iste zvučne snage a da se nivo buke ne poveća za više od 3 dB.

b) Odnos intenziteta zvuka nakon i pre unošenja dodatnih mašina određen je izrazom:

$$\frac{I'}{I} = \frac{\frac{4(n+n')P_a}{A_0 + (n+n')A}}{\frac{4nP_a}{A_0 + nA}} = \frac{(n+n')(A_0 + nA)}{n[A_0 + (n+n')A]}.$$

Povećanje nivoa buke definiše odnos intenziteta zvuka:

$$\Delta L = 10 \log \frac{I'}{I} = 10 \log \frac{(n+n')(A_0 + nA)}{n[A_0 + (n+n')A]}.$$

Maksimalno povećanje nivoa buke se dobija kada se odredi granična vrednost gornjeg izraza za slučaj kada broj dodatno unetih mašina teži beskonačnosti:

$$\Delta L_{\max} = \lim_{n' \rightarrow \infty} 10 \log \frac{I'}{I} = \lim_{n' \rightarrow \infty} 10 \log \frac{(n+n')(A_0 + nA)}{n[A_0 + (n+n')A]} = \lim_{n' \rightarrow \infty} 10 \log \frac{n \cdot (A_0 + nA) + n' \cdot (A_0 + nA)}{n \cdot A_0 + n^2 \cdot A + n' \cdot n \cdot A},$$

$$\Delta L_{\max} = 10 \log \frac{A_0 + nA}{n \cdot A} = 10 \log \frac{20 + 50 \cdot 0.2}{50 \cdot 0.2} = 10 \log 3 = 4.77 \text{ dB}.$$

Maksimalno povećanje nivoa buke, bez obzira na broj dodatno unetih mašina, iznosi 4.77 dB.

f_0 [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
B_T [dB]	0	0	0	2	0	0	0	0
L_W [dB]	73.5	71.5	71.5	69.5	61.5	57.5	54.5	48.5

ZADATAK 2.11. Centrifugalni ventilator sa zakrivljenim lopaticama unapred (FCB) sa 64 lopatice radi na brzini 552 rpm sa porastom pritiska kroz ventilator od 190 Pa u cilju obezbeđenja protoka vazduha od 1.80 m³/s. Ventilator je instaliran na otvorenom prostoru na betonsku podlogu i ventilator ima izlazni i ulazni kanal tako da se buke emituje samo kroz kućište ventilatora. Izolaciona moć kućišta je data u tabeli. Odrediti ukupni nivo zvučnog pritiska na rastojanju 3 m od ventilatora za slučaj a) na ventilatoru instalirani izlazni i ulazni kanal i slučaj b) uklonjen izlazni kanal. Referentni protok ventilatora je 0.47195 dm³/s, a referentni porast pritiska kroz ventilator je 248.8 Pa.

f_0 [Hz]	63	125		250	500	1000	2000	4000	8000
R [dB]	15	21		27	33	39	40	40	40

Fan type	Blade tone, B_T , dB	Octave band center frequency, Hz							
		63	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
Centrifugal fans:									
Airfoil blade	3	35	35	34	32	31	26	18	10
BCB	3	35	35	34	32	31	26	18	10
Radial blade	5–8	48	45	45	43	38	33	30	29
FCB	2	40	38	38	34	28	24	21	15
Tubular	4–6	46	43	43	38	37	32	28	25
Vaneaxial	6–8	42	39	41	42	40	37	35	25
Tubeaxial	6–8	44	42	46	44	42	40	37	30
Propellor	5–7	51	48	49	47	45	45	43	31

Rešenje: Frekvencija na kojoj se pojavljuje tonalna komponenta zbor lopaticja je:

$$f_B = n_r N_b = \frac{552}{60} \cdot 64 = 589 \text{ Hz}$$

Izračunata frekvencija pripada oktavnom opsegu od 500 Hz. Za taj oktavni opseg tonalna komponenta ima vrednost 2 (vidi tabelu) a za sve ostale oktavne opsege ima vrednost nula.

Nivo zvučne snage buke koju generiše ventilator za bilo kji oktavni opseg može se izračunati kao:

$$L_w = L_w(B) + 10 \log \frac{Q}{Q_0} + 20 \log \frac{P}{P_0} + B_T$$

Za oktavni opseg od 500 Hz, izražavajući protok vazduha u dm^3/s :

$$L_w = L_w(B) + 10 \log \frac{Q}{Q_0} + 20 \log \frac{P}{P_0} + B_T = 34 + 10 \log \frac{1800}{0.47195} + 20 \log \frac{190}{248.8} + 2 = 69.5 \text{ dB}$$

gde je $L_w(B)$ - osnovni nivo zvučne snage (vidi tabelu u postavci zadatka).

Za ostale frekvencije primenjuje se ista formaula uzimajući da je tonalna komponenta jednaka nuli.

$$L_w = L_w(B) + 10 \log \frac{Q}{Q_0} + 20 \log \frac{P}{P_0} = L_w(B) + 10 \log \frac{1800}{0.47195} + 20 \log \frac{190}{248.8}$$

a) Zvučna snaga koja se izrači kroz kućište iznosi:

$$L_w(\text{kućište}) = L_w - R = 69.5 - 33 = 36.5 \text{ dB}$$

Nivo zvučnog pritiska na rastonjau 3 m od ventiltora se može odrediti kao:

$$L_p = L_w(\text{kućište}) + G - 20 \log r - 11$$

$$L_p = 36.5 + 3 + 20 \log(3) - 11 = 19.1 \text{ dB}$$

gde je za indeks direktivnosti G uzeta vrednost od 3 dB s obzirom na se ventilator nalazi na reflektujućoj podlozi.

Ukupni nivo zvučnog pritiska se može odrediti kao energijska suma oktavnih vrednosti:

$$L_p = 10 \log(10^{4.11} + 10^{3.31} + 10^{2.71} + 10^{1.91} + 10^{0.51} + 10^{0.01} + 10^{-0.29} + 10^{-0.89}) = 41.9 \text{ dB}$$

f_0 [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_w [dB]	73.5	71.5	71.5	69.5	61.5	57.5	54.5	48.5
$L_w(\text{kućište})$ [dB]	58.5	50.5	44.5	36.5	22.5	17.5	14.5	8.5
L_p [dB]	41.1	33.1	27.1	19.1	5.1	0.1	-2.9	-8.9

b) Zvučna snaga koja se izrači kroz izlaz ventilatora iznosi:

$$L_w(\text{izlaz}) = L_w = 69.5 \text{ dB}$$

Ukupna zvučna snaga se dobija kao energijska suma zvučna snage koja se izrači kroz kućište i zvučne snage koja se izraz kroz izlaz ventilatora:

$$L_{W_{\text{tot}}} = 10 \log \left(10^{0.1 L_w(\text{kućište})} + 10^{0.1 L_w(\text{izlaz})} \right)$$

Za sve frekvencije je zvučna snaga koja se izrači kroz kućište zanemarljiva, tako da je:

$$L_{W_{\text{tot}}} = L_w(\text{izlaz})$$

Nivo zvučnog pritiska na rastonjau 3 m od ventiltora se može odrediti primenom iste jednačine kao pod a).

f_0 [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$L_w(\text{izlaz})$ [dB]	73.5	71.5	71.5	69.5	61.5	57.5	54.5	48.5
$L_{W_{\text{tot}}}$ [dB]	73.5	71.5	71.5	69.5	61.5	57.5	54.5	48.5
L_p [dB]	56.1	54.2	54.1	52.1	44.1	40.1	37.1	31.1

Ukupni nivo zvučnog pritiska se može odrediti kao energijska suma oktavnih vrednosti:

$$L_p = 10 \log \left(10^{5.61} + 10^{5.42} + 10^{5.41} + 10^{5.21} + 10^{4.41} + 10^{4.01} + 10^{3.71} + 10^{3.11} \right) = 60.5 \text{ dB}$$

2.6 Prostiranje buke zatvoreni-otvoreni prostor

ZADATAK 2.12. Na rastojanju od 10 m od kompresorske stanice izmeren je nivo buke od 81 dB. Izvor buke se nalazi na otvorenom prostoru i može se posmatrati kao tačkasti izvor zvuka. Na rastojanju od 40 m od kompresorske stacije nalazi se stambeni objekat. Na zidu stambenog objekta ukupne površine 10 m² koji je okrenut prema kompresorskoj stanici nalazi se prozor površine 2 m². Ako je izolaciona moć prozora 20 dB, a izolaciona moć opeke od koje je sačinjen zid 50 dB izračunati nivo buke u centralnom delu prostorije stambenog objekta čija akustička konstanta ima vrednost od 10 m². Pretpostaviti da u centralnom delu prostorije dominira uticaj reflektovanih zvučnih talasa i da zvučni talasi padaju na zid pod pravim uglom.

Rešenje: Kako je reč o tačkastom izvoru zvuka nivo buke na otvorenom prostoru opada po zakonu:

$$\Delta L = 20 \log \frac{r_2}{r_1} = 20 \log \frac{40}{10} = 12 \text{ dB},$$

tako da je nivo zvučnog pritiska na zidu stambenog objekta:

$$L_1 = L - 12 = 81 - 12 = 69 \text{ dB}.$$

Na zid stambenog objekta padaju zvučni talasi u obliku ravanskih talasa tako da je zvučna snaga talasa koji padne na zid:

$$P_1 = I_1 S,$$

gde je S – površina zida koji je okrenut pream fabrici.

Deo zvučne energije koja padne na zid prolazi kroz zid, P_2 , i određen je koeficijentom transmisije:

$$\tau = \frac{P_2}{P_1}.$$

Zid površine S preuzima ulogu izvora buke u prostoriji koji zrači energiju sa efektivnim prostornim uglom od 2π a faktor usmerenosti γ ima vrednost 1. U tom slučaju je granični radijus prostorije:

$$r_g = \sqrt{\frac{\gamma B}{4\pi}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10}{4\pi}} = 0.9 \text{ m},$$

gde je B – akustička konstanta prostorije.

U centralnom delu prostorije koje se nalazi u zoni gde dominiraju refleksioni zvučni talasi, odnosno reverberaciono polje intenzitet zbuca je.

$$I_2 = \frac{4P_2}{A}(1 - \bar{\alpha}) = \frac{4P_2}{B}$$

gde je B – akustička konstanta prostorije.

Zvučna snaga izvora buke u prostoriji određuje se iz gornje jednačine kao:

$$P_2 = \frac{BI_2}{4}$$

Izolaciona moć zida je:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{P_1}{P_2}$$

Zamenom izraza za P_1 i P_2 :

$$R = 10 \log \frac{I_1 S}{\frac{I_2 B}{4}} = 10 \log \frac{4I_1 S}{I_2 B} = 10 \log \frac{I_1}{I_2} + 10 \log \frac{S}{B} + 10 \log 4$$

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log S - 10 \log B + 6$$

Iz gornje jednačine se može izračunati nivo buke u prostoriji:

$$L_2 = L_1 - R + 10 \log S - 10 \log B + 6$$

Kako zid predstavlja složenu strukturu sa površinama različite izolacione moći rezultujući koeficijent transmisije se može izračunati kao:

$$\tau = \frac{S_1 \tau_1 + S_2 \tau_2}{S} = \frac{S_1 10^{-0.1R_1} + S_2 10^{-0.1R_2}}{S}$$

a rezultujuća izolaciona moć kao:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{S}{S_1 10^{-0.1R_1} + S_2 10^{-0.1R_2}}$$

$$R = 10 \log \frac{10}{8 \cdot 10^{-0.1 \cdot 50} + 2 \cdot 10^{-0.1 \cdot 20}} = 27 \text{ dB}$$

Tako da je:

$$L_2 = 69 - 27 + 10 \log 10 - 10 \log 10 + 6$$

$$L_2 = 48 \text{ dB}$$

ZADATAK 2.13. Mašinska radionica je konstruisana tako da je fasadni zid dimenzija 12.5 m x 4 m okrenut prema stambenom objektu na rastojanju od 10 m. A-ponderisani nivo buke u mašinskoj radionici je 88 dB. Izračunati izolacionu moć fasadnog zida da nivo na fasadi stambenog objekta ne prekorači 40 dB.

Rešenje: Fasadni zid mašinske radionice je površinski izvor buke, ali se na rastojanju 10 m može posmatrati kao tačkasti jer je ispunjen uslov da je:

$$r = 10 > \frac{b}{\pi} = \frac{12.5}{\pi} = 3.97 \text{ m}$$

Posmatrajući fasadni zid radionice kao tačkasti može se odrediti zvučna snaga fasadnog zida koja će na rastojanju 10 m dati nivo buke od 40 dB:

$$L_{pA} = L_{WA} + G - 20 \log r - 11$$

$$L_{WA} = L_{pA} - G + 20 \log r + 11$$

gde je G – indeks usmerenosti koji ima vrednost 3 dB jer se izvor buke nalazi iznad refleksione ravni (tla).

Tako da je:

$$L_{wA} = 40 - 3 + 20 \log 10 + 11 = 68 \text{ dB}.$$

Na rastojanjima od fasadnog zida radionice koja su manja od:

$$r < \frac{a}{\pi} = \frac{4}{\pi} = 1,27 \text{ m}$$

fasadni zid radionice se može posmatrati kao površinski koji emituje ravanske talase čija je zvučna snaga:

$$\begin{aligned} P &= IS \quad /: 10^{-12} \\ \frac{P}{10^{-12}} &= \frac{I}{10^{-12}} S \\ 10 \log \frac{P}{10^{-12}} &= 10 \log \frac{I}{10^{-12}} + 10 \log S \\ L_w &= L_I + 10 \log S \end{aligned}$$

Nivo intenziteta zvuka na otvorenom prostoru odgovara nivou zvučnog pritiska. Iz gornje jednačine se može izračunati A-ponderisani nivo buke u neposrednoj blizini fasadnog zida sa spoljašnje strane:

$$L_2 = L_w - 10 \log S = 68 - 10 \log(12,5 \cdot 4) = 51 \text{ dB}$$

Ako je nivo zvučnog pritiska u mašinskoj radionici L_1 , tada na fasadni zid sa unutrašnje energije padne zvučna energija čija je zvučna snaga:

$$P_1 = \frac{I_1 S}{4}$$

Kroz pregradu se zvučna energija prenosi na otvoreni prostor a deo energije je određen koeficijentom transmisije, odnosno izolacionom moći pregrade:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log \frac{\frac{I_1 S}{4}}{\frac{I_2 S}{4}} = 10 \log \frac{I_1}{I_2} - 10 \log 4 = L_1 - L_2 - 6$$

Za podatke iz zadatka:

$$R = 88 - 51 - 6 = 31 \text{ dB}$$

ZADATAK 2.14. Spoljašnji zid spavaće sobe površine 10 m^2 koji je okrenut prema putu za motorna vozila udaljen je 30 m od puta. Oktavni nivoi zvučnih pritisaka izmerni na rastojanju od 7,5 m od puta prikazani su u tabeli. Na spoljašnjem zidu od opeke izlacione moći 55 dB na 1000 Hz nalazi se prozor od dvostrukog stakla čija je izolaciona moć 40 dB na 1000 Hz. Izolaciona moć zida od opeke i prozora raste 5 dB po oktavi.

a) Izračunati maksimalnu površinu prozora tako da nivo buke u spavaćoj sobi akustičke konstante 10 m^2 ne prekoračuje graničnu vrednost od 35 dB za dan.

b) Za tako izračunatu vrednost površine prozora izračunati oktavne vrednosti nivoa zvučnog pritiska u spavaćoj sobi.

f_0 [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L [dB]	81	77	75	74	75	72	70	67

Rešenje: Kako je reč o linijskom izvoru zvuka nivo buke na otvorenom prostoru opada po zakonu:

$$\Delta L = 10 \log \frac{r_2}{r_1} = 10 \log \frac{30}{7,5} = 6 \text{ dB},$$

tako da se nivo zvučnog pritiska na spoljašnjem zidu spavaće sobe može izračunati kao:

$$L_1 = L - 6.$$

Oktavne vrednosti nivoa zvučnog pritiska na spoljašnjem zidu su date u tabeli.

Nivo zvučnog pritiska u spavaćoj sobi ne sme da prekorači graničnu vrednost od 30 dB. Dozvoljene vrednosti po oktavama su određene normativnom krivom N-30 i izračunavaju se kao:

$$L_{2\text{doz}}(f) = a(f) + b(f) \cdot N$$

Vrednosti koeficijenta a i b , kao i dozvoljene vrednosti oktavama za $N=30$ date su u tabeli.

Zahtevana izolaciona moć spoljašnjeg zida može se izračunati kao (videti prethodni zadatak):

$$R_z = L_1 - L_{2\text{doz}} + 10 \log S - 10 \log B + 6 = L_1 - L_{2\text{doz}} + 10 \log 10 - 10 \log 10 + 6$$

$$R_z = L_1 - L_{2\text{doz}} + 6$$

Potrebne oktavne vrednosti izolacione moći pregradnog zida da nivo zvučnog pritiska u spavaćoj sobi ne prekoračuje dozvoljene vrednosti date su u tabeli. U istoj tabeli su prikazane izolacione moći zida od opeke i prozora, uzimajući u obzir da njihova izolaciona moć raste 5 dB po oktavi.

Kako zid spavaće sobe predstavlja složenu strukturu sa površinama različite izolacione moći rezultujući koeficijent transmisije se može izračunati kao:

$$\tau = \frac{S_o \tau_o + S_p \tau_p}{S} = \frac{(S - S_p) 10^{-0.1 R_o} + S_p 10^{-0.1 R_p}}{S}$$

a rezultujuća izolaciona moć kao:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{S}{(S - S_p) 10^{-0.1 R_o} + S_p 10^{-0.1 R_p}}$$

Iz gornje jednačine se može izračunati potrebna površina prozora da ukupna izolaciona moć iznosi R_z :

$$\frac{S}{(S - S_p) \cdot 10^{-0.1 R_o} + S_p \cdot 10^{-0.1 R_p}} = 10^{0.1 R_z}$$

$$(S - S_p) 10^{-0.1 R_o} + S_p 10^{-0.1 R_p} = S \cdot 10^{0.1 R_z}$$

$$S_p (10^{-0.1 R_p} - 10^{-0.1 R_o}) = S \cdot 10^{0.1 R_z} - S \cdot 10^{-0.1 R_o} = S \cdot (10^{0.1 R_z} - 10^{-0.1 R_o})$$

$$S_p = S \frac{10^{0.1 R_z} - 10^{-0.1 R_o}}{10^{-0.1 R_p} - 10^{-0.1 R_o}} = 10 \frac{10^{0.1 R_z} - 10^{-0.1 R_o}}{10^{-0.1 R_p} - 10^{-0.1 R_o}}$$

U tabeli je dat proračun površine prozora za svaku oktavu koja obezbeđuje da ukupna izolaciona moć bude R . Kao maksimalna površina koju prozor može da ima uzima se najmanja vrednost površine prozora po svim oktavama a to je 2.9 m² za oktave centralnih frekvencija 250 Hz i 1000 Hz.

f_0 [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L [dB]	81	77	75	74	75	72	70	67
L_1 [dB]	75	71	69	68	69	66	64	61
a [dB]	35.5	22.0	12.0	4.8	0	-3.5	-6.1	-8.0
b [dB]	0.790	0.870	0.930	0.974	1.000	1.015	1.025	1.030
$L_{2\text{doz}}$ [dB]	59.2	48.1	39.9	34.0	30.0	27.0	24.7	22.9
R_z [dB]	21.8	28.9	35.1	40.0	45.0	45.1	45.4	44.1
R_o [dB]	35	40	45	50	55	60	65	70
R_p [dB]	20	25	30	35	40	45	50	55
S_p [m ²]	6.5	3.9	2.9	3.0	2.9	9.9	29.8	126.7

b) Na osnovu usvojene površine prozora primenom jednačine u rešenju a) ovog zadatka mogu se izračunati oktavne vrednosti izolacione moći spoljašnjeg zida spavaće sobe. Vrednosti su date u tabeli.

Nivo zvučnog pritiska u spavaćoj sobi se može izračunati primenom jednačine u rešenju a). Oktavne vrednosti nivoa zvučnog pritiska u spavaćoj sobi su date u tabeli.

f_0 [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
R [dB]	25.1	30.1	35.1	40.1	45.1	50.1	55.1	60.1
L_1 [dB]	75	71	69	68	69	66	64	61
L_2 [dB]	55.9	46.9	39.9	33.9	29.9	21.9	14.9	6.9
$L_{2\text{doz}}$ [dB]	59.2	48.1	39.9	34.0	30.0	27.0	24.7	22.9

ZADATAK 2.15. Dizel mašina se nalazi na podu hale koja sadrži prozor dimenzija 3 m x 2 m. Zidovi i vrata hale su masivne konstrukcije su masivne konstrukcije tako da se prozor može tretirati kao glavni put za prenošenje buke ka otvorenom prostoru. Merenjem nivoa zvučnog pritiska u anehoičnoj prostoriji na četiri tačke oko dizel mašine na rastojanju 1 m od mašine izmereni su sledeći nivoi: 110 dB, 96 dB, 108 dB i 101 dB. Dimenzije hale su 10 m x 6 m x 3 m a koeficijent apsorpcije je 0.02 za zid, 0.01 za pod i 0.4 za plafon. Izračunati nivo buke na rastojanju od 20 m od prozora na liniji koja je upravna na površinu prozora ukoliko je izolaciona moć prozora 30 dB. Pretpostaviti da je u hali difuzno zvučno polje.

Rešenje: Na osnovu merenja nivoa zvučnog pritiska u anehoičnoj prostoriji može se odrediti nivo zvučne snage dizel mašine:

$$L_w = \bar{L}_p + 10 \log S_0$$

$$L_w = 10 \log \frac{1}{4} \left(10^{0.1L_{p1}} + 10^{0.1L_{p2}} + 10^{0.1L_{p3}} + 10^{0.1L_{p4}} \right) + 10 \log (4\pi r_0^2)$$

$$L_w = 10 \log \frac{1}{4} \left(10^{11} + 10^{9.6} + 10^{10.8} + 10^{10.1} \right) + 10 \log (4\pi \cdot 1^2)$$

$$L_w = 109 + 11 = 120 \text{ dB}$$

Apsorpciona površina hale iznosi:

$$A = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + S_3 \alpha_3$$

$$A = (2 \cdot 10 \cdot 3 + 2 \cdot 6 \cdot 3) \cdot 0.02 + 10 \cdot 6 \cdot 0.01 + 10 \cdot 6 \cdot 0.4 = 26.5 \text{ m}^2$$

gde su sa indeksom 1 obeleženi površina zidova i koeficijent apsorpcije zidova, indeksom 2 površina poda i koeficijent apsorpcije poda i indeksom 3 površina plafona i koeficijent apsorpcije plafona.

Prosečni koeficijent apsorpcije iznosi:

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{S_u} = \frac{26.5}{2(10 \cdot 3 + 10 \cdot 6 + 6 \cdot 3)} = \frac{26.5}{216} = 0.12$$

gde je S_u – ukupna površina svih graničnih površina hale.

Kako je prosečni koeficijent apsorpcije hale manji od 0.3 zvučno polje u hali se može tretirati kao difuzno pa je:

$$I_1 = \frac{4P_a}{A} / 10^{-12}$$

$$\frac{I_1}{10^{-12}} = \frac{P_a}{10^{-12}} \frac{4}{A}$$

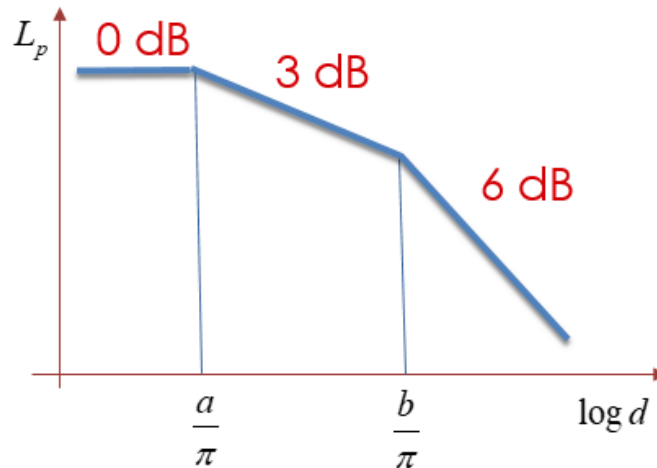
$$10 \log \frac{I_1}{10^{-12}} = 10 \log \frac{P_a}{10^{-12}} - 10 \log A + 6$$

$$L_1 = L_w - 10 \log A + 6$$

Iz jednačine koja je izvedena u **zadatku 2.13** može se izračunati nivo buke neposredno pored prozora sa spoljašnje strane:

$$\begin{aligned}
 R &= L_1 - L_2 - 6 \\
 L_2 &= L_1 - R - 6 = L_w - 10 \log A + 6 - R - 6 \\
 L_2 &= L_w - 10 \log A - R \\
 L_2 &= 120 - 10 \log 26.5 - 30 = 75.8 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

U zavisnosti od rastojanja od prozora on se može posmatrati kao površinski, linijski ili tačkasti izvor buke.



Na rastojanjima manjim od $a/\pi=0.64$ m nivo zvučnog pritiska je isti kao pored prozora:

$$L_{0.64} = 75.8 \text{ dB}$$

Na rastojanjima između $a/\pi=0.64$ m i $b/\pi=0.95$ m prozor se posmatra kao linijski i na tim rastojanjima nivo buke opada 3 dB sa dupliranjem rastojanja, tako da je:

$$L_{0.95} = L_{0.64} - 10 \log \frac{0.95}{0.64} = 74 \text{ dB}$$

Iznad $b/\pi=0.95$ m prozor se posmatra kao tačkasti i na tim rastojanjima nivo buke opada 6 dB sa dupliranjem rastojanja, tako da je:

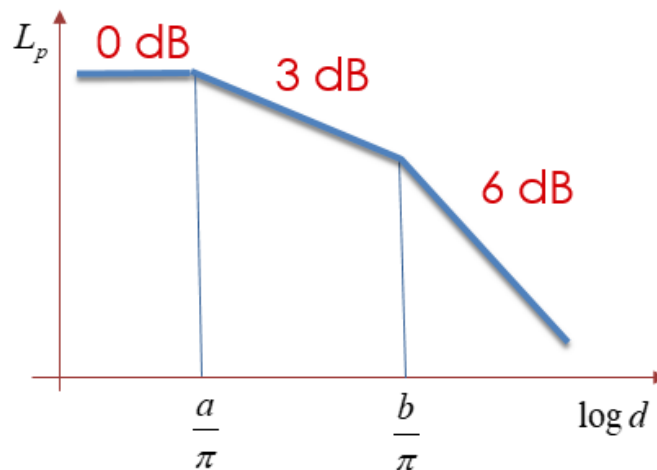
$$L_{20} = L_{0.95} - 20 \log \frac{20}{0.95} = 47.5 \text{ dB}$$

ZADATAK 2.16. Nivo buke u industrijskom pogonu je 98 dB. Izračunati nivo buke na rastojanju od 100 m od centra fasade industrijskog pogona u normalnom pravcu u odnosu na fasadu. Dimenzije fasade su 5 m x 2.5 m a njena izolaciona moć 25 dB.

Rešenje: Iz jednačine koja je izvedena u **zadatku 2.13** može se izračunati nivo buke neposredno pored fasadnog zida industrijskog pogona:

$$L_2 = L_1 - R - 6 = 98 - 25 - 6 = 67 \text{ dB}$$

U zavisnosti od rastojanja od fasadnog zida on se može posmatrati kao površinski, linijski ili tačkasti izvor buke.



Na rastojanjima manjim od $a/\pi=2.5/\pi=0.8$ m nivo zvučnog pritiska je isti kao pored fasadnog zida:

$$L_{0.8} = 67 \text{ dB}$$

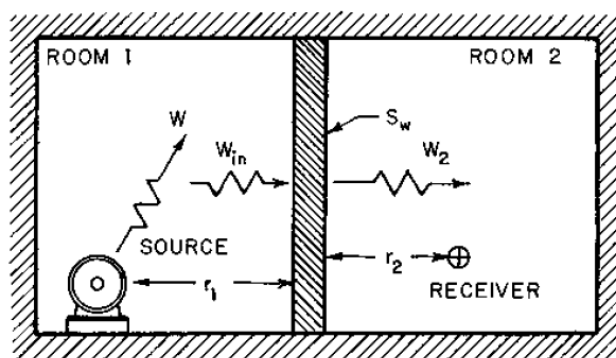
Na rastojanjima između $a/\pi=0.8$ m i $b/\pi=2.5/\pi=1$ m fasadni zid se posmatra kao linijski i na tim rastojanjima nivo buke opada 3 dB sa dupliranjem rastojanja, tako da je:

$$L_{1.6} = L_{0.8} - 10 \log \frac{1.6}{0.8} = 67 - 3 = 64 \text{ dB}$$

Iznad $b/\pi=1.6$ m fasadni zid se posmatra kao tačkasti i na tim rastojanjima nivo buke opada 6 dB sa dupliranjem rastojanja, tako da je:

$$L_{100} = L_{1.6} - 20 \log \frac{100}{1.6} = 64 - 42 = 22 \text{ dB}$$

ZADATAK 2.17. Prečišćivač koji se koristi za mlin za mlevenja papira lociran je u prostoriji koja ima ukupnu površinu od 900 m^2 i srednji koeficijent apsorpcije 0.05. Zvučna snaga prečišćivača je 105 dB a faktor usmerenosti 2. Prečišćivač se nalazi na rastojanju 4 m od zida prostorije u kojoj se nalazi operator postrojenja, Prostorija operatora ima ukupnu površinu od 100 m^2 a srednji koeficijent apsorpcije 0.35. Izolaciona moć zida površine 30 m^2 koji odvaja prostoriju operatora od prostorije prečišćivača iznosi 30 dB. Operator je lociran na rastojanju 1.5 m od zida. Odrediti nivo buke u prostoriji prečišćivača i prostoriji operatora.



Rešenje: Polazeći od izraza za intenzitet zvuka u zatvorenom prostoru može se izvesti izraz za izračunavanje nivoa buke u zatvorenom prostoru:

$$\begin{aligned}
I &= \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2} + \frac{4P_a}{A} (1 - \bar{\alpha}) = \frac{p^2}{\rho_0 c} \\
p^2 &= \rho_0 c P_a \left(\frac{\gamma}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} (1 - \bar{\alpha}) \right) \\
\frac{p^2}{p_0^2} &= \frac{\rho_0 c P_{a0}}{p_0^2} \frac{P_a}{P_{a0}} \left(\frac{\gamma}{4\pi r^2} + \frac{4}{B} \right), B = \frac{A}{1 - \bar{\alpha}} \\
L_p &= L_w + 10 \log \left(\frac{\gamma}{4\pi r^2} + \frac{4}{B} \right) + 10 \log \left(\frac{\rho_0 c P_{a0}}{p_0^2} \right)
\end{aligned}$$

Kako je treći sabirak ima vrednost približno 0.1 radi pojednostavljenja on se može zanemariti:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{\gamma}{4\pi r^2} + \frac{4}{B} \right).$$

Konstanta prostorije prečišćivača ima vrednost:

$$B_1 = \frac{A_1}{1 - \bar{\alpha}_1} = \frac{\bar{\alpha}_1 S_1}{1 - \bar{\alpha}_1} = \frac{0.05 \cdot 900}{1 - 0.05} = 47.37 \text{ m}^2$$

Tako da se nivo zvučnog pritiska u prostoriji prečišćivača može izračunati kao:

$$L_{p_1} = L_w + 10 \log \left(\frac{\gamma}{4\pi r^2} + \frac{4}{B_1} \right) = 105 + 10 \log \left(\frac{2}{4\pi \cdot 4^2} + \frac{4}{47.37} \right) = 94.8 \text{ dB}$$

U prostoriji operater izvor zvuka je zid. Ako je poznata zvučna snaga mogu se izvesti dva izraza za nivoa zvučnog pritiska. Prvi slučaj je kada se zid može posmatrati kao tačkasti sa indeksom usmerenosti 2, tada se može primeniti prethodno izvedeni izraz:

$$L_{p_2} = L_{w_2} + 10 \log \left(\frac{2}{4\pi r^2} + \frac{4}{B_2} \right)$$

Gornji izraz važi ako je ispunjen uslov za rastojanje prorčunske tačke od zida:

$$r > \sqrt{\frac{S_{12}}{2\pi}}$$

Za konkretan slučaj:

$$\sqrt{\frac{S_{12}}{2\pi}} = \sqrt{\frac{16}{2\pi}} = 1.596 \text{ m}$$

Gornji uslov nije ispunjen jer je $r_2 = 1.5 \text{ m} < 1.56 \text{ m}$.

Dakle zid se mora posmatrati kao izvor ravanskih talasa, tako da je:

$$\begin{aligned}
I_2 &= \frac{P_{a_2}}{S_{12}} + \frac{4P_{a_2}}{A_2} (1 - \bar{\alpha}_2) = \frac{p_2^2}{\rho_0 c} \\
p_2^2 &= \rho_0 c P_{a_2} \left(\frac{1}{S_{12}} + \frac{4}{A_2} (1 - \bar{\alpha}_2) \right) \\
\frac{p_2^2}{p_0^2} &= \frac{\rho_0 c P_{a0}}{p_0^2} \frac{P_{a_2}}{P_{a0}} \left(\frac{1}{S_{12}} + \frac{4}{B_2} \right), B_2 = \frac{A_2}{1 - \bar{\alpha}_2} \\
L_{p_2} &= L_{w_2} + 10 \log \left(\frac{1}{S_{12}} + \frac{4}{B_2} \right) + 10 \log \left(\frac{\rho_0 c P_{a0}}{p_0^2} \right)
\end{aligned}$$

Kako je treći sabirak ima vrednost približno 0.1 radi pojednostavljenja on se može zanemariti:

$$L_{p_2} = L_{w_2} + 10 \log \left(\frac{1}{S_{12}} + \frac{4}{B_2} \right)$$

Konstanta prostorije operatera ima vrednost

$$B_2 = \frac{A_1}{1 - \alpha_2} = \frac{\bar{\alpha}_2 S_2}{1 - \bar{\alpha}_2} = \frac{0.35 \cdot 100}{1 - 0.35} = 53.85 \text{ m}^2$$

Polazeći od definicije koeficijenta transmisije može se izvesti izraz za zvučnu snagu zida:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{W_2}{W_{\text{inc}}} = \frac{W_2}{\frac{I_1 S_{12}}{4}} = \frac{W_2}{\frac{4 P_a}{4 B_1} S_{12}} = \frac{W_2 B_1}{P_a S_{12}} \\ R &= 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{P_a S_{12}}{W_2 B_1} = L_w + 10 \log S_{12} - L_{w_2} - 10 \log B_1 \\ L_{w_2} &= L_w - R + 10 \log S_{12} - 10 \log B_1 \end{aligned}$$

Zamenom izrtaza za zvučnu snagu zida u izraz za nivoa zvučnog pritiska u protoriji operatera:

$$\begin{aligned} L_{p_2} &= L_w - R + 10 \log S_{12} - 10 \log B_1 + 10 \log \left(\frac{1}{S_{12}} + \frac{4}{B_2} \right) \\ L_{p_2} &= L_w - R - 10 \log B_1 + 10 \log S_{12} \left(\frac{1}{S_{12}} + \frac{4}{B_2} \right) \\ L_{p_2} &= L_w - R - 10 \log B_1 + 10 \log \left(1 + \frac{4 S_{12}}{B_2} \right) \end{aligned}$$

Za konkretne podatke iz zadatka:

$$L_{p_2} = 105 - 30 - 10 \log 47.37 + 10 \log \left(1 + \frac{4 \cdot 16}{53.85} \right) = 61.6 \text{ dB}$$

Ako bi proračunska tačka bila u reverberantnom polju prostorije operatera:

$$\begin{aligned} L_{p_2} &= L_{p1} - R + 10 \log \frac{S_{12}}{B_2} \\ L_{p_2} &= 94.8 - 30 + 10 \log \frac{16}{53.85} = 59.8 \text{ dB} \end{aligned}$$

3. BUKA U ZATVORENOM PROSTORU

3.1 Akustička obrada prostorije

ZADATAK 3.1 Zidovi i tavanica prostorije dimenzija $10 \times 10 \times 5$ m su obloženi materijalom srednje vrednosti koeficijenta apsorpcije 0.1, a pod materijalom srednje vrednosti koeficijenta apsorpcije 0.05.

- Odrediti koliki nivo buke stvara izvor koji je smešten u uglu poda i dva zida na rastojanju od 5 m, ako je zvučna snaga izvora buke 0.1 W, a faktor usmerenosti izvora 0.2.
- Ako se materijal srednje vrednosti koeficijenta apsorpcije 0.1 zameni novim čija je vrednost 0.6, odrediti za koliko će se smanjiti nivo buke u prostoriji u istoj tački.

Rešenje: a) Granični zidovi prostorije imaju različite koeficijente apsorpcije, tako da je za određivanje ukupne apsorpcije prostorije potrebno odrediti površine graničnih zidova sa različitim koeficijentima apsorpcije.

Ukupna površina prostorije:

$$S = 2(10 \cdot 10 + 10 \cdot 5 + 10 \cdot 5) = 400 \text{ m}^2.$$

Površina pregradnih zidova i plafona:

$$S_1 = 2(10 \cdot 5 + 10 \cdot 5) + 10 \cdot 10 = 300 \text{ m}^2.$$

Površina poda:

$$S_2 = 10 \cdot 10 = 100 \text{ m}^2.$$

Ukupna apsorpcija prostorije jednaka je zbiru apsorpcija graničnih površina sa različitim koeficijentom apsorpcije:

$$A = \sum_i S_i \alpha_i = S_1 \bar{\alpha}_1 + S_2 \bar{\alpha}_2 = 300 \cdot 0.1 + 100 \cdot 0.05 = 35 \text{ m}^2.$$

Srednji koeficijent apsorpcije graničnih zidova se određuje deljenjem ukupne apsorpcije sa ukupnom površinom graničnih površina:

$$A = S \cdot \bar{\alpha} \Rightarrow \bar{\alpha} = \frac{A}{S} = \frac{35}{400} = 0.0875.$$

Kako je srednji koeficijent apsorpcije prostorije manji od 0.3, ispunjeni su uslovi za homogeno i difuzno zvučno polje u prostorije, tako da je intenzitet zvuka u svim tačkama prostorije jednak i ima vrednost:

$$I = \frac{4 \cdot P_a}{A} = \frac{4 \cdot 0.1}{35} = 0.011 \text{ W/m}^2.$$

Nivo buke jednak je logaritamskom odnosu intenziteta zvuka i referentne vrednosti:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{0.011}{10^{-12}} = 100.4 \text{ dB}.$$

b) Ako se zidovi i plafon oblože novim materijalom koeficijenta apsorpcije 0.6, promeniće se ukupna apsorpcija prostorije:

$$A' = \sum_i S_i \alpha_i = S_1 \bar{\alpha}_3 + S_2 \bar{\alpha}_2 = 300 \cdot 0.6 + 100 \cdot 0.05 = 185 \text{ m}^2.$$

Sada je srednji koeficijent apsorpcije:

$$\bar{\alpha}' = \frac{A'}{S} = \frac{185}{400} = 0.4625.$$

Kako je srednji koeficijent apsorpcije veći od 0.3, ukupni intenzitet zvuka nije isti u svim tačkama i zavisi od rastojanja do izvora buke kao i od karakteristika izvora (zvučne snage, lokacije i usmerenosti). Ukupni intenzitet zvuka jednak je zbiru intenziteta direktnih zvučnih talasa koje generiše izvor buke:

$$I_d = \gamma \frac{P_a}{\Omega_z r^2} = \gamma \frac{P_a}{\frac{\pi}{2} r^2},$$

i prosečnog intenziteta reflektovanih zvučnih talasa od graničnih zidova prostorije:

$$I_r = \frac{4P_a}{A'}(1 - \bar{\alpha}'),$$

gde je: γ - faktor usmerenosti izvora, Ω_z - prostorni ugao zračenja, koji za slučaj lokacije izvora buke pored tri reflektujuće površine ima vrednost $\pi/2$.

Ukupni intenzitet zvuka nakon oblaganja zidova i plafona novim materijalom ima vrednost:

$$I' = I_d + I_r = \gamma \frac{P_a}{\frac{\pi}{2} r^2} + (1 - \bar{\alpha}') \frac{4P_a}{A'} = P_a \left[\frac{2\gamma}{\pi r^2} + 4 \left(\frac{1}{A'} - \frac{\bar{\alpha}'}{A'} \right) \right] = P_a \left[\frac{2\gamma}{\pi r^2} + 4 \left(\frac{1}{A'} - \frac{1}{S} \right) \right],$$

$$I' = 0.1 \cdot \left[\frac{2 \cdot 0.2}{3.14 \cdot 5^2} + 4 \left(\frac{1}{185} - \frac{1}{400} \right) \right] = 0.001671 \text{ W/m}^2.$$

Nivo buke nakon oblaganja zidova i plafona novim materijalom ima vrednost:

$$L = 10 \log \frac{0.001671}{10^{-12}} = 92.2 \text{ dB}.$$

Postignuto slabljenje nivoa buke iznosi:

$$\Delta L = L - L' = 100.4 - 92.2 = 8.2 \text{ dB}.$$

ZADATAK 3.2 Tavanica i zidovi prostorije dimenzija $10 \times 5 \times 4$ m su obloženi materijalom srednje vrednosti koeficijenta apsorpcije 0.1, a pod materijalom srednje vrednosti koeficijenta apsorpcije 0.05. Ako se plafon iz dekorativnih razloga obloži apsorpcionim pločama srednje vrednosti koeficijenta apsorpcije 0.4, odrediti:

- vreme reverberacije pre i posle dekorativne obrade plafona,
- smanjenje nivoa buke u prostoriji.

Rešenje: a) Granične površine prostorije imaju različite koeficijente apsorpcije zvuka, tako da je za određivanje ukupne apsorpcije prostorije potrebno odrediti površine graničnih zidova sa različitim koeficijentima apsorpcije zvuka.

Ukupna površina prostorije:

$$S = 2(10 \cdot 5 + 10 \cdot 4 + 5 \cdot 4) = 220 \text{ m}^2.$$

Površina pregradnih zidova:

$$S_1 = 2(10 \cdot 4 + 5 \cdot 4) = 120 \text{ m}^2.$$

Površina poda:

$$S_2 = 10 \cdot 5 = 50 \text{ m}^2.$$

Površina plafona:

$$S_3 = 10 \cdot 5 = 50 \text{ m}^2.$$

Zapremina prostorije:

$$V = 10 \cdot 5 \cdot 4 = 200 \text{ m}^3.$$

Ukupna apsorpcija prostorije pre dekorativne obrade prostorije jednaka je zbiru apsorpcija graničnih zidova sa različitim koeficijentom apsorpcije:

$$A_1 = \sum_i S_i \alpha_i = S_1 \bar{\alpha}_1 + S_2 \bar{\alpha}_2 + S_3 \bar{\alpha}_1 = 120 \cdot 0.1 + 50 \cdot 0.05 + 50 \cdot 0.1 = 19.5 \text{ m}^2.$$

Srednji koeficijent apsorpcije zvuka ima vrednost:

$$\bar{\alpha} = \frac{A_1}{S} = \frac{19.5}{220} = 0.089.$$

Vreme reverberacije prostorije je određeno apsorpcijom prostorije i njenom zapreminom:

$$T_{R1} = 0.162 \cdot \frac{V}{A_1} = 0.162 \cdot \frac{200}{19.5} = 1.66 \text{ s}.$$

Ukupna apsorpcija prostorije nakon dekorativne obrade prostorije jednaka je zbiru apsorpcija graničnih zidova sa različitim koeficijentom apsorpcije zvuka:

$$A_2 = \sum_i S_i \alpha_i = S_1 \bar{\alpha}_1 + S_2 \bar{\alpha}_2 + S_3 \bar{\alpha}_3 = 120 \cdot 0.1 + 50 \cdot 0.05 + 50 \cdot 0.4 = 34.5 \text{ m}^2.$$

Srednji koeficijent apsorpcije ima vrednost:

$$\bar{\alpha}' = \frac{A_2}{S} = \frac{34.5}{220} = 0.157.$$

Vreme reverberacije prostorije je određeno apsorpcijom prostorije i njenom zapreminom:

$$T_{R2} = 0.162 \cdot \frac{V}{A_2} = 0.162 \cdot \frac{200}{34.5} = 0.94 \text{ s}.$$

b) U oba slučaja, pre i nakon dekorativne obrade prostorije, srednji koeficijent apsorpcije zvuka ima vrednost manju od 0.3, tako da su ispunjeni uslovi za homogeno i difuzno zvučno polje. Intenzitet zvuka je tada u svim tačkama prostorije isti i određen je vremenom reverberacije prostorije.

Pre akustičke obrade prostorije intenzitet zvuka jednak je:

$$I_1 = \frac{25 P_a T_{R1}}{V},$$

a nakon obrade:

$$I_2 = \frac{25 P_a T_{R2}}{V}.$$

Ostvareno slabljenje nivoa buke akustičkom obradom prostorije iznosi:

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 10 \log \frac{I_1}{I_0} - 10 \log \frac{I_2}{I_0} = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log \frac{\frac{25 P_a T_{R1}}{V}}{\frac{25 P_a T_{R2}}{V}} = 10 \log \frac{T_{R1}}{T_{R2}} = 10 \log \frac{1.66}{0.94} = 2.5 \text{ dB}.$$

3.2 Zvučna izolacija i izolaciona moć

ZADATAK 3.3 Predajna prostorija je industrijska hala, a prijemna konstrukcioni biro koji se nalazi iznad hale. Nivo buke u proizvodnoj hali je 90 dB. Da li je nivo buke u konstrukcionom birou, dimenzija 10×6×5 m, sa srednjom vrednošću koeficijenta apsorpcije 0.4 u dozvoljenim granicama, ako je srednja vrednost koeficijenta prenošenja tavanice 0.01? Dozvoljeni nivo buke u konstrukcionom birou iznosi 45 dB.

Rešenje: Apsorpcione karakteristike prijemne prostorije (konstrukcionog biroa) određuju nivo buke u njoj. Za određivanje apsorpcije prijemne prostorije je potrebno prethodno odrediti ukupnu površinu graničnih zidova prostorije:

$$S_2 = 2(10 \cdot 6 + 10 \cdot 5 + 6 \cdot 5) = 280 \text{ m}^2.$$

Apsorpcija prijemne prostorije ima vrednost:

$$A_2 = \sum_i S_i \alpha_i = S_2 \bar{\alpha}_2 = 280 \cdot 0.4 = 112 \text{ m}^2.$$

Koeficijent prenošenja (transmisije) određuje izolacionu moć tavanice:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{1}{0.01} = 20 \text{ dB}.$$

Zvučna izolacija između industrijske hale i konstrukcionog biroa se može odrediti primenom izraza:

$$D = R + 10 \log \frac{A_2}{S_{12}} = 20 + 10 \log \frac{112}{60} = 22.7 \text{ dB},$$

gde je S_{12} - površina zajedničke pregradne konstrukcije (tavanice) industrijske hale i konstrukcionog biroa:

$$S_{12} = 10 \cdot 6 = 60 \text{ m}^2.$$

S druge strane, zvučna izolacija je određena razlikom nivoa buke u proizvodnoj hali, L_1 , i nivoa buke u konstrukcionom birou, L_2 :

$$D = L_1 - L_2,$$

odakle se može odrediti nivo buke u konstrukcionom birou:

$$L_2 = L_1 - D = 90 - 22.7 = 67.3 \text{ dB}.$$

Nivo buke u konstrukcionom birou prekoračuje dozvoljeni nivo buke od 45 dB. Prekoračenje iznosi:

$$\Delta L = L_2 - L_{\text{doz}} = 67.3 - 45 = 22.3 \text{ dB}.$$

ZADATAK 3.4 Dve susedne prostorije oblika kocke, stranice 4 m, imaju istu srednju vrednost koeficijenta apsorpcije 0.3. U predajnoj prostoriji smešten je izvor zvuka zvučne snage 10 mW. Odrediti:

- intenzitet difuznog zvuka u predajnoj prostoriji,
- intenzitet u prijemnoj prostoriji pri koeficijentu prenošenja pregradnog zida 0.01,
- intenzitet zvuka u prostoriji ako se ukloni pregradni zid.

Rešenje: a) Intenzitet zvuka u predajnoj prostoriji određuju zvučna snaga instaliranog izvora i apsorpcione karakteristike prostorije. Za određivanje apsorpcije prijemne prostorije potrebno je prethodno odrediti ukupnu površinu graničnih zidova prostorije:

$$S_1 = 6a^2 = 6 \cdot 4^2 = 96 \text{ m}^2.$$

Apsorpcija prijemne prostorije ima vrednost:

$$A_1 = \sum_i S_i \alpha_i = S_1 \bar{\alpha}_1 = 96 \cdot 0.3 = 28.8 \text{ m}^2.$$

Intenzitet zvuka u difuznom zvučnom polju ima vrednost:

$$I_1 = \frac{4P_a}{A_1} = \frac{4 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{28.8} = 1.39 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2,$$

dok je nivo buke u predajnoj prostoriji:

$$L_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0} = 10 \log \frac{1.39 \cdot 10^{-3}}{10^{-12}} = 91.4 \text{ dB}.$$

b) Pregradni zid površine $S_{12} = 4 \cdot 4 = 16 \text{ m}^2$, čija je vrednost koeficijenta prenošenja zvuka 0.01, obezbeđuje izolacionu moć od:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{1}{0.01} = 20 \text{ dB}.$$

Kako su karakteristike prijemne prostorije iste kao i predajne, njena apsorpcija imaće istu vrednost kao i apsorpcija predajne:

$$A_2 = A_1 = 28.8 \text{ m}^2.$$

Zvučna izolacija između dve prostorije se može odrediti primenom izraza:

$$D = R + 10 \log \frac{A_2}{S_{12}} = 20 + 10 \log \frac{28.8}{16} = 22.5 \text{ dB}.$$

S druge strane, zvučna izolacija je određena razlikom nivoa buke L_1 i L_2 u posmatranim prostorijama:

$$D = L_1 - L_2,$$

odakle se može odrediti nivo buke u prijemnoj prostoriji:

$$L_2 = L_1 - D = 91.4 - 22.5 = 68.9 \text{ dB}.$$

Intenzitet zvuka u prijemnoj prostoriji je određen nivoom buke:

$$L_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0} \Rightarrow I_2 = I_0 \cdot 10^{L_2/10} = 10^{-12} \cdot 10^{68.9/10} = 7.59 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2.$$

c) Uklanjanjem pregradnog zida se povećava površina graničnih zidova koje apsorbuju zvuk, povećava se apsorpcija prostorije, a intenzitet zvuka se smanjuje. Površina graničnih zidova u novim uslovima ima vrednost:

$$S = 2(8 \cdot 4 + 8 \cdot 4 + 4 \cdot 4) = 160 \text{ m}^2.$$

Apsorpcija prostorije iznosi:

$$A = \sum_i S_i \alpha_i = \bar{S} \bar{\alpha}_1 = 160 \cdot 0.3 = 48 \text{ m}^2.$$

Intenzitet zvuka u difuznom zvučnom polju iznosi:

$$I = \frac{4P_a}{A} = \frac{4 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{48} = 8.3 \cdot 10^{-4} \text{ W/m}^2.$$

Nivo buke u prostoriji se izračunava kao:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{8.3 \cdot 10^{-4}}{10^{-12}} = 89.2 \text{ dB}.$$

ZADATAK 3.5 Odrediti zvučnu snagu izvora zvuka i intenzitet zvuka u prostoriji dimenzija $10 \times 8 \times 5$ m i srednje vrednosti koeficijenta refleksije zvuka 0.7999, koja je od prijemne prostorije odvojena pregradnim zidom izolacione moći 47.78 dB. U prijemnoj prostoriji dimenzija $20 \times 8 \times 5$ m i srednje vrednosti koeficijenta apsorpcije zvuka 0.4, izmeren je intenzitet zvuka 0.4 mW/m^2 .

