

1. Akustični signali

1.1. Osnovni pojmovi o zvuku

Akustika je znanost koja se bavi istraživanjem i proučavanjem izvora, nastanka, rasprostiranja, prijenosa, osjeta i efekata zvuka. **Prema području istraživanja** može se podijeliti na:

- fizičku akustiku i
- fiziološku akustiku.

U **fizičkoj** se akustici ispituju mehaničke pojave u procesima nastajanja zvuka, njegovo rasprostiranje, efekti loma, ogiba, odbijanja itd. U **fiziološkoj** se akustici razmatraju ti problemi vezani uz organe sluha i govora.

1.1.1. Karakteristike zvuka

Postoji više definicija zvuka. **Prema fizikalnoj definiciji zvuk** je gibanje valova u elastