

FIZIČKA AKUSTIKA, 3. DEO

Nivo zvuka

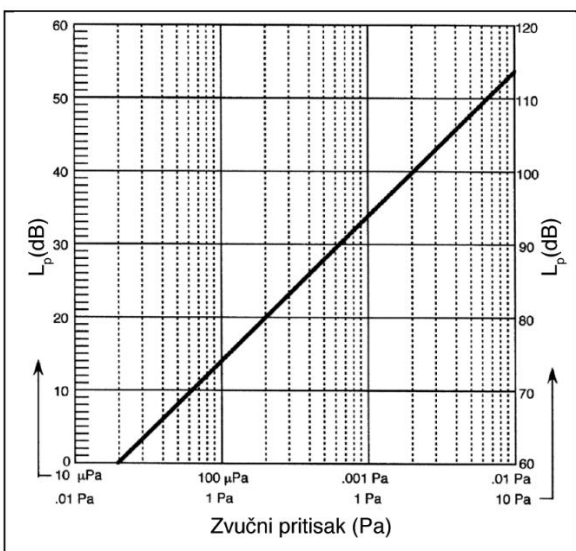
U akustici se srećemo sa odnosom veličina zvučnog pritiska i intenziteta zvuka u velikom dijapazonu vrednosti. Kao što smo prethodno rekli, najniži zvučni pritisak koji možemo čuti iznosi $20 \mu\text{Pa}$, a najjači koji naše uvo može bezbedno da podnese oko 20 Pa . Odnos ove dve veličine je 10^6 , dok je odnos odgovarajućih vrednosti intenziteta zvuka 10^{12} , iz čega zaključujemo da bi u svakodnevnoj praksi bilo nepodesno koristiti pritisak ili intenzitet kao merila jačine zvuka.

Ovome treba dodati činjenicu da je subjektivni osećaj jačine zvuka približno srazmeran logaritmu fizičke pobude (što važi uopšte za sva ljudska čula). To znači da pobuda treba da se povećava stalno za isti procenat da bi se dobio utisak da jačina zvuka raste ravnomerno (vidi detaljnije u glavi 3).

Iz prethodno navedenih razloga, u akustici je primerenije koristiti odnos, i to logaritamski, dve vrednosti zvučnog pritiska, intenziteta zvuka ili akustičke snage, nego njihove apsolutne vrednosti. Zbog toga je uveden pojam nivoa zvučnog pritiska koji se izražava u decibelima (dB). Kao nulti nivo usvojen je nivo koji odgovara najnižoj vrednosti pritiska koji čovek može da čuje, koja se naziva *prag čujnosti*, označava sa p_0 ili p_{ref} i na 1000 Hz iznosi $20 \mu\text{Pa}$. Tako je nivo zvuka čiji je pritisak p , dat relacijom:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (1.12)$$

Pri tom se uvek podrazumeva, iako se to često ne kaže, da je to nivo u odnosu na prag čujnosti. Drugim rečima objektivna jačina zvuka u akustici se umesto u paskalima (Pa) najčešće izražava u decibelima (dB) u odnosu na prag čujnosti $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ koji se u ovom slučaju naziva referentni nivo pritiska.



Slika 1.13 – Veza između nivoa zvuka, izraženog u dB i zvučnog pritiska, izraženog u Pa

Takođe, umesto intenziteta zvuka, uobičajeno je da se koristi nivo intenziteta zvuka dat izrazom:

$$L_I = 10 \log \frac{J}{J_0} \quad (1.13)$$

gde je $J_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ i predstavlja referentnu vrednost intenziteta zvuka.

Ako intenzitet J u jednačini (1.13) izrazimo preko pritiska, jednačina (1.8), dobićemo da je:

$$\begin{aligned} L_I = 10 \log \frac{J}{J_0} &= 10 \log \frac{p^2}{\rho \cdot c \cdot J_0} \cdot \frac{p_0^2}{p_0^2} \\ &= L_p + 10 \log \frac{p_0^2}{\rho \cdot c \cdot J_0} \end{aligned} \quad (1.14)$$

Pri normalnim atmosferskim uslovima ($t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_{atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, $\rho \cdot c = 412 \text{ kg/ms}$) izraz (1.14) se svodi na relaciju:

$$L_I = L_p - 0,13 \text{ dB} \approx L_p. \quad (1.15)$$

Kao što se vidi iz jednačine (1.15) nivo zvučnog pritiska L_p i nivo intenziteta zvuka L_I , u praktičnim uslovima, imaju iste numeričke vrednosti pa se obično označavaju sa L i nazivaju kratko „nivo zvuka“.

Na slici 1.13 je prikazana veza između nivoa zvuka izraženog u dB, i jačine zvučnog pritiska izraženog u Pa, koja može biti korisna za brzu približnu transformaciju jednih jedinica u druge.

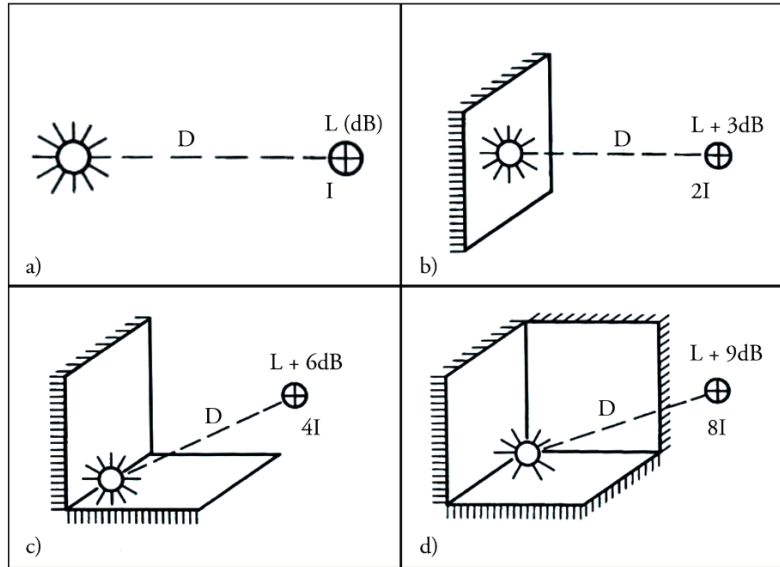
1.1 Ugao zračenja i usmereni zvučni izvori

Izraz za intenzitet zvuka, jednačina (1.9), koji ima u imenitelju $4\pi r^2$ (površina sfere, lopte), važi za sferne talase, što znači da se odnosi na zvučni izvor koji zrači u svim pravcima podjednako. Konstanta 4π je, u stvari, pun prostorni ugao izražen u steradianima, u koji izvor zvuka zrači. Prostorni ugao zračenja nije uvek pun, jer izvor može da zrači i u samo jedan izdvojeni deo prostora. U tom slučaju možemo pisati da je intenzitet zvuka u smeru ose zvučnog izvora dat relacijom:

$$J_0 = \frac{P_a}{\Omega_z \cdot r^2} \quad (1.16)$$

gde je $\Omega_z \leq 4\pi$ njegov prostorni ugao zračenja.

Izvori zvuka koji zrače u deo punog prostornog ugla ($\Omega_z \leq 4\pi$) nazivaju se *usmereni ili direktivni izvori*. U praksi ih ima mnogo. Takav izvor je zvučnik koji se nalazi pored zida ili zvučnik koji zrači kroz akustički levak.



Slika 1.14 – Zračenje tačkastog izvora u različite prostorne uglove [7]

Iz izraza 1.16 se može zaključiti da se kod usmerenih izvora sa istom snagom postiže veći intenzitet zvuka u smeru ose, nego kod neusmerenih. Drugim rečima, svaki izvor date snage P_a mogao bi proizvesti zvuk jačeg intenziteta J_0 (u smeru ose), kad bi mu se na neki način smanjio prostorni ugao zračenja Ω_z . To se može ostvariti ako se, na primer, tačkasti izvor postavi u neposrednu blizinu beskonačno velikog, krutog i glatkog zida koji potpuno reflektuje zvuk, slika 1.14b. Ugao zračenja je upola manji (2π umesto 4π steradiana), nego kada zida ne bi bilo, pa se i intenzitet zvuka povećava dva puta. Zvučni pritisak povećava se pri tom $\sqrt{2}$ puta – vidi obrazac 1.8. Ako se izvor postavi uz ivicu koju obrazuju dva zida, slika 1.14c, prostorni ugao je još dva puta manji (π), a intenzitet četiri puta veći nego u otvorenom prostoru. Najzad ako se izvor postavi u sam ugao koji obrazuju tri zida (ugao paralelopipedne prostorije), slika 1.14d, intenzitet se može povećati 8 puta u odnosu na slučaj kada izvor zrači u otvorenom prostoru, slika 1.14a.

Praktično to znači da bi se premeštanjem izvora zvuka (zvučnika ili govornika) iz sredine velike prostorije u neposrednu blizinu ugla mogao intenzitet zvuka povećati 8 puta (tj. za 9 dB). Naravno, kad se kaže "blizu", misli se u odnosu na talasnu dužinu, tako da zaista blizu zida, stvarni izvor može biti samo kad se radi o niskim frekvencijama. Osim toga, samo na niskim frekvencijama jedan stvarni izvor ima osobine tačkastog izvora zvuka. Prema tome, pojačanje intenziteta zvuka pri postavljanju izvora pored zida ili u ugao treba očekivati samo na niskim frekvencijama.

Da bi se pojačao zvuk izvora u određenom pravcu formiraju se tzv. zvukovodi od kojih su najpoznatiji levkovi, čiji prostorni ugao zračenja može da bude vrlo mali. Intenzitet zvuka se povećava u zavisnosti od toga za koliko se prostorni ugao smanji, pa se tako dobija na efikasnosti izvora (megafoni, koji sadrže još i pojačavač, ali se u osnovi radi o vrlo usmerenom izvoru).

Pored prostornog ugla zračenja izvora uvodi se često i pojam faktora usmerenosti (direktivnosti) γ , koji je dat odnosom:

$$\gamma = \frac{4\pi}{\Omega_z} \quad (1.17)$$

Izraz (1.16) ima sada oblik:

$$J_0 = \gamma \cdot \frac{P_a}{4\pi r^2} \quad (1.18)$$

Faktor usmerenosti nam daje odnos intenziteta direktivnog izvora u određenoj tački duž njegove ose, i intenziteta koji bi na istom mestu proizveo tačkasti (neusmereni) izvor iste snage. Faktor usmerenosti γ se u literaturi naziva i koeficijentom osne koncentracije zračenja izvora zvuka.

1.2 Spektar zvuka - Prost i složen zvuk

Raspodela energije zvuka u funkciji frekvencije predstavlja njegov spektar, koji se obično daje kao grafik akustičke snage ili zvučnog pritiska u funkciji frekvencije. Spektar nam daje informaciju o ponašanju zvuka u frekvencijskom domenu, za razliku od njegovog talasnog oblika ili anvelope, koji nam govore o karakteristikama zvuka u vremenskom domenu. Da bi se sagledale detaljne osobine nekog zvučnog signala potrebno je poznavati i njegov vremenski oblik i njegov spektar. Po svom spektralnom sastavu zvuk može biti veoma različit. Prema obliku spektra sve zvukove delimo na proste i složene.

Pod prostim zvukom podrazumevamo onaj zvuk koji u svome spektru ima samo jednu komponentu određenu po frekvenciji i po intenzitetu (nivou). Prikazujemo ga jednom linijom na dijagramu „nivo-frekvencija”. U vremenskom domenu ovaj zvuk ima oblik sinusoide, slika 1.15a, i obično se naziva prost zvuk ili čist ton. U prirodi je prost zvuk redak. Zvižduk je najbliži prostom zvuku. Prost zvuk u praksi dobijamo veštački iz različitih vrsta generatora signala. Prost zvuk je značajan, jer se dosta koristi pri analizi različitih fenomena u akustici.

Postoje dve vrste složenog zvuka. Prvu vrstu čine zvukovi koji u svom sastavu imaju dve ili više komponenta, koje možemo prikazati linijskim spektrom. To su, na primer, zvuci proizvedeni na muzičkim instrumentima (prirodni tonovi) ili zvuk automobilske sirene sa više tonova (trozvuk ili sl.). Takvu spektralnu strukturu imaju i samoglasnici i zvučni suglasnici u ljudskom govoru.