Rešenje: Akustičke karakteristike prijemne prostorije površine graničnih zidova:

$$S_2 = 2(20 \cdot 8 + 20 \cdot 5 + 8 \cdot 5) = 600 \text{ m}^2,$$

određene su ukupnom apsorpcijom prostorije:

$$A_2 = \sum_i S_i \alpha_i = S_2 \bar{\alpha}_2 = 600 \cdot 0.4 = 240 \text{ m}^2.$$

Prijemna prostorija je od predajne odvojena pregradnim zidom površine $S_{12} = 8 \cdot 5 = 40 \text{ m}^2$, izolacione moći:

$$D = R + 10 \log \frac{A_2}{S_{12}} \Rightarrow R = D - 10 \log \frac{A_2}{S_{12}} = 47.78 - 10 \log \frac{240}{40} = 40 \text{ dB}.$$

Koeficijent prenošenja zvuka pregradnog zida ima vrednost:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \Rightarrow \tau = 10^{-R/10} = 10^{-40/10} = 0.0001.$$

Deo energije zvučnih talasa koji se u jedinici vremena prenese kroz pregradni zid iz predajne u prijemnu prostoriju, P_2 , generiše zvučno polje čiji je intenzitet zvuka isti u svim tačkama i jednak:

$$I_2 = \frac{4P_2}{A_2}.$$

Iz gornjeg izraza se može odrediti zvučna snaga izvora buke (pregradnog zida) u prijemnoj prostoriji:

$$P_2 = \frac{I_2 A_2}{4} = \frac{0.4 \cdot 10^{-3} \cdot 240}{4} = 0.024 \text{ W}.$$

Koeficijent prenošenja zvuka je određen odnosom energije koja padne na pregradni zid sa strane predajne prostorije i energije koja se izrača u prijemnu prostoriju:

$$\bar{\tau} = \frac{P_2}{P_1},$$

odakle se određuje energija koja u jedinici vremena padne na pregradni zid:

$$P_1 = \frac{P_2}{\bar{\tau}} = \frac{0.024}{0.0001} = 240 \text{ W}.$$

Intenzitet zvuka, generisan u predajnoj prostoriji, definiše deo energije koji padne na pregradni zid:

$$P_1 = \frac{I_1 S}{4},$$

odakle se određuje intenzitet zvuka difuznog zvučnog polja koji postoji u predajnoj prostoriji:

$$I_1 = \frac{4P_1}{S} = \frac{4 \cdot 240}{40} = 24 \text{ W/m}^2.$$

Koeficijent apsorpcije graničnih zidova prijemne prostorije, koji određuje deo energije apsorbovan graničnim zidovima, određuje se iz relacije koja povezuje sve koeficijente:

$$\bar{\alpha}_1 + \bar{r}_1 + \bar{\tau} = 1 \Rightarrow \bar{\alpha}_1 = 1 - \bar{\tau} - \bar{r}_1 = 1 - 0.0001 - 0.7999 = 0.2.$$

Apsorpcija predajne prostorije, površine graničnih zidova $S_1 = 2(10 \cdot 8 + 10 \cdot 5 + 8 \cdot 5) = 340 \text{ m}^2$, ima vrednost:

$$A_1 = \sum_i S_i \alpha_i = S_1 \bar{\alpha}_1 = 340 \cdot 0.2 = 68 \text{ m}^2.$$

S druge strane, intenzitet zvuka u difuznom zvučnom polju predajne prostorije je određen relacijom:

$$I_1 = \frac{4P_a}{A_1},$$

odakle se može odrediti zvučna snaga izvora koji generiše zvučno polje u predajnoj prostoriji:

$$P_a = \frac{I_1 A_1}{4} = \frac{24 \cdot 68}{4} = 408 \text{ W}.$$

ZADATAK 3.6 Izvor zvuka se nalazi u proizvodnoj hali dimenzija $10 \times 8 \times 4 \text{ m}$ i srednje vrednosti koeficijenta refleksije 0.6. Hala je od kancelarijskog prostora, dimenzija $8 \times 4 \times 4 \text{ m}$ i srednje vrednosti koeficijenta apsorpcije 0.5, odvojena pregradnim zidom koji obezbeđuje ukupnu zvučnu izolaciju prostorija od 40 dB. Izračunati zvučnu snagu izvora zvuka ako je nivo zvuka u kancelarijskom prostoru 70 dB.

Rešenje: Zvučna izolacija prostorija je određena razlikom nivoa buke u predajnoj i prijemnoj prostoriji. Kako je nivo buke u prijemnoj prostoriji poznat, nivo buke u predajnoj prostoriji se može odrediti na osnovu poznate zvučne izolacije prostorija:

$$D = L_1 - L_2 \Rightarrow L_1 = L_2 + D = 70 + 40 = 110 \text{ dB}.$$

Intenzitet zvuka u predajnoj prostoriji je određen nivoom buke:

$$L_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0} \Rightarrow I_1 = I_0 10^{L_1/10} = 10^{-12} \cdot 10^{110/10} = 0.1 \text{ W/m}^2.$$

Akustičke karakteristike predajne prostorije, površine graničnih zidova $S_2 = 2(8 \cdot 4 + 8 \cdot 4 + 4 \cdot 4) = 160 \text{ m}^2$, određene su apsorpcijom prostorije:

$$A_2 = \sum_i S_i \alpha_i = S_2 \bar{\alpha}_2 = 160 \cdot 0.5 = 80 \text{ m}^2.$$

Izolaciona moć pregradnog zida, površine $S_{12} = 8 \cdot 4 = 32 \text{ m}^2$:

$$R = D - 10 \log \frac{A_2}{S_{12}} = 40 - 10 \log \frac{80}{32} = 36 \text{ dB},$$

određuje koeficijent prenošenja zvuka pregradnog zida:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \Rightarrow \bar{\tau} = 10^{-R/10} = 10^{-36/10} = 2.5 \cdot 10^{-4}.$$

Koeficijent apsorpcije zvuka graničnih zidova prijemne prostorije, koji određuje deo energije apsorbovan graničnim zidovima, određuje se iz relacije koja povezuje sve koeficijente:

$$\bar{\alpha}_1 + \bar{r}_1 + \bar{\tau} = 1 \Rightarrow \bar{\alpha}_1 = 1 - \bar{\tau} - \bar{r}_1 = 1 - 0.00025 - 0.6 = 0.39975.$$

Akustičke karakteristike predajne prostorije, površine graničnih zidova $S_1 = 2(10 \cdot 8 + 10 \cdot 4 + 8 \cdot 4) = 304 \text{ m}^2$, određene su apsorpcijom prostorije:

$$A_1 = \sum_i S_i \alpha_i = S_1 \bar{\alpha}_1 = 304 \cdot 0.39975 = 121.5 \text{ m}^2.$$

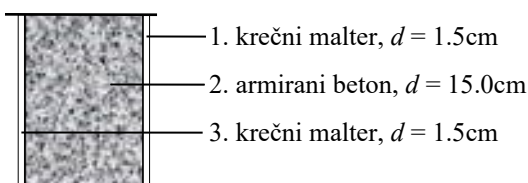
Intenzitet zvuka u difuznom zvučnom polju predajne prostorije određen je relacijom:

$$I_1 = \frac{4P_a}{A_1},$$

odakle se može odrediti zvučna snaga izvora koji generiše zvučno polje u predajnoj prostoriji:

$$P_a = \frac{I_1 A_1}{4} = \frac{0.1 \cdot 121.5}{4} = 3 \text{ W}.$$

ZADATAK 3.7 Izvršiti proračun izolacione moći jednostruke pregrade čiji je opis dat na slici. Oceniti zvučnu izolaciju pregrade ako je zahtevana minimalna ponderisana zvučna izolacija 52 dB.



Rešenje: Postupak izračunavanja izolacione moći jednostruke pregrade sprovodi se primenom algoritma koji sadrži sledeće korake:

1. Izračunavanje ukupne površinske masa pregrade, M_s

Ukupna površinska masa pregrade se izračunava sabiranjem površinskih masa slojeva pregrade na osnovu njihove debljine d [m] i gustine ρ [kg/m³]. Podaci o gustinama materijala slojeva mogu se uzeti iz tabele P.2 date u prilogu. Rezultati proračuna prikazani su u tabeli.

Opis	d [cm]	ρ [kg/m ³]	$M_s = \rho d$ [kg/m ²]
Krečni malter	1.5	1600	24.00
Armirani beton	15.0	2400	360.00
Krečni malter	1.5	1600	24.00
UKUPNA POVRŠINSKA MASA:			$M_s = 408.00$ kg/m ²

2. Izračunavanje izolacione moći pregrade na 100 Hz pri upadnom uglu 0°, R_0 , primenom izraza:

$$R_0 = 20 \log 0.773 M_s = 50 \text{ dB}.$$

3. Izračunavanje izolacione moći pregrade u difuznom zvučnom polju na 100 Hz, R , primenom izraza:

$$R = R_0 - 5 = 45 \text{ dB}.$$

4. Određivanje visine platoa krive izolacione moći (deo krive sa konstantnom vrednošću izolacione moći) korišćenjem tabele P.2 date u prilogu: Visina platoa za armirani beton ima vrednost:

$$L_p = 38 \text{ dB}.$$

5. Određivanje širine platoa krive izolacione moći u tercama (širina područja sa konstantnom vrednošću izolacione moći - platoa) korišćenjem tabele P.2 date u prilogu: Širina platoa za armirani beton ima vrednost:

$$w = 4.5.$$

6. Izračunavanje početka platoa, f_p , tj. najniže frekvencije na kojoj izolaciona moć ima konstantnu vrednost jednaku visini platoa, primenom izraza:

$$f_p \approx 230 \frac{1}{M_s} 10^{L_p/20} = 230 \frac{1}{408} 10^{38/20} = 44.8 \text{ Hz}.$$

7. Izračunavanje kraja platoa, f_k , tj. najviše frekvencije na kojoj izolaciona moć ima konstantnu vrednost jednaku širini platoa, primenom izraza:

$$f_k = w f_p = 201.6 \text{ Hz}.$$

8. Izračunavanje frekvencije kraja platoa, F_k , izražene rednim brojem terce u odnosu na tercu centralne frekvencije 100 Hz, označenu kao *nulta terca*. Izračunatu vrednost je potrebno zaokružiti na nižu celu vrednost (npr. 4.89 treba zaokružiti na 4). Primenuje se izraz:

$$F_k = 10 + \frac{3(\log f_k - 3)}{\log 2} = 10 + \frac{3(\log 201.6 - 3)}{\log 2} = 3.07 \Rightarrow F_k = 3.$$

Dakle, izolaciona moć jednostuke pregrade do treće terce (100, 125, 160, i 200 Hz) ima vrednost jednaku visini platoa.

9. Izračunavanje izolacione moći u funkciji frekvencije iznad frekvencije kraja platoa, primenom izraza:

$$R = \frac{8}{3} [x - (F_k + 4.5)] - \sqrt{\left\{ \frac{2}{3} [x - (F_k + 4.5)] \right\}^2 + 1 + (L_p + 15.162)} \text{ dB},$$

gde je x - oznaka rednog broja terce u odnosu na nultu tercu (100 Hz).

S obzirom na vrednost frekvencije kraja platoa, gornji izraz se primenjuje za izračunavanje izolacione moći pregrade počev od četvrte terce (250 Hz):

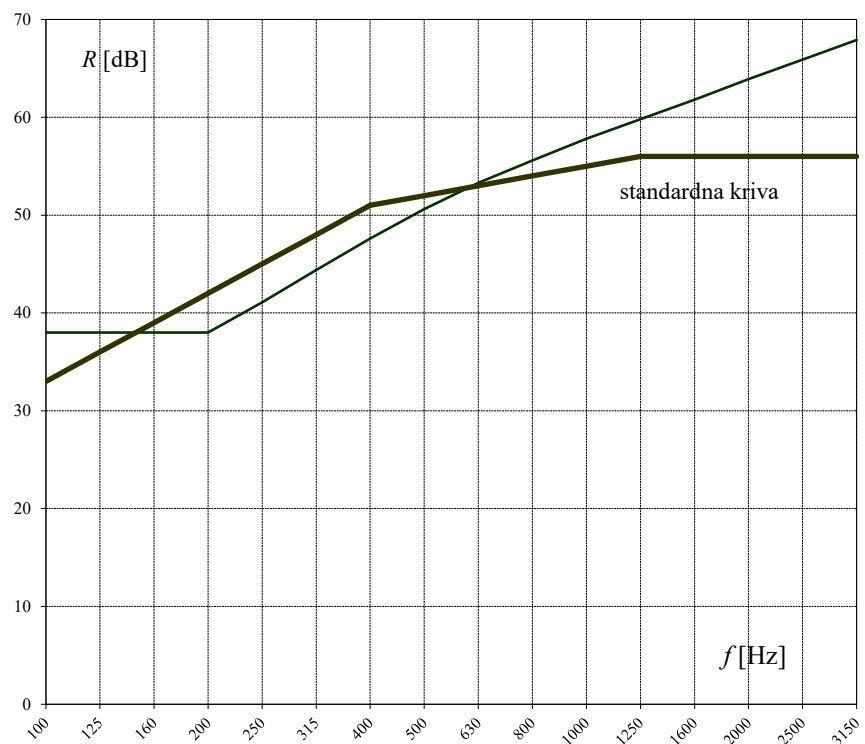
$$R_{(250\text{Hz})} = \frac{8}{3} [4 - (3.07 + 4.5)] - \sqrt{\left\{ \frac{2}{3} [4 - (3.07 + 4.5)] \right\}^2 + 1 + (38 + 15.162)} = 41.1 \text{ dB}.$$

Peta terca (315Hz):

$$R_{(315\text{Hz})} = \frac{8}{3} [5 - (3.07 + 4.5)] - \sqrt{\left\{ \frac{2}{3} [5 - (3.07 + 4.5)] \right\}^2 + 1 + (38 + 15.162)} = 44.4 \text{ dB}, \dots$$

Za ostale terce su vrednosti izolacionih moći pregrade prikazane u tabeli. Na slici je prikazana grafička prezentacija izolacione moći pregrade u funkciji frekvencije. Na istom dijagramu je prikazana i standardna kriva za proračun merodavne izolacione moći pregrade.

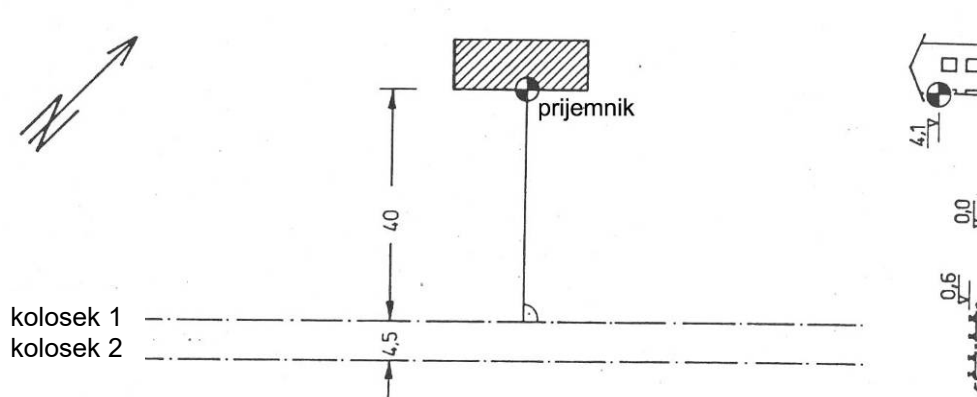
f [Hz]	x	R [dB]
100	0	38.0
125	1	38.0
160	2	38.0
200	3	38.0
250	4	41.1
315	5	44.4
400	6	47.6
500	7	50.6
630	8	53.3
800	9	55.6
1000	10	57.8
1250	11	59.8
1600	12	61.8
2000	13	63.9
2500	14	65.9
3150	15	67.9



4. MODELIRANJE BUKE

4.1 Železnički saobraćaj

ZADATAK 4.1. Izračunati merodavni nivo buke železničkog saobraćaja na poziciji stambenog objekta u toku noćnog perioda merenja. Stambeni objekat je od dvokolosečne pruge udaljen 40 m. Međusobno rastojanje koloseka iznosi 4.5 m. Visina prijemne tačke iznosi 4.1 m, a visina emisije tačke 0.6 m. Karakteristike saobraćajnog toka su date u tabeli za oba koloseka.



Tip voza	Kolosek 1		Kolosek 2		
	Voz A	Voz B	Voz C	Voz A	Voz B
Visina prijemne tačke, H [m]	4.10				
Visina emisije tačke, h_0 [m]	0.60				
Rastojanje koloseka do prijemne tačke, s [m]	40.0		44.5		
Ukupan broj vozova u toku noći, n	10.00	6.00	2.00	9.00	5.00
Procenat vagona sa disk kočnicama, p [%]	40.00	0.00	93.50	40.00	0.00
Dužina voza, L [m]	310.00	400.00	310.00	310.00	400.00
Brzina voza, v [km/h]	150.00	80.00	150.00	150.00	80.00

Rešenje: Rezultati proračuna nivoa buke u prijemnoj tački prikazani su u tabeli. Prethodno će biti opisan postupak proračuna sa odgovarajućim jednačinama u skladu sa standardom SCHALL 03.

Ukupan merodavni nivo buke na poziciji prijemne tačke se određuje kao energijska suma nivoa buke koji u istoj tački stvara železnički saobraćaj koji se odvija posmatranim kolosecima:

$$L_m = 10 \log \left[10^{0.1 \cdot L_{m1}} + 10^{0.1 \cdot L_{m2}} \right]$$

gde je: L_{m1} - merodavni nivo buke koji potiče od železničkog saobraćaja kolosekom 1,

L_{m2} - merodavni nivo buke koji potiče od železničkog saobraćaja kolosekom 2.

Merodavni nivo buke koji u prijemnoj tački stvara železnički saobraćaj određuje se kao energijska suma nivoa buke koji potiče od svih tipova vozova koji saobraćaju posmatranim kolosekom, korigovana za različite uticaje pri prostiranju zvučnih talasa:

$$L_{m(1,2)} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^k 10^{0.1 \cdot L_{0,E,i}} \right] + C_{TP} + C_D + C_G + C_B + C_Z + S + C_R,$$

gde je: k - broj različitih tipova vozova za svaki kolosek,

$L_{0,E,i}$ - referentni nivo buke za i -ti tip voza,

C_{TP} - korekcija zbog uticaja tipa pruge ($C_{TP}=0$),

C_D - korekcija zbog uticaja divergencije zvučnih talasa,

C_G - korekcija zbog uticaja apsorpcije terena i meteoroloških uslova,
 C_B - korekcija zbog uticaja barijera ($C_B=0$),
 C_Z - korekcija zbog uticaja zelenih zasada ($C_Z=0$),
 C_R - korekcija zbog uticaja bočnih refleksija ($C_R=0$),
 S - bonus: -5 dB.

Sve korekcije, osim korekcija C_D i C_G , jednake su nuli. Korekcije zbog uticaja divergencije zvučnih talasa i uticaja apsorpcije terena i meteoroloških uslova određene su najkraćim rastojanjem emisione tačke i prijemne tačke, $s_{\perp}$:

$$s_{\perp} = \sqrt{s^2 + (H - h_0)^2}$$

i srednjom visinom linije koja spaja emisonu i prijemnu tačku, h_m :

$$h_m = \frac{H + h_0}{2}.$$

Za izračunavanje korekcija se koriste izrazi:

$$C_D = 15.8 - 10 \cdot \log s_{\perp} - 0.0142 \cdot s_{\perp}^{0.9} \text{ [dB]},$$

$$C_G = -4.8 \cdot 10^{-\frac{1}{2.3} \left[\frac{h_m}{s_{\perp}} \left(8.5 + \frac{100}{s_{\perp}} \right) \right]^{1.3}} \text{ [dB]}.$$

Referentni nivo buke se za svaku klasu vozova određuje korigovanjem osnovnog nivoa buke od 51 dB korekcijama zbog karakteristika vozova koji saobraćaju posmatranim kolosecima:

$$L_{0,E,i} = 51 + C_{TV} + C_p + C_N + C_L + C_V,$$

gde je: C_{TV} - korekcija zbog uticaja tipa vozila ($C_{TV} = 0$),

C_p - korekcija zbog uticaja procenta broja vagona sa disk-kočnicama,

$$C_p = 10 \log(5 - 0.04 \cdot p) \text{ [dB]};$$

C_N - korekcija zbog uticaja broja vozova,

$$C_N = 10 \log(N) \text{ [dB]};$$

C_L - korekcija zbog uticaja dužine vozova,

$$C_L = 10 \log(0.01 \cdot L) \text{ [dB]};$$

C_V - korekcija zbog uticaja brzine vozova.

$$C_V = 20 \log(0.01 \cdot v) \text{ [dB]}.$$

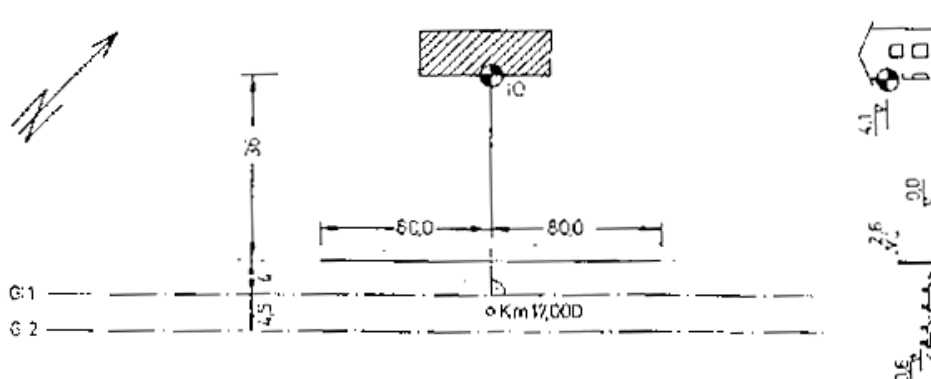
N je broj vozova koji saobraća posmatranim kolosekom u toku jednog sata i dobija se deljenjem ukupnog broja vozova u noćnom periodu sa osam.

Rezultati proračuna merodavnog nivoa buke u prijemnoj tački, na osnovu datih jednačina (SCHALL 03) i ulaznih podataka, prikazani su u sledećoj tabeli.

	Kolosek 1		Kolosek 2		
Tip voza	Voz A	Voz B	Voz C	Voz A	Voz B
Broj vozova po satu, N	1.25	0.75	0.25	1.13	0.63
Osnovni nivo buke	51	51	51	51	51
Korekcija za procenat disk kočnica, C_p [dB]	5.31	6.99	1.00	5.31	6.99
Korekcija za broj vozova, C_N [dB]	0.97	-1.25	-6.02	0.51	-2.04
Korekcija za dužinu voza, C_L [dB]	4.91	6.02	4.91	4.91	6.02
Korekcija za brzinu vozila, C_V [dB]	3.52	-1.94	3.52	3.52	-1.94
Referentni nivo buke za tip voza, $L_{0,E,i}$ [dB]	65.72	60.82	54.42	65.26	60.03

Ukupni referentni nivo buke, $L_{0,E}$ [dB]	66.94	66.67
Najkraće rastojanje, $s_{\perp}$ [m]	40.20	44.60
Srednja visina, h_m [m]	2.35	2.35
Korekcija za divergenciju, C_D [dB]	-0.64	-1.13
Korekcija za teren, C_G [dB]	-2.73	-2.98
Bonus, S [dB]	-5	-5
Merodavni nivo buke za koloseke, $L_{m,i}$ [dB]	58.57	57.56
Ukupni merodavni nivo buke, L_m [dB]	61.10	

ZADATAK 4.2. Izračunati merodavni nivo buke železničkog saobraćaja na poziciji stambenog objekta u toku noći. Stambeni objekat je od dvokolosečne pruge udaljen 40 m. Međusobno rastojanje koloseka iznosi 4.5 m. Visina prijemne tačke iznosi 4.1 m, a visina emisione tačke 0.6 m. Karakteristike saobraćajnog toku su iste kao i u zadatku 5. Na rastojanju 4 m od bližeg koloseka je postavljena barijera visine 2.6 m i širine 160 m.



Rešenje: Ukupni merodavni nivo buke na poziciji prijemne tačke se određuje kao energijska suma nivoa buke koji u istoj tački stvara železnički saobraćaj koji se odvija posmatranim kolosecima:

$$L_m = 10 \log [10^{0.1 \cdot L_{m1}} + 10^{0.1 \cdot L_{m2}}],$$

gde je: L_{m1} - merodavni nivo buke koji potiče od železničkog saobraćaja kolosekom 1,

L_{m2} - merodavni nivo buke koji potiče od železničkog saobraćaja kolosekom 2.

Merodavni nivo buke koji u prijemnoj tački stvara železnički saobraćaj određuje se kao energijska suma nivoa buke koji potiče od svih tipova vozova koji saobraćaju posmatranim kolosekom, korigovana za različite uticaje pri prostiranju zvučnih talasa:

$$L_{m(1,2)} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^k 10^{0.1 \cdot L_{0,E,i}} \right] + C_{TP} + C_D + C_G + C_B + C_Z + S + C_R,$$

gde je: k - broj različitih tipova vozova za svaku trasu,

$L_{0,E,i}$ - referentni nivo buke za i -tu klasu voza,

C_{TP} - korekcija zbog uticaja tipa pruge ($C_{TP}=0$),

C_D - korekcija zbog uticaja divergencije zvučnih talasa,

C_G - korekcija zbog uticaja apsorpcije terena i meteoroloških uslova, ($C_G=0$),

C_B - korekcija zbog uticaja barijera,

C_Z - korekcija zbog uticaja zelenih zasada ($C_Z=0$),

C_R - korekcija zbog uticaja bočnih refleksija ($C_R=0$),

S - bonus: -5dB.

Proračun ukupnog referentnog nivoa buke za sve tipove vozova, kao i proračun korekcije zbog uticaja divergencije zvučnih talasa isti je kao i u zadatku 5, tako da to u ovom zadatku predstavlja polazni podatak. Potrebno je proračunati, prema gore datoj jednačini, efekat slabljenja koji unosi barijera. Kada postoji barijera između prijemnika i izvora buke, efekat slabljenja zbog uticaja apsorpcije terena i meteoroloških uslova se zanemaruje.

Korekcija referentnog nivoa buke zbog prisustva barijere određuje se primenom izraza:

$$C_B = -7 \cdot \log \left[5 + \left(\frac{70 + 0.25 \cdot s_{\perp}}{1 + 0.2 \cdot z_{\perp}} \right) \cdot z_{\perp} K_{w\perp}^2 \right],$$

gde je: $z_{\perp}$ - razlika dužine difrakcione i direktne putanje zvučnih talasa,

$$z_{\perp} = A_{\perp} + B_{\perp} + C_{\perp} - s_{\perp};$$

$A_{\perp}$ - rastojanje izvora do gornje ivice barijere,

$B_{\perp}$ - rastojanje prijemnika do gornje ivice barijere,

$C_{\perp}$ - suma rastojanja prelomnih ivica; kako je barijera jednostruka - $C_{\perp} = 0$.

$K_{w\perp}$ - meteorološka korekcija,

$$K_{w\perp} = \exp \left(-\frac{1}{2000} \cdot \sqrt{\frac{A_{\perp} \cdot B_{\perp} \cdot s_{\perp}}{2 \cdot z_{\perp}}} \right).$$

Za kolosek 1, potrebni podaci za proračun slabljenja barijere visine $H_B = 2.6$ m, koja se nalazi na rastojanju $d = 4$ m od ose koloseka, imaju vrednosti:

$$\begin{aligned} A_{\perp} &= \sqrt{d^2 + (H_B - h_0)^2} = \sqrt{4^2 + (2.6 - 0.6)^2} = 4.47 \text{ m}, \\ B_{\perp} &= \sqrt{(s - d)^2 + (H - H_B)^2} = \sqrt{(40 - 4)^2 + (4.1 - 2.6)^2} = 36 \text{ m}, \\ z_{\perp} &= A_{\perp} + B_{\perp} - s_{\perp} = 4.47 + 36 - 40.2 = 0.3 \text{ m}, \\ K_{w\perp} &= \exp \left(-\frac{1}{2000} \cdot \sqrt{\frac{4.47 \cdot 36 \cdot 40.2}{2 \cdot 0.3}} \right) = 0.95. \end{aligned}$$

Slabljenje barijere u odnosu na železnički saobraćaj kolosekom 1 ima vrednost:

$$C_B = -7 \cdot \log \left[5 + \left(\frac{70 + 0.25 \cdot 40.2}{1 + 0.2 \cdot 0.3} \right) \cdot 0.3 \cdot 0.95^2 \right] = -9.86 \text{ dB}.$$

Za kolosek 2, koji se nalazi na rastojanju $d_1 = 4.5$ m od koloseka 1, potrebni podaci za proračun slabljenja barijere imaju vrednosti:

$$\begin{aligned} A_{\perp} &= \sqrt{(d + d_1)^2 + (H_B - h_0)^2} = \sqrt{(4 + 4.5)^2 + (2.6 - 0.6)^2} = 8.73 \text{ m}, \\ B_{\perp} &= \sqrt{(s - d)^2 + (H - H_B)^2} = \sqrt{(40 - 4)^2 + (4.1 - 2.6)^2} = 36 \text{ m}, \\ z_{\perp} &= A_{\perp} + B_{\perp} - s_{\perp} = 8.73 + 36 - 40.2 = 4.53 \text{ m}, \\ K_{w\perp} &= \exp \left(-\frac{1}{2000} \cdot \sqrt{\frac{8.73 \cdot 36 \cdot 44.6}{2 \cdot 0.16}} \right) = 0.9. \end{aligned}$$

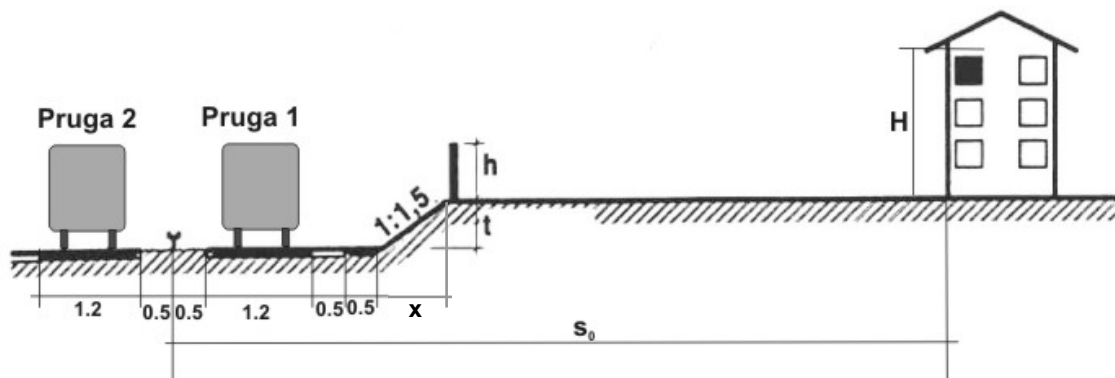
Slabljenje barijere u odnosu na železnički saobraćaj kolosekom 2 ima vrednost:

$$C_B = -7 \cdot \log \left[5 + \left(\frac{70 + 0.25 \cdot 44.6}{1 + 0.2 \cdot 0.16} \right) \cdot 0.16 \cdot 0.9^2 \right] = -8.54 \text{ dB}.$$

Proračun merodavnog nivoa buke na poziciji prijemnika u skladu sa SCHALL 03 prikazan je u sledećoj tabeli.

Ukupni referentni nivo buke, $L_{0,E}$ [dB] (zadatak 5)	66.94	66.67
Najkraće rastojanje, $s_{\perp}$ [m]	40.20	44.60
Srednja visina, h_m [m]	2.35	2.35
Korekcija za divergenciju, C_D [dB]	-0.64	-1.13
Korekcija za barijeru, C_B [dB]	-9.86	-8.54
Bonus, S [dB]	-5	-5
Merodavni nivo buke za koloseke, $L_{m,i}$ [dB]	51.44	52.01
Ukupni merodavni nivo buke, L_m [dB]	54.74	

ZADATAK 4.3. Odrediti nivo buke železničkog saobraćaja u tački R koja se nalazi u stambeno-poslovnoj zoni, usled saobraćajnog toka koji se odvija saobraćajnicom čiji je presek prikazan na slici. Uporediti dobijene vrednosti sa graničnim vrednostima za stambeno-poslovnu zonu u toku dana i noći.



	Kolosek 1				Kolosek 2			
	dan		noć		dan		noć	
	A	B	A	B	C	B	C	B
Tip pruge	Podloga od šodera, drveni pragovi				Podloga od šodera, betonski pragovi			
Ukupan broj vozova, n	15	8	8	3	8	4	5	3
Brzina voza, v [km/h]	100	80	100	80	120	80	120	80
Dužina voza, L [m]	250	300	250	300	400	300	400	300
Procenat vagona sa disk pločicama, p [%]	20	0	20	0	90	0	90	0

Rešenje: Merodavni nivo buke koji u prijemnoj tački stvara železnički saobraćaj može se izračunati primenom standarda SCHALL 03 čije su jednačine prikazane u zadacima 4.1 i 4.2. Rezultati proračuna merodavnog nivoa buke su prikazani u tabeli.

Za proračun korekcije zbog divergencije zvučnih talasa je potrebno izračunati najkraće rastojanje koloseka do prijemne tačke:

$$\text{Kolosek 1: } s_{\perp} = \sqrt{(s_0 - 0.5 - 0.6)^2 + (H + t - h_0)^2} = \sqrt{(40 - 0.5 - 0.6)^2 + (10 + 5 - 0.6)^2} = 41.48 \text{ m},$$

$$\text{Kolosek 2: } s_{\perp} = \sqrt{(s_0 + 0.5 + 0.6)^2 + (H + t - h_0)^2} = \sqrt{(40 + 0.5 + 0.6)^2 + (10 + 5 - 0.6)^2} = 43.55 \text{ m}.$$

Za proračun korekcije zbog uticaja barijere (kombinacija usečene saobraćajnice i barijere visine 3 m) potrebno je izračunati puteve koji difrakcioni zvučni talas pređe od izvora do ivice barijere i od ivice barijere do prijemnika, kao i razliku puteva direktnih i difrakcionih zvučnih talasa. Iz uslova zadatka je:

$$(1.5x)^2 = x^2 + t^2 \Rightarrow x = \frac{t}{\sqrt{1.25}} = \frac{5}{\sqrt{1.25}} = 4.47 \text{ m}.$$

Kolosek 1:

$$A_{\perp} = \sqrt{(0.6 + 0.5 + 0.5 + x)^2 + (h + t - h_0)^2} = \sqrt{(0.6 + 0.5 + 0.5 + 4.47)^2 + (3 + 5 - 0.6)^2} = 9.57 \text{ m},$$

$$B_{\perp} = \sqrt{(s_0 - 0.5 - 1.2 - 0.5 - 0.5 - x)^2 + (H - h)^2} = \sqrt{(40 - 0.5 - 1.2 - 0.5 - 0.5 - 4.47)^2 + (10 - 3)^2} = 33.57 \text{ m},$$

$$z_{\perp} = A_{\perp} + B_{\perp} - s_{\perp} = 9.57 + 33.57 - 41.48 = 1.66 \text{ m};$$

Kolosek 2:

$$A_{\perp} = \sqrt{(0.6 + 1 + 1.2 + 0.5 + 0.5 + x)^2 + (h + t - h_0)^2} = \sqrt{(0.6 + 1 + 1.2 + 0.5 + 0.5 + 4.47)^2 + (3 + 5 - 0.6)^2} = 11.1 \text{ m},$$

$$B_{\perp} = \sqrt{(s_0 - 0.5 - 1.2 - 0.5 - 0.5 - x)^2 + (H - h)^2} = \sqrt{(40 - 0.5 - 1.2 - 0.5 - 0.5 - 4.47)^2 + (10 - 3)^2} = 33.57 \text{ m},$$

$$z_{\perp} = A_{\perp} + B_{\perp} - s_{\perp} = 11.1 + 33.57 - 43.55 = 1.12 \text{ m}.$$

	Kolosek 1				Kolosek 2			
	dan		noć		dan		noć	
	A	B	A	B	C	B	C	B
Broj vozova po satu, $N=n/8$	1.875	1	1	0.375	1	0.5	0.625	0.375
Osnovni nivo buke	51	51	51	51	51	51	51	51
Korekcija za procenat disk pločica, C_p [dB]	6.23	6.99	6.23	6.99	1.46	6.99	1.46	6.99
Korekcija za broj vozova, C_N [dB]	2.73	0	0	-4.26	0	-3	-2	-4.26
Korekcija za dužinu voza, C_L [dB]	3.98	4.77	3.98	4.77	6.02	4.77	6.02	4.77
Korekcija za brzinu voza, C_V [dB]	0	-1.94	0	-1.94	1.58	-1.94	1.58	-1.94
Referentni nivo buke za tip voza, $L_{0,E,i}$ [dB]	63.94	60.82	61.21	56.56	60.06	57.82	58.06	56.56
Referentni nivo buke za tip voza, $L_{0,E,i}$ [dB]	65.66		62.49		62.09		60.38	
Najkraće rastojanje, $s_{\perp}$ [m]	41.48				43.55			
Korekcija za divergenciju, C_D [dB]	-0.78				-1.01			
Meteorološka korekcija, $K_{w\perp}$	0.97				0.96			
Korekcija za barijeru, C_B [dB]	-13.39				-12.43			
Bonus, S [dB]	-5							
Korekcija za tip pruge, C_{TP} [dB]	0				2			
Merodavni nivo buke za koloseke, $L_{m,i}$ [dB]	46.69		43.32		45.65		43.94	

Izračunati merodavni nivo buke na poziciji prijemnika, koji potiče od železničkog saobraćaja kolosecima 1 i 2, omogućava izračunavanje ukupnog merodavnog nivoa za dan i noć i njihovo poređenje sa graničnim vrednostima za stambeno-poslovnu zonu (dan: 60 dB, noć: 50 dB). Proračun prekoračenja je dat u tabeli.