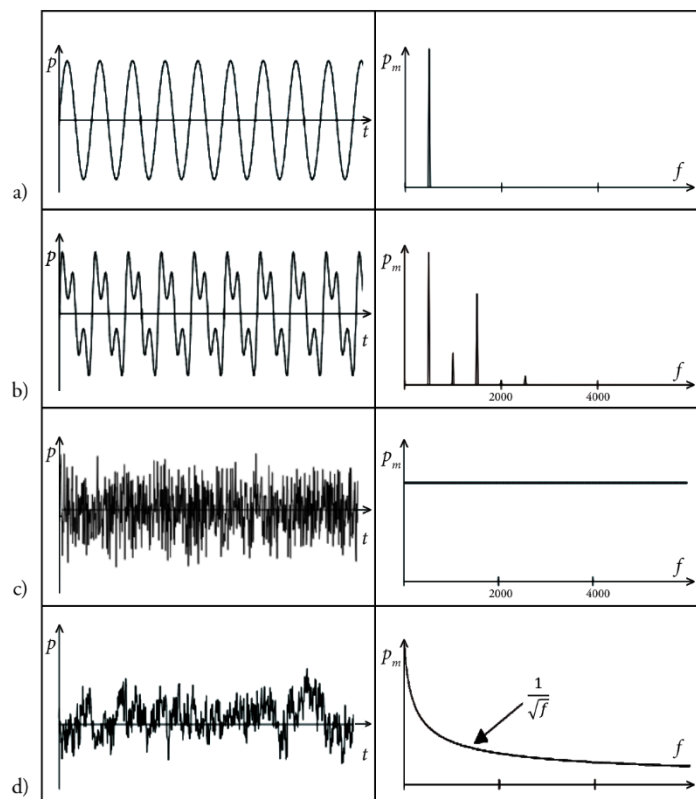
Složeni zvukovi linijskog spektra predstavljaju periodične vremenske promene (koje nisu sinusoidalne), slika 1.15b, čija je osnovna frekvencija f_0 . Ovakvi talasni oblici se mogu, u praksi, predstaviti kao zbir sinusoidalnih komponenta čije su frekvencije $f_0, 2f_0, 3f_0, \dots$, i koji se obično nazivaju složeni tonovi. Time se postupak analize ovakvog zvuka svodi na proučavanje sinusoidalnih promena, tj. na proučavanje prostog zvuka.

Druga vrsta složenog zvuka ima kontinualni (neprekidni) spektar i može se prikazati obvojnicom koja pokazuje kako se menja intenzitet zvuka (nivo) u zavisnosti od frekvencije. Oblik ovog spektra kao i odgovarajući vremenski oblik signala mogu biti najrazličitiji, slika 1.15c i 1.15d. U praksi je složen zvuk, koji ima kontinualni spektar, najčešći. To su saobraćajna buka, buka u industrijskim pogonima, udari, eksplozije, potresi, bezvučni suglasnici u govoru itd. Sve ove zvukove jednim imenom nazivamo *šumovi*.

Prema prethodnom ispada da se zvuk može podeliti na tonove i šumove, pri čemu tonovi mogu da budu prosti (čisti) i složeni.

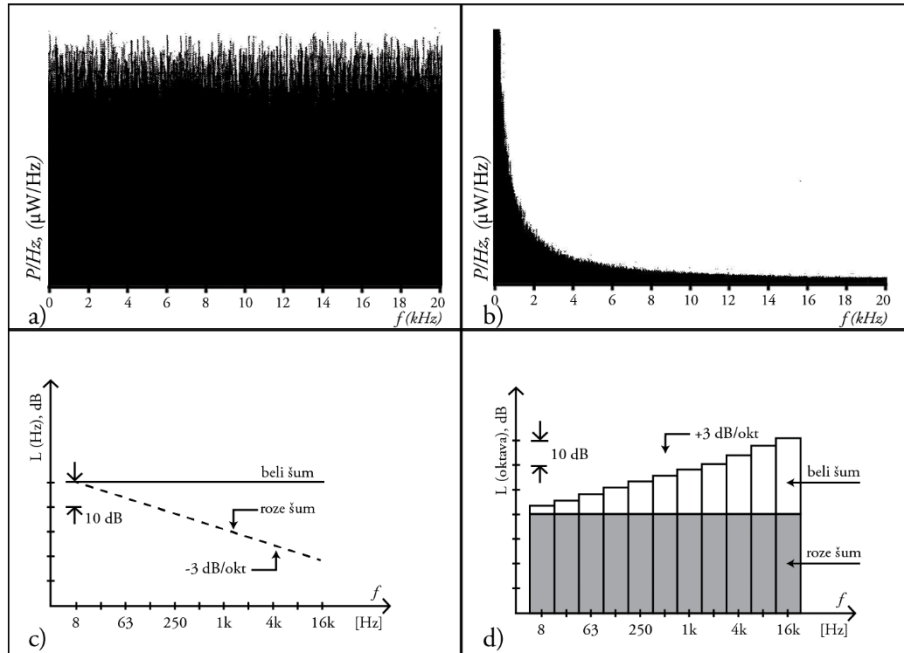
Šumovi određenih karakteristika se u praksi koriste često za kontrolu ili podešavanje uređaja, za merenja u prostornoj akustici i drugde. Dve vrste šuma koji su najviše u primeni su: beli šum i roze šum.