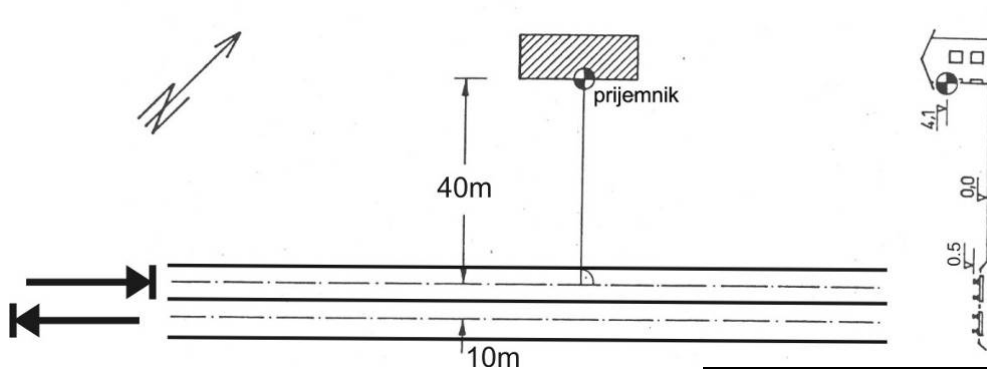
Ukupni merodavni nivo buke se računa kao energijska suma merodavnih nivoa buke koji potiču od železničkog saobraćaja kolosecima 1 i 2.

	Dan	Noć
Ukupni merodavni nivo buke, L_m [dB]	49	47
Dozvoljeni nivo buke, L_{doz} [dB]	60	50
Prekoračenje, ΔL [dB]	-	-

Primenjene mere za zaštitu od buke železničkog saobraćaja omogućavaju da merodavni nivoi buke u poslovno-stambenoj zoni zadovoljavaju granične vrednosti definisane Uredbom.

4.2 Drumski saobraćaj

ZADATAK 4.4. Izračunati merodavni nivo buke drumskog saobraćaja na poziciji stambenog objekta u toku dana i noći. Stambeni objekat je od dvosmerne saobraćajnice, bez nagiba, udaljen 40 m. Širina saobraćajnih traka u jednom pravcu iznosi 10 m. Visina prijemne tačke iznosi 4.1 m, a visina emisione tačke 0.5 m. Karakteristike saobraćajnog toka su date u tabeli za oba smera. Maksimalno dozvoljena brzina je 100 km/h za putnička vozila, odnosno 80 km/h za teretna vozila.



	Saobraćajna traka 1		Saobraćajna traka 2	
	dan	noć	dan	noć
Visina prijemne tačke, H [m]	4.1			
Visina emisione tačke, h_0 [m]	0.5			
Rastojanje prijemne tačke do ose saobraćajne trake, s [m]	40		50	
Broj vozila po času, N	600	140	600	140
Procenat kamiona, p [%]	10	20	10	20

Rešenje: Rezultati proračuna nivoa buke u prijemnoj tački su prikazani u tabeli. Prethodno će biti opisan postupak proračuna sa odgovarajućim jednačinama u skladu sa standardom RLS 90.

Ukupni merodavni nivo buke na poziciji prijemne tačke se određuje kao energijska suma nivoa buke koji u istoj tački stvara drumski saobraćaj koji se odvija posmatranim saobraćajnim trakama:

$$L_m = 10 \log [10^{0.1 \cdot L_{m1}} + 10^{0.1 \cdot L_{m2}}],$$

gde je: L_{m1} - merodavni nivo buke koji potiče od drumskog saobraćaja saobraćajnom trakom 1,

L_{m2} - merodavni nivo buke koji potiče od drumskog saobraćaja saobraćajnom trakom 2.

Merodavni nivo buke koji u prijemnoj tački stvara drumski saobraćaj se određuje na osnovu ukupnog referentnog nivoa buke koji potiče od svih tipova vozila koji saobraćaju posmatranim saobraćajnim trakama, korigovanog za različite uticaje pri prostiranju zvučnih talasa:

$$L_{m(1,2)} = L_0 + C_D + C_G + C_B + C_Z + C_R,$$

gde je: $L_{0,E}$ - ukupni referentni nivo buke za automobile i kamione,

C_D - korekcija zbog uticaja divergencije zvučnih talasa,

C_G - korekcija zbog uticaja apsorpcije terena i meteoroloških uslova,

C_B - korekcija zbog uticaja barijera ($C_B=0$),

C_Z - korekcija zbog uticaja zelenih zasada ($C_Z=0$),

C_R - korekcija zbog uticaja bočnih refleksija ($C_R=0$).

Sve korekcije, osim korekcija C_D i C_G , jednake su nuli. Korekcije zbog uticaja divergencije zvučnih talasa i uticaja apsorpcije terena i meteoroloških uslova određene su najkraćim rastojanjem emisione tačke i prijemne tačke, $s_{\perp}$:

$$s_{\perp} = \sqrt{s^2 + (H - h_0)^2}$$

i srednjom visinom linije koja spaja emisionu i prijemnu tačku, h_m :

$$h_m = \frac{H + h_0}{2}.$$

Za izračunavanje korekcija koriste se izrazi:

$$C_D = 15.8 - 10 \cdot \log s_{\perp} - 0.0142 \cdot s_{\perp}^{0.9} \text{ [dB]},$$

$$C_G = -4.8 \cdot 10^{-\frac{1}{2.3} \left[\frac{h_m}{s_{\perp}} \left(8.5 + \frac{100}{s_{\perp}} \right) \right]^{1.3}} \text{ [dB]}.$$

Ukupni referentni nivo buke se računa kao energijska suma referentnih nivoa buke koje generišu automobili i kamioni zasebno i korigovanjem te sume korekcijama zbog karakteristika saobraćajnih traka:

$$L_0 = 10 \log \left(10^{0.1 \cdot L_{0,A}} + 10^{0.1 \cdot L_{0,K}} \right) + C_{Np} + C_{pp} \text{ [dB]},$$

gde je: $L_{0,A}$ - referentni nivo buke za automobile,

$L_{0,K}$ - referentni nivo buke za kamione,

C_{Np} - korekcija zbog uticaja nagiba puta ($C_{Np}=0$),

C_{pp} - korekcija zbog uticaja površine puta ($C_{pp}=0$).

Referentni nivo buke za automobile se određuje korigovanjem osnovnog nivoa buke od 27.7 dB korekcijama za broj i brzinu automobila:

$$L_{0,A} = 27.7 + 10 \log N_A + 10 \log \left[1 + (0.02 \cdot v_A)^3 \right] \text{ [dB]}.$$

Referentni nivo buke za kamione se određuje korigovanjem osnovnog nivoa buke od 23.1 dB korekcijama za broj i brzinu kamiona:

$$L_{0,K} = 23.1 + 10 \log N_K + 12.5 \log v_K \text{ [dB]}.$$

Ukupan broj automobila N_A i kamiona N_K u toku jednog časa se određuju na osnovu ukupnog broja vozila i procenta kamiona:

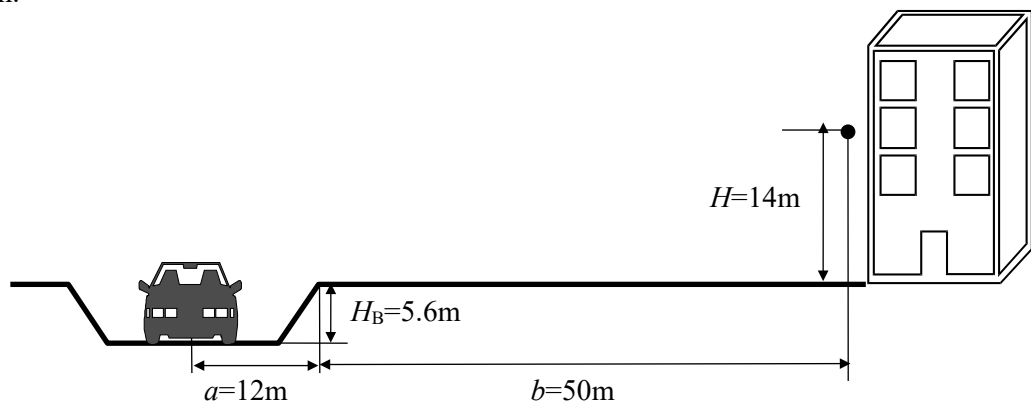
$$N_A = \frac{N(100 - p)}{100},$$

$$N_K = \frac{N \cdot p}{100}.$$

Rezultati proračuna merodavnog nivoa buke u prijemnoj tački, na osnovu datih jednačina i ulaznih podataka, prikazani su u sledećoj tabeli.

	Saobraćajna traka 1		Saobraćajna traka 2	
	dan	noć	dan	noć
Broj automobila, N_A	540	112	540	112
Broj kamiona, N_K	60	28	60	28
Brzina automobila, v_A [km/h]	100	100	100	100
Brzina kamiona, v_K [km/h]	80	80	80	80
Osnovni nivo buke automobila, $L_{0,A}$ [dB]	64.57	57.73	64.57	57.73
Osnovni nivo buke kamiona, $L_{0,K}$ [dB]	64.67	61.36	64.67	61.36

Ukupni osnovni nivo buke, L_0 [dB]	67.63	62.93	67.63	62.93
Najkraće rastojanje, $s_{\perp}$ [m]	40.20		50.10	
Srednja visina, h_m [m]	2.30			
Korekcija za divergenciju, C_D [dB]	-0.64		-1.68	
Korekcija za teren, C_G [dB]	-2.78		-3.26	
Merodavni nivo buke za saobraćajnu traku, $L_{m,i}$ [dB]	64.22	62.93	62.69	57.99
	dan		noć	
Ukupni merodavni nivo buke, L_m [dB]	66.5		64.1	



$$L_m = L_0 + C_D + C_G + C_R + C_Z + C_R,$$

Sve korekcije, osim korekcija C_D i C_B , jednake su nuli. U slučaju postojanja barijere (usečena saobraćajnica) zamenjuje se korekcija zbog uticaja apsorpcije terena i meteoroloških uslova. Korekcija zbog uticaja divergencije zvučnih talasa je određena najkraćim rastojanjem emisione i prijemne tačke, $s_{\perp}$:

$$s_{\perp} = \sqrt{(a+b)^2 + (H + H_B - h_0)^2} = \sqrt{(50+12)^2 + (14+5.6-0.5)^2} = 64.9\text{ m},$$

Korekcija referentnog nivoa buke zbog prisustva bariere se određuje primenom izraza:

$$C_B = -7 \cdot \log \left[5 + \left(\frac{70 + 0.25 \cdot s_{\perp}}{1 + 0.2 \cdot z_{\perp}} \right) \cdot z_{\perp} K_{w\perp}^2 \right],$$

gde je: $z_{\perp}$ - razlika dužine difrakcione i direktne putanje zvučnih talasa,

$A_{\perp}$ - rastojanje izvora do gornje ivice barijere,

$$A_{\perp} = \sqrt{a^2 + (H_B - h_0)^2} = \sqrt{12^2 + (5.6 - 0.5)^2} = 13.04 \text{ m};$$

$B_{\perp}$ - rastojanje prijemnika do gornje ivice barijere,

$$B_{\perp} = \sqrt{b^2 + H^2} = \sqrt{14^2 + 50^2} = 51.92 \text{ m};$$

$C_{\perp}$ - suma rastojanja prelomnih ivica; kako je barijera jednostruka - $C_{\perp} = 0$,

$K_{w\perp}$ - meteorološka korekcija.

Razlika dužine difrakcione i direktne putanje zvučnih talasa jednaka je:

$$z_{\perp} = A_{\perp} + B_{\perp} + C_{\perp} - s_{\perp} = 13.04 + 51.92 + 0 - 64.9 = 0.09 \text{ m},$$

Meteorološka korekcija određena je izrazom:

$$K_{w\perp} = \exp\left(-\frac{1}{2000} \cdot \sqrt{\frac{A_{\perp} \cdot B_{\perp} \cdot s_{\perp}}{2 \cdot z_{\perp}}}\right) = \exp\left(-\frac{1}{2000} \cdot \sqrt{\frac{13.04 \cdot 51.92 \cdot 64.9}{2 \cdot 0.09}}\right) = 0.78.$$

Konačno, slabljenje barijere ima vrednost:

$$C_B = -7 \cdot \log\left[5 + \left(\frac{70 + 0.25 \cdot s_{\perp}}{1 + 0.2 \cdot z_{\perp}}\right) \cdot z_{\perp} K_{w\perp}^2\right] = -7 \cdot \log\left[5 + \left(\frac{70 + 0.25 \cdot 64.9}{1 + 0.2 \cdot 0.09}\right) \cdot 0.09 \cdot 0.78^2\right] = -6.82 \text{ dB}.$$

Ukupni referentni nivo buke se računa kao energijska suma referentnih nivoa buke koje generišu automobili i kamioni zasebno, korigovana korekcijama zbog karakteristika saobraćajnih traka:

$$L_0 = 10 \log(10^{0.1 \cdot L_{0,A}} + 10^{0.1 \cdot L_{0,K}}) + C_{Np} + C_{pp} \text{ [dB]},$$

gde je: $L_{0,A}$ - referentni nivo buke za automobile,

$L_{0,K}$ - referentni nivo buke za kamione,

C_{Np} - korekcija zbog uticaja nagiba puta ($C_{Np} = 0$),

C_{pp} - korekcija zbog uticaja površine puta ($C_{pp} = 0$).

Ukupan broj automobila N_A i kamiona N_K u toku jednog časa se određuju na osnovu ukupnog broja vozila i procenta kamiona:

$$N_A = \frac{N(100 - p)}{100} = \frac{2000 \cdot (100 - 40)}{100} = 1200 \text{ aut/h},$$

$$N_K = \frac{N \cdot p}{100} = \frac{2000 \cdot 40}{100} = 800 \text{ kam/h}.$$

Referentni nivo buke za automobile se određuje korigovanjem osnovnog nivoa buke od 27.7 dB korekcijama za broj i brzinu automobila:

$$L_{0,A} = 27.7 + 10 \log N_A + 10 \log\left[1 + (0.02 \cdot v_A)^3\right] = 27.7 + 10 \log 1200 + 10 \log\left[1 + (0.02 \cdot 60)^3\right] = 62.85 \text{ dB}.$$

Referentni nivo buke za kamione se određuje korigovanjem osnovnog nivoa buke od 23.1 dB korekcijama za broj i brzinu kamiona:

$$L_{0,K} = 23.1 + 10 \log N_K + 12.5 \log v_K = 23.1 + 10 \log 800 + 12.5 \log 60 = 74.36 \text{ dB}.$$

Ukupni referentni nivo buke sada ima vrednost:

$$L_0 = 10 \log(10^{0.1 \cdot L_{0,A}} + 10^{0.1 \cdot L_{0,K}}) + C_{Np} + C_{pp} = 10 \log(10^{6.285} + 10^{7.436}) + 0 + 0 = 74.65 \text{ dB}.$$

Merodavni nivo buke koji u prijemnoj tački stvara drumski saobraćaj usečenom saobraćajnicom jednak je:

$$L_m = L_0 + C_D + C_G + C_B + C_Z + C_R = 74.65 - 2.93 + 0 - 6.82 + 0 + 0 = 64.91 \text{ dB}.$$

Dobijeni ukupni nivo buke je potrebno je konvertovati u spektralne komponente buke oduzimanjem korekcije od ukupnog nivoa buke. Tako dobijene vrednosti se upoređuju sa dozvoljenim vrednostima koje su određene normativnom krivom N-50. Nominalna vrednost normativne krive određena je na osnovu definisane granične

vrednosti indikatora buke u stambenim oblastima za dnevni period od 55 dB, oduzimanjem od te vrednosti 5 dB. Frekvencijska zavisnost normativne krive određuje se izrazom:

$$L(f) = a(f) + b(f)N,$$

gde je $N = 50$.

Rezultati proračuna frekvencijskog spektra buke u prijemnoj tački, dozvoljenih vrednosti nivoa buke po frekvencijama i prekoračenja buke, prikazani su u tabeli:

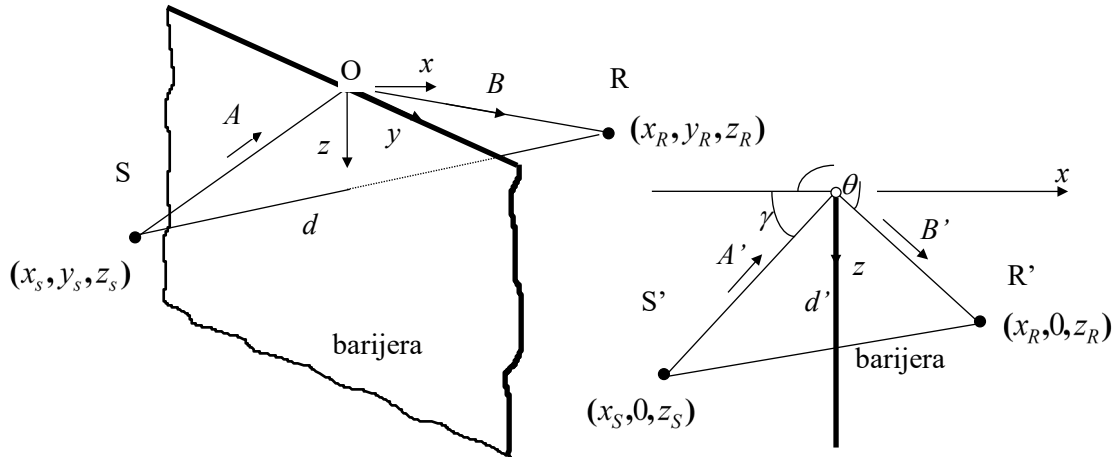
	f [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Korekcija ukupnog nivoa buke	-14	-10.00	-7	-4	-7	-12
Frekvencijski spektar saobraćajne buke u prijemnoj tački, [dB]	50.91	54.91	57.91	60.91	57.91	52.91
Koeficijent a	22.00	12	4.80	0	-3.5	-6.1
Koeficijent b	0.87	0.93	0.97	1	1.015	1.025
Frekvencijska zavisnost normativne krive N-50, [dB]	65.5	58.5	53.5	50	47.25	45.15
Prekoračenje, [dB]	-	-	4.41	10.91	10.66	7.76

5. KONTROLA BUKE

5.1 Barijere

ZADATAK 5.1. Akustički centar izvora buke se nalazi u tački $S(-3,2,2)$. Odrediti slabljenje nivoa buke u tački $R(20,-2,1)$, u oktavnim pojasevima centralnih frekvencija $63 \div 4000$ Hz, postignuto barijerom koja je postavljena tako da je gornja ivica normalna na koordinatnu osu x i poklapa se sa osom y .

Rešenje: Geometrija problema u xyz koordinatnom sistemu je prikazana na slici. Na slici desno je prikazana projekcija u zx ravni.



Koordinate izvora i prijemnika definišu rastojanja tačaka S i R od koordinatnog početka u pravcima koordinatnih osa:

$$x_S = -3 \text{ m}, y_S = 2 \text{ m}, z_S = 2 \text{ m}, x_R = 20 \text{ m}, y_R = -2 \text{ m}, z_R = 1 \text{ m}.$$

Direktan zvučni talas pređe put koji je jednak rastojanju tačaka S i R :

$$d = \sqrt{(x_S - x_R)^2 + (y_S - y_R)^2 + (z_S - z_R)^2} = \sqrt{(-3 - 20)^2 + (2 + 2)^2 + (2 - 1)^2} = 23.4 \text{ m}.$$

Difrakcioni zvučni talas pređe put dužine $A+B$, koja se može odrediti kao:

$$A+B = \sqrt{(A'+B')^2 + (y_S - y_R)^2},$$

gde je: A' - dužina projekcije dela difrakcione putanje A na zx ravan,

B' - dužina projekcije dela difrakcione putanje B na zx ravan.

Dužine A' i B' se mogu odrediti sa slike desno, koja predstavlja projekciju na zx ravan:

$$A' = \sqrt{x_S^2 + z_S^2} = \sqrt{(-3)^2 + 2^2} = 3.6 \text{ m},$$

$$B' = \sqrt{x_R^2 + z_R^2} = \sqrt{20^2 + 1^2} = 20 \text{ m},$$

tako da je:

$$A+B = \sqrt{(A'+B')^2 + (y_S - y_R)^2} = \sqrt{(3.6 + 20)^2 + (2 + 2)^2} = 24 \text{ m}.$$

Slabljenje barijere u funkciji frekvencije dato je izrazom:

$$C_B = - \left[20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh(\sqrt{2\pi N})} + 5 \right] \text{ dB},$$

gde je N - Fresnelov broj koji se može izračunati na osnovu razlike puteva difrakcione i direktne putanje:

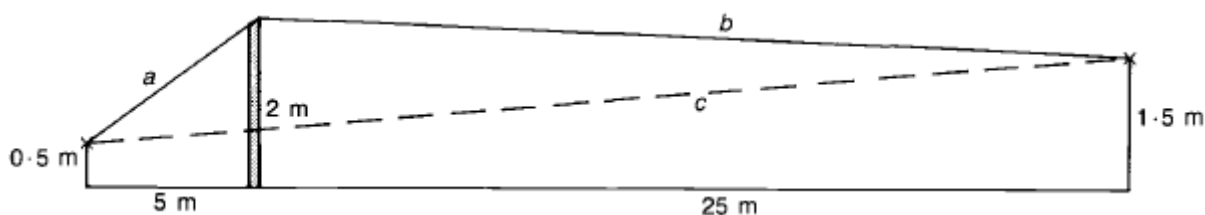
$$N = \frac{2}{\lambda} (A+B-d).$$

Rezultati proračuna slabljenja barijere su dati u tabeli.

f_0 [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
λ [m]	5.4	2.72	1.36	0.68	0.34	0.17	0.085
N	0.22	0.44	0.88	1.76	3.53	7.06	14.12
C_B [dB]	-8.1	-10	-12.6	-15.5	-18.5	-21.5	-24.5

ZADATAK 5.2. Kompresor treba da se koristi 30 m od kuće a u cilju smanjenja nivoa buke na rastojanju 5 m od kompresora je podignuta barijera visine 2 m. Centar kompresora je 0.5 m iznad zemlje. Izračunati smanjenje nivo buke u oktavnim opsezima centralnih frekvencija os 63 do 4000 Hz koje stvara barijera na tački ispred kuće na visini od 1.5 m.

Rešenje: Geometrija problema prikazana je na slici.



Za izračunavanje korekcije barijere potrebno je izračunati dužine putanja difrakcionih zvučnih talasa od izvora do gornje ivice barijere i od gornje ivice barijere do izvora:

$$a = \sqrt{5^2 + (2 - 0.5)^2} = \sqrt{25 + 1.5^2} = 5.22 \text{ m},$$

$$b = \sqrt{25^2 + (2 - 1.5)^2} = \sqrt{625 + 0.5^2} = 25.005 \text{ m},$$

kao i dužinu putanje direktnih zvučnih talasa:

$$c = \sqrt{30^2 + (1.5 - 0.5)^2} = \sqrt{900 + 1} = 30.017 \text{ m}.$$

Razlika putanja difrakcionog i direktnog talasa je:

$$\delta = a + b - c = 5.22 + 25.005 - 30.017 = 0.208 \text{ m}$$

Slabljenje barijere u funkciji frekvencije dato je izrazom:

$$C_B = - \left[20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\text{tgh}(\sqrt{2\pi N})} + 5 \right] \text{ dB},$$

gde je N - Fresnelov broj koji se može izračunati na osnovu razlike puteva difrakcione i direktne putanje:

$$N = \frac{2}{\lambda} (a + b - c) = \frac{2}{\lambda} \delta,$$

gde je λ - talasna dužina:

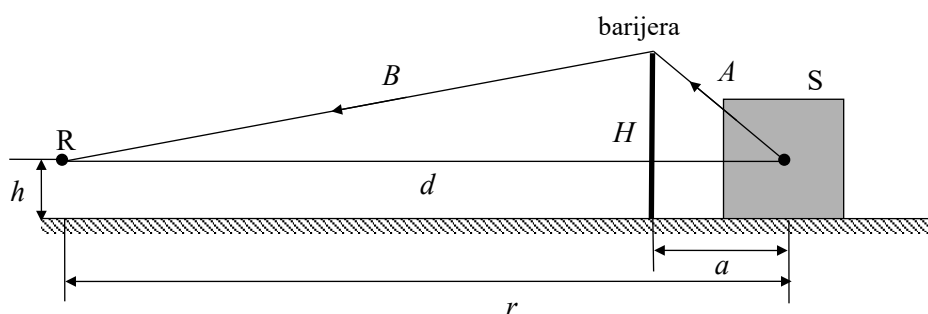
$$\lambda = \frac{c}{f_0} = \frac{340}{f_0}$$

Rezultati proračuna slabljenja barijere dati su u tabeli.

f_0 [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
λ [m]	5.4	2.72	1.36	0.68	0.34	0.17	0.085
N	0.077	0.153	0.306	0.612	1.224	2.447	4.894
C_B [dB]	-6.3	-7.3	-8.9	-11.2	-13.9	-16.9	-19.9

ZADATAK 5.3. Pumpna stanica, čiji se akustički centar nalazi na visini 1 m, emituje buku čiji je ukupni nivo na rastojanju 1 m od akustičkog centra 90 dB. Spektar buke u frekvencijskom opsegu centralnih frekvencija $63 \div 4000$ Hz je takav da je nivo u svim oktavama isti. Na rastojanju 2 m od izvora buke je postavljena barijera visine 3 m. Odrediti ukupni nivo buke u tački R koja se nalazi na visini od 1 m i na rastojanju 20 m od akustičkog centra pumpne stanice, ukoliko se zanemari prenos energiju kroz barijeru.

Rešenje: Geometrija problema prikazana je na slici.



Kako je nivo buke u svim oktavama isti, to je i intenzitet zvuka isti, tako da je rezultujući intenzitet na rastojanju 1 m od izvora jednak sumi intenziteta po oktavama:

$$I_{R1} = I + I + I + I + I + I + I + I = 7I.$$

Rezultujući nivo buke od 90 dB je određen rezultujućim intenzitetom:

$$L_{R1} = 10 \log \frac{I_R}{I_0} = 10 \log \frac{7I}{I_0} = 10 \log \frac{I}{I_0} + 10 \log 7 = L_1 + 8.45.$$

Dakle, nivo buke na rastojanju 1 m od izvora je u svim oktavama isti i ima vrednost:

$$L_1 = L_{R1} - 8.45 = 81.5 \text{ dB}.$$

Nivo buke na rastojanju 20 m od izvora buke je određen slabljenjem nivoa buke usled divergencije zvučnih talasa i slabljenjem barijere:

$$L_2 = L_1 + C_D + C_B.$$

Korekcija usled divergencije zvučnih talasa je frekvencijski nezavisna i s obzirom na to da se radi o tačkastom izvoru buke, može se odrediti kao:

$$C_D = 20 \log \frac{r_1}{r_2} = 20 \log \frac{1}{20} = -26 \text{ dB}.$$

Za izračunavanje korekcije barijere potrebno je izračunati dužine putanja difrakcionih zvučnih talasa od izvora do gornje ivice barijere i od gornje ivice barijere do izvora:

$$A = \sqrt{a^2 + (H - h)^2} = \sqrt{2^2 + (3 - 1)^2} = 2.83 \text{ m},$$

$$B = \sqrt{(r - a)^2 + (H - h)^2} = \sqrt{(20 - 2)^2 + (3 - 1)^2} = 18.1 \text{ m},$$

kao i dužinu putanje direktnih zvučnih talasa:

$$d = r = 20 \text{ m}.$$

Slabljenje barijere u funkciji frekvencije dato je izrazom:

$$C_B = - \left[20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\text{tgh}(\sqrt{2\pi N})} + 5 \right] \text{ dB},$$

gde je N - Fresnelov broj koji se može izračunati na osnovu razlike puteva difrakcione i direktne putanje:

$$N = \frac{2}{\lambda}(A + B - d).$$

Rezultati proračuna slabljenja barijere dati su u tabeli.

f_0 [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
I [W/m ²]	I	I	I	I	I	I	I
L_1 [dB]	81.5	81.5	81.5	81.5	81.5	81.5	81.5
λ [m]	5.4	2.72	1.36	0.68	0.34	0.17	0.085
N	0.35	0.69	1.38	2.76	5.52	11	22.1
C_B [dB]	-9.3	-11.6	-14.4	-17.4	-20.4	-23.4	-26.4
C_D [dB]	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26
L_2 [dB]	46.2	43.9	41.1	38.1	35.1	32.1	29.1

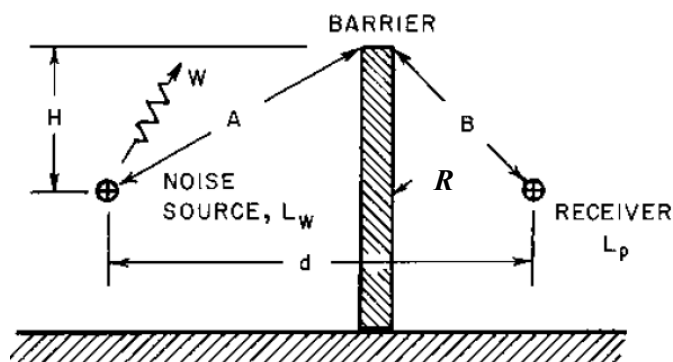
Ukupni nivo buke na rastojanju 20 m od izvora buke se određuje kao energijska suma oktavnih nivoa buke:

$$L_2 = 10 \log(10^{4.62} + 10^{4.39} + 10^{4.11} + 10^{3.81} + 10^{3.51} + 10^{3.21} + 10^{2.91}) = 49.6 \text{ dB}.$$

ZADATAK 5.4. Betonska barijera debljine 100 mm je izgrađena oko transformatorske stanice koja je postavljena na otvorenom prostoru. Vrh barijere se nalazi 2.5 m iznad akustičkog centra transformatorske stanice. Barijera je postavljena na rastojanju 10 m od transformatorske stanice. Prijemnik je lociran na rastojanju 30 m od transformatorske stanice na istoj visini kao i akustički centar izvora. Nivo zvučne snage transformatora i izolaciona moć barijere su dati u tabeli. Odrediti A-ponderisani nivo zvučnog pritiska na poziciji prijemnika, sa i bez barijere. Uzeti da je faktor usmerenosti transformatora 1, odnosno da je transformator neusmeren.

f_0 [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_W [dB]	112	116	110	106	106	100	95	89
R [dB]	36	38	38	38	38	44	50	56

Rešenje: Detaljan proračun će biti urađen za 500 Hz a ostali podaci su dati u tabeli.



Za slučaj bez barijere nivo zvučnog pritiska na poziciji prijemnika se može izračunati kao:

$$L_p^0 = L_W + G - 20 \log d - 11 = L_W - 20 \log d - 11 = 106 - 20 \log 30 - 11 = 65.5 \text{ dB}$$

Korekcijom proračunatih nivoa zvučnih pritisaka zbog primene A-ponderacione krive dobijaju se A-ponderisani nivoi zvučnih pritisaka:

$$L_{pA}^0 = L_p^0 + \Delta_A = 62.3 + (-3.2) = 59.1 \text{ dB}$$

Energijskim sabiranjem A-ponderisanih nivoa zvučnih pritisaka po frekvencijama dobija se ukupni A-ponderisani nivoa zvučnog pritiska na poziciji prijemnika bez primene barijere:

$$L_A^0 = 10 \log(10^{4.53} + 10^{5.94} + 10^{6.09} + 10^{6.23} + 10^{6.55} + 10^{6.07} + 10^{5.55} + 10^{4.74}) = 69.5 \text{ dB}.$$

Radi proračuna Fresnelovog broja izračunavaju se sledeće veličine (vidi sliku):

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{a^2 + H^2} = \sqrt{10^2 + 2.5^2} = 10.308 \text{ m}, \\ B &= \sqrt{(d-a)^2 + H^2} = \sqrt{(30-10)^2 + 2.5^2} = 20.156 \text{ m}, \\ A + B - d &= 10.308 - 20.156 - 30 = 0.463 \text{ m}. \end{aligned}$$

Fresnelov broj se izračunava kao:

$$N = \frac{2}{\lambda}(A + B - d) = \frac{2c}{f}(A + B - d) = \frac{2 \cdot 340}{500} \cdot 0.463 = 1.362,$$

Slabljenje barijere u funkciji frekvencije dato je izrazom:

$$C_B = - \left[20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\text{tgh}(\sqrt{2\pi N})} + 5 \right] = - \left[20 \log \frac{\sqrt{2\pi \cdot 1.362}}{\text{tgh}(\sqrt{2\pi \cdot 1.362})} + 5 \right] = 14.4 \text{ dB},$$

Nivo zvučnog pritiska na poziciji prijemnika koji nastaje kao posledica difrakcije zvučnih talasa oko barijere se može izračunati kao:

$$L_{p1} = L_p^0 + C_B = 65.5 - 14.4 = 51.1 \text{ dB}$$

Nivo zvučnog pritiska na poziciji prijemnika koji nastaje kao posledica prostiranja direktnih talasa kroz barijeru se može izračunati kao:

$$L_{p2} = L_W + G - 20 \log d - R - 11 = 106 - 20 \log 30 - 38 - 11 = 27.5 \text{ dB}$$

Kako su nivoi L_{p2} mnogo manji od L_{p1} , to je ukupni nivo zvučnog pritiska na poziciji prijemnika za slučaj postavljenje barijere jednak nivou zvučnog pritiska koji nastaje kao posledica difrakcije zvučnih talasa.

Nakon korekcije nivoa zvučnog pritiska zbog A-ponderacione frekvencijske krive može se odrediti A-ponderisani nivo zvučnog pritiska na poziciji prijemnika za slučaj postavljenje barijere:

$$L_A = 10 \log(10^{3.77} + 10^{5.01} + 10^{4.93} + 10^{4.79} + 10^{4.81} + 10^{4.03} + 10^{3.21} + 10^{3.1}) = 55.2 \text{ dB}.$$

Dakle, postignuto slabljenje postavljanjem barijere iznosi 14.3 dB.

f_0 [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_p^0 [dB]	71.5	75.5	69.5	65.5	65.5	59.5	54.5	48.5
Δ_A [dB]	-26.2	-16.1	-8.6	-3.2	0	1.2	1	-1.1
L_{pA}^0 [dB]	45.3	59.4	60.9	62.3	65.5	60.7	55.5	47.4
N	0.172	0.340	0.681	1.362	2.724	5.447	10.894	2.179
C_B [dB]	-7.5	-9.2	-11.6	-14.4	-17.3	-20.3	-23.4	-16.4
L_{p1} [dB]	63.9	66.2	57.9	51.1	48.1	39.1	31.1	32.1
L_{p2} [dB]	35.5	37.5	31.5	27.5	27.5	15.5	4.5	-7.5
L_p [dB]	63.9	66.2	57.9	51.1	48.1	39.1	31.1	32.1
L_{pA} [dB]	37.7	50.1	49.3	47.9	48.1	40.3	32.1	31.0

5.2 Oklapanje izvora buke

ZADATAK 5.5. Vazdušni kompresor u fabričkoj hali generiše difuzno zvučno polje čiji je nivo 105 dB. Kao mera za kontrolu buke planirano je da se kompresor oklopi sa oklopom dimenzija 1.5m x 2.5 m x 1.5 m. Oklop će bit obložen apsorpcionim materijalom debljine 50 mm čiji je koeficijent apsorpcije 0.8. Pod oklopa je od betona sa koeficijentom apsorpcije od 0.04. Izračunati potrebnu izolacionu moć oklopa da se nivo buke u fabričkoj hali smanji na 85 dB.

Rešenje: Pre oklapanja kompresora nivo buke u difuznom polju hale iznosi:

$$\begin{aligned}I_2 &= \frac{4P_a}{A_2} / 10^{-12} \\ \frac{I_2}{10^{-12}} &= \frac{P_a}{10^{-12}} \frac{4}{A_2} \\ 10 \log \frac{I_2}{10^{-12}} &= 10 \log \frac{P_a}{10^{-12}} - 10 \log A_2 + 6 \\ L_2 &= L_w - 10 \log A_2 + 6\end{aligned}$$

Kada se kompresor oklopi nivo buke u difuznom polju može da se izračuna posmatrajući prostoriju oklopa kao predajnu prostoriju a prostoriju hale kao prijemnu prostoriju uz pretpostavku difuznoszi zvučnog polja u obe prostorije.