Beli šum ima u svome spektru sve frekvencije od 20 Hz do 20.000 Hz i to tako da je spektralna gustina snage (snaga u frekvencijskom pojasu $\Delta f = 1$ Hz) ista, slika 1.16a i 1.16c. Ako se spektar belog šuma posmatra po oktavama on će, sa porastom frekvencije, rasti brzinom od 3 dB po oktavi, slika 1.16d. Razlog tome leži u činjenici da je propusni opseg svakog narednog oktavnog filtra (duplo veća centralna frekvencija) dvostruko širi nego prethodnog, pa je nivo ukupne energije u njemu za 3 dB viši nego u prethodnom.



Slika 1.15 – Vremenski i spektralni oblici zvuka: a) prost zvuk, b) složen zvuk linijskog spektra, c) i d) složen zvuk kontinualnog spektra [29]

Roze šum se dobija filtriranjem belog šuma tako da mu je spektralna gustina snage obrnuto proporcionalna frekvenciji ($1/f$), kako se vidi sa dijagrama na slici 1.16b, gde su obe ose date u linearnoj razmeri. Kada se spektralna gustina snage ovog šuma prikaže na dijagramu čije su ose u logaritamskoj razmeri onda se dobije prava čiji je nagib -3 dB/oktavi, slika 1.16c. Oktavni spektar roze šuma predstavlja horizontalnu pravu liniju, slika 1.16d, što je jedan od razloga zbog kojih se ovaj šum po pravilu koristi u merenju i podešavanju elektroakustičkih sistema. Ako se na ulaz sistema koji treba proveravati ili podesiti dovede ovaj šum, svako odstupanje oktavnog spektra na izlazu sistema od horizontalne prave linije je lako uočljivo i predstavlja meru uticaja ispitivanog sistema na ulazni signal.



Slika 1.16 – Karakteristike belog i roze šuma: a) i b) spektralna gustina snage u linearnoj razmeri, c) spektralna gustina snage u logaritamskoj razmeri, d) oktavni spektar

1.3 Istovremeno zračenje više izvora

U realnim uslovima pojedinačni zvučni izvori su česti, ali se zato i jednovremeno zračenje više izvora praktično sreće na svakom koraku. U industrijskim pogonima, u saobraćaju, pa i u stanovima, zvučno polje formira veći broj izvora.

Svaki zvučni izvor stvara u prostoru oko sebe zvuk određenog intenziteta. Kada zrači veći broj izvora jednovremeno onda se u tački prijema, koja nas iz bilo kog razloga interesuje, zvučna energija pojedinačnih izvora sabira, a to znači da se i intenziteti zvuka sabiraju.

Ako intenzitete zvuka pojedinih izvora označimo sa $J_1, J_2, J_3, \dots$, onda je ukupni intenzitet:

$$J_0 = J_1 + J_2 + J_3 + \dots, [J] = W/m^2 \quad (1.19)$$

Kada je u pitanju zvučni pritisak mora se voditi računa o tome da je intenzitet zvuka srazmeran kvadratu pritiska, pa je:

$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots}, [p] = Pa \quad (1.20)$$

Pošto je jednostavnije sabrati intenzitete nego pritiske, to se u praktičnim proračunima prvo odredi ukupni intenzitet, a ako je potrebno, pomoću njega obračuna i ukupni zvučni pritisak.

Ovde treba napomenuti da se izrazi (1.19) i (1.20) odnose na takozvane nekoherentne izvore zvuka čiji signali u tački prijema imaju slučajne fazne razlike. Međutim, kada se radi o zvučnim izvorima koji generišu signale iste ili približno iste frekvencije onda se pri određivanju ukupne jačine zvuka u tački prijema moraju uzeti u obzir i njihove fazne razlike, o čemu će više govora biti u odeljku 1.22.