Izvor zvuka, zvučne snage P_a , u predajnoj prostoriji apsorpcione površine A_1 , formira homogeno difuzno zvučno polje sa jednakim intenzitetom u svim tačkama:

$$I_1 = \frac{4P_a}{A_1}.$$

Energija koja u jedinici vremena u predajnoj prostoriji padne na površinu oklopa S_{okl} , može se izračunati primenom jednačine:

$$P_1 = \frac{I_1 S_{okl}}{4}.$$

Deo zvučne energije koja se direktnim putem prenosi u prijemnu prostoriju određen je koeficijentom prenošenja zvuka:

$$P_2 = \tau P_1.$$

U prijemnoj prostoriji pregrada preuzima ulogu izvora zvuka, čija je zvučna snaga P_2 . Oklop, kao izvor zvuka, formira u prijemnoj prostoriji apsorpcione površine A_2 homogeno difuzno zvučno polje sa jednakim intenzitetom zvuka u svim tačkama:

$$I_2 = \frac{4P_2}{A_2}.$$

Zvučna energija koja se u jedinici vremena izrači u prijemnu prostoriju može se izračunati iz jednačine:

$$P_2 = \frac{I_2 A_2}{4}.$$

Koeficijent prenošenja zvuka se određuje kao:

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\frac{I_2 A_2}{4}}{\frac{I_1 S_{okl}}{4}} = \frac{I_2 A_2}{I_1 S_{okl}}.$$

Izolaciona moć pregrade jednaka je:

$$\begin{aligned}R &= 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{I_1 S_{okl}}{I_2 A_2} = 10 \log \frac{I_1}{I_2} + 10 \log \frac{S_{okl}}{A_2} \\ R &= L_1 - L_2 + 10 \log S_{okl} - 10 \log A_2\end{aligned}$$

Iz gornje jednačine se može izvesti izraz za nivo buke u fabričkoj hali nakon oklapanja mašine

$$\dot{L}_2 = L_1 - R + 10 \log S_{\text{okl}} - 10 \log A_2$$

gde je L_1 nivo buke unutar oklopa koji se može izračunati kao:

$$L_1 = L_w - 10 \log A_1 + 6$$

Smanjenje nivoa buke se može izračunati kao:

$$\Delta L = L_2 - \dot{L}_2$$

$$\Delta L = L_w - 10 \log A_2 + 6 - L_1 + R - 10 \log S_{\text{okl}} + 10 \log A_2$$

$$\Delta L = L_w - 10 \log A_2 + 6 - L_w + 10 \log A_1 - 6 + R - 10 \log S_{\text{okl}} + 10 \log A_2$$

$$\Delta L = R + 10 \log A_1 - 10 \log S_{\text{okl}}$$

$$\Delta L = R + 10 \log (S_{\text{okl}} \alpha_{\text{okl}} + S_p \alpha_p) - 10 \log S_{\text{okl}}$$

Ako se zanemari uticaj apsorpcije poda oklopa na ukupnu apsorpcionu površinu oklopa zbog malog koeficijenta apsorpcije poda i činjenice da kompresor u većoj meri pokriva :

$$\Delta L = R + 10 \log (S_{\text{okl}} \alpha_{\text{okl}}) - 10 \log S_{\text{okl}}$$

$$\Delta L = R + 10 \log S_{\text{okl}} + 10 \log \alpha_{\text{okl}} - 10 \log S_{\text{okl}}$$

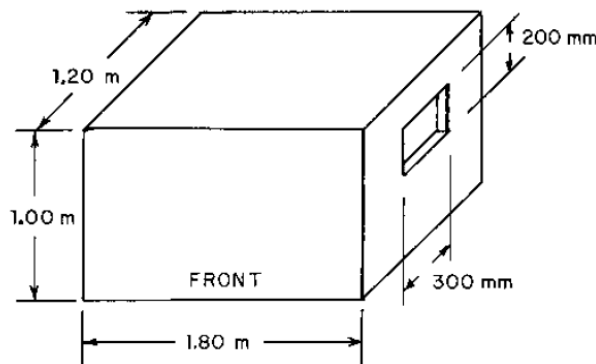
$$\Delta L = R + 10 \log \alpha_{\text{okl}}$$

Za podatke iz zadatka potreba izolaciona moć oklopa da bi se dobilo smanjenje buke od 20 dB iznosi:

$$R = \Delta L - 10 \log \alpha_{\text{okl}} = 20 - 10 \log 0.8 = 21 \text{ dB}$$

ZADATAK 5.6. Mašina sa kojom radnik rukuje ima spektar nivoa buke koji je dat u tabeli. Mašina se nalazi u proizvodnoj hali dimenzija 20 m x 20 m x 4 m srednjeg koeficijenta apsorpcije koji je dat u tabeli. Mašina se može posmatrati kao neusmereni izvor. U cilju smanjenja buke u proizvodnoj hali oko mašine je postavljen oklop dimenzija 1.8 m x 1.2 m x 1 m. Kako bi se dozvolio protok materijala na obe bočne strane oklopa postoje otvori dimenzija 0.3 m x 0.2 m. Oklop je napravljen od 25 mm iverice koja je pokrivena slojem apsorpcionog materijala debljine 2.5 cm. Koeficijenti transmisije i apsorpcije materijala za oklop su dati u tabeli. Odrediti nivo zvučnog pritiska na poziciji operatera koji se nalazi ispred mašine na rastojanju 3 m od mašine za oba slučaja: bez i sa oklopom. Takođe odrediti dozvoljeno vreme izloženosti buci da ne budu prekoračene akcione vrednosti nivoa dnevne izloženosti buci.

f_0 [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
L_w [dB]	95	99	106	104	105	108
$\bar{\alpha}$ (proizvodna hala)	0.035	0.044	0.051	0.070	0.043	0.056
R_1 [dB] (oklop)	18.4	19.0	19.0	19.0	19.0	25.0
α_1 (oklop)	0.16	0.27	0.63	0.97	0.99	0.96



Rešenje: Prvo proračunavamo nivo zvučnog pritiska u proizvodnoj hali pre oklapanja mašine. Detaljan proračun je dat za 500 Hz a podaci za ostale frekvencije u tabeli.

Kako je industrijska hala paralelopipedna, površina graničnih površina prostorije se računa kao:

$$S_0 = 2 \cdot 20 \cdot 20 + 2 \cdot 20 \cdot 4 + 2 \cdot 20 \cdot 4 = 1120 \text{ m}^2$$

Konstanta prostorije se računa kao:

$$B = \frac{A}{1 - \alpha} = \frac{S_0 \bar{\alpha}}{1 - \alpha} = \frac{1120 \cdot 0.051}{1 - 0.051} = 60.19 \text{ m}^2$$

Nivo zvučnog pritiska na poziciji operatera se izračunava primenom jednačine:

$$L_{p1} = L_W + 10 \log \left(\frac{\gamma}{4\pi r^2} + \frac{4}{B} \right) = L_W + 10 \log \left(\frac{2}{4\pi r^2} + \frac{4}{B} \right)$$

$$L_{p1} = L_W + 10 \log \left(\frac{1}{2\pi r^2} + \frac{4}{B} \right) = 106 + 10 \log \left(\frac{1}{2\pi \cdot 3^2} + \frac{4}{60.19} \right) = 95.3 \text{ dB}$$

gde faktor usmerenosti ima vrednost:

$$\gamma = \frac{4\pi}{\Omega_{\text{eff}}} = \frac{4\pi}{2\pi} = 2$$

jer se mašina nalazi na podu industrijske hale pa je efektivni prostorni ugao zračenja 2π (polusfera).

Korekcijom proračunatih nivoa zvučnih pritisaka zbog primene A-ponderacione krive dobijaju se A-ponderisani nivoi zvučnih pritisaka:

$$L_{p1A} = L_{p1} + \Delta_A = 95.3 + (-3.2) = 92.1 \text{ dB}$$

Energijskim sabiranjem A-ponderisanih nivoa zvučnih pritisaka po frekvencijama dobija se ukupni A-ponderisani nivoa zvučnog pritiska, koji ujedno odgovara nivou dnevne izloženosti buci jer radnik opslužuje samo jednu mašinu u toku smene:

$$L_{AE1} = L_{pA1} = 10 \log(10^{6.96} + 10^{8.02} + 10^{9.21} + 10^{9.21} + 10^{9.61} + 10^{9.69}) = 101.3 \text{ dB}.$$

Dozvoljeno vreme izloženosti buci mašine se može izračunati kao:

$$L_{AE1} = L_{pA1} + 10 \log \frac{T_{e1}}{T_0} \Rightarrow 10 \log \frac{T_{e1}}{T_0} = L_{AE1} - L_{pA1}$$

$$T_{e1} = T_0 \cdot 10^{0.1(L_{AE1} - L_{pA1})}$$

$$T_{e1} = 480 \cdot 10^{0.1(83 - 101.3)} = 7 \text{ min}$$

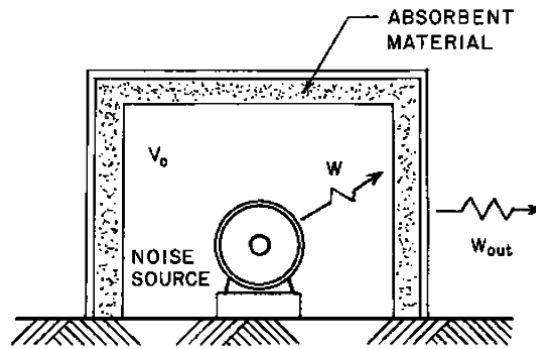
Nakon proračuna nivoa zvučnog pritiska na poziciji operatera proračunava se nivoa zvučnog pritiska na poziciji operatera kada je mašina oklopljena.

Pod pretpostavkom da mašina pokriva pod okopa, površina poda ispod oklopa nije uzeta u dalji proračun. Površina oklopa bez otvora je tada:

$$S_1 = 2 \cdot (1.2 \cdot 1 + 1.8 \cdot 1) + 1.8 \cdot 1.2 - 2 \cdot 0.3 \cdot 0.2 = 8.04 \text{ m}^2$$

Površina oba otvora je:

$$S_2 = 2 \cdot 0.3 \cdot 0.2 = 0.12 \text{ m}^2$$



Oklop oko izvora buke smanjuje akustičku snagu koju izrači izvor buke (vidi sliku). Uneti gubici oklopa mogu se izračunati kao:

$$IL = 10 \log \frac{W}{W_{out}} = L_W - L_{W_{out}}$$

gde je: W – akustička snaga izvora buke, W_{out} – akustička snaga koju izrači oklop.

Akustička snaga koju izrači izvor buke jednaka je zbiru apsorbirane zvučne snage na površinama oklopa i zvučne snage koja se prenosi kroz zidove oklopa:

$$W = W_{\tau} + W_{\alpha} = \bar{\tau} W_{inc} + \bar{\alpha} W_{inc}$$

gde je: W_{inc} – upadna akustička snaga izvora na zidove oklopa, $\bar{\tau}$ - srednji koeficijent prenošenja, a $\bar{\alpha}$ - srednji koeficijent apsorpcije zidova oklopa.

Akustička snaga koju izrači oklop jednaka je:

$$W_{out} = \bar{\tau} W_{inc}$$

Ako se podele gornje dve jednačine dobija se:

$$\frac{W}{W_{out}} = L_W - L_{W_{out}} = 1 + \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\tau}} = 1 + \frac{\frac{S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2}{S_0}}{\frac{S_1 \tau_1 + S_2 \tau_2}{S_0}} = 1 + \frac{S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2}{S_1 \tau_1 + S_2 \tau_2}$$

gde su: α_1 i α_2 koeficijenti apsorpcije zidova oklopa i otvora, respektivno ($\alpha_2 = 1$ za otvor u oklopu – celokupna upadna energija se apsorbuje), τ_1 i τ_2 koeficijenti prenošenja zidova oklopa i otvora, respektivno.

Apsorpciona površina oklopa je:

$$S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 = 8.04 \cdot 0.63 + 0.120 \cdot 1 = 5.185 \text{ m}^2$$

Koeficijent prenošenja zidova oklopa se može izračunati kao:

$$R_1 = 10 \log \frac{1}{\tau_1} \Rightarrow \tau_1 = 10^{-0.119} = 0.01259$$

Koeficijent prenošenja otvora na oklopu ima sledeće vrednosti:

a) Otvor na prednjoj strani oklopa: $\tau_2 = 1$

b) Bočni otvor i otvor na vrhu oklopa: $\tau_2 = 1/3$ (u blizini ne postoje reflektujuće površine), $\tau_2 = 2/3$ (u blizini postoje reflektujuće površine);

c) Otvor sa zadnje strane: $\tau_2 = 1/6$ (u blizini ne postoje reflektujuće površine), $\tau_2 = 1/3$ (u blizini postoje reflektujuće površine);

Za slučaj pod b) i c) koeficijent prenošenja ima manju vrednost od 1 zbog efekta difrakcije i direktivnosti otvora.

Za slučaj iz zadatka uzima se $\tau_2 = 1/3$.

Tako da je:

$$S_1\tau_1 + S_2\tau_2 = 8.04 \cdot 0.01259 + 0.120 \cdot (1/3) = 0.1412 \text{ m}^2$$

Odnos zvučnih snaga za oklop je:

$$\frac{W}{W_{\text{out}}} = 1 + \frac{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2}{S_1\tau_1 + S_2\tau_2} = 1 + \frac{5.185}{0.1412} = 57.08$$

Uneti gubici su:

$$IL = L_W - L_{W_{\text{out}}} = 10 \log \frac{W}{W_{\text{out}}} = 10 \log 37.72 = 15.8 \text{ dB}$$

Zvučna snaga koja se izrači oklopom se izračunava kao:

$$L_{W_{\text{out}}} = L_W - IL = 106 - 15.8 = 90.2 \text{ dB}$$

Nivo zvučnog pritiska na poziciji operatera se izračunava primenom jednačine:

$$L_{p2} = L_{W_{\text{out}}} + 10 \log \left(\frac{1}{2\pi r^2} + \frac{4}{B} \right) = 90.2 + 10 \log \left(\frac{1}{2\pi \cdot 3^2} + \frac{4}{60.19} \right) = 79.5 \text{ dB}$$

Korekcijom proračunatih nivoa zvučnih pritisaka zbog primene A-ponderacione krive dobijaju se A-ponderisani nivoi zvučnih pritisaka:

$$L_{p2A} = L_{p2} + \Delta_A = 79.5 + (-3.2) = 76.3 \text{ dB}$$

Energijskim sabiranjem A-ponderisanih nivoa zvučnih pritisaka po frekvencijama dobija se ukupni A-ponderisani nivoa zvučnog pritiska, koji ujedno odgovara nivou dnevne izloženosti buci jer radnik opslužuje samo jednu mašinu u toku smene:

$$L_{AE2} = L_{pA2} = 10 \log (10^{5.95} + 10^{6.78} + 10^{7.63} + 10^{7.46} + 10^{7.84} + 10^{7.71}) = 83 \text{ dB}.$$

Dnevni nivo izloženosti nakon oklapanja mašine zadovoljava akcione vrednosti pa radnik može da radi celu radnu smenu za mašinom. Lična zaštitna oprema treba da budu na raspolaganju ali radnik nema obavezu da nosi lična zaštitnu opremu.

f_0 [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
B [m ²]	40.62	51.55	60.19	84.30	50.32	66.44
L_{p1} [dB]	85.7	88.8	95.3	92.1	94.9	96.9
Δ_A [dB]	-16.1	-8.6	-3.2	0	1.2	1
L_{p1A} [dB]	69.6	80.2	92.1	92.1	96.1	97.9
$S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2$ [m ²]	1.406	2.291	5.185	7.919	8.080	7.838
τ_1	0.01445	0.01259	0.01259	0.01259	0.01259	0.00316
τ_2	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
$S_1\tau_1 + S_2\tau_2$ [m ²]	0.1562	0.1412	0.1412	0.1412	0.1412	0.0654
W/W_{out}	10.00	17.22	37.72	57.08	58.21	120.81
IL [dB]	10.0	12.4	15.8	17.6	17.7	20.8
$L_{W_{\text{out}}}$ [dB]	85.0	86.6	90.2	86.4	87.3	87.2
L_{p2} [dB]	75.6	76.4	79.5	74.6	77.2	76.1
L_{p2A} [dB]	59.5	67.8	76.3	74.6	78.4	77.1

II način

Nivo zvučnog pritiska na poziciji operatera kada je mašina oklopljena može se izračunati i primenom pristupa iz prethodnog zadatka.

Slabljenje nivoa zvučnog pritiska u prostoriji nakon oklapanja mašine se može izračunati primenom izraza:

$$\Delta L = R + 10 \log \alpha_{\text{okl}}$$

gde je R – ukupna izolaciona moć oklopa, a α_{okl} – prosečan koeficijent apsorpcije unutrašnjih površina oklopa:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{1}{\frac{S_1 \tau_1 + S_2 \tau_2}{S_1 + S_2}} = 10 \log \frac{S_1 + S_2}{S_1 \tau_1 + S_2 \tau_2} = 10 \log \frac{8.04 + 0.12}{0.1412} = 17.6 \text{ dB}$$

$$\alpha_{\text{okl}} = 10 \log \frac{S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2}{S_1 + S_2} = 10 \log \frac{5.185}{8.04 + 0.12} = 0.635$$

Tako da je:

$$\Delta L = R + 10 \log \alpha_{\text{okl}} = 17.6 + 10 \log(0.635) = 15.6 \text{ dB}$$

A-ponderisani nivoa zvučnog pritiska nakon oklapanja se izračunava kao:

$$L_{p2A} = L_{p1A} - \Delta L = 92.1 - 15.6 = 76.4 \text{ dB}$$

Uvidom u rezultate u tabeli mogu se uočiti neznatne razlike u dobijenim rezultatima primenom prikazana dva pristupa, s tim što je drugi pristup dosta jednostavniji.

f_0 [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
R [dB]	85.7	88.8	95.3	92.1	94.9	96.9
α_{okp} [m ²]	0.172	0.281	0.635	0.970	0.990	0.961
ΔL [dB]	9.5	12.1	15.6	17.5	17.6	20.8
L_{p2A} [dB]	60.0	68.1	76.4	74.7	78.5	77.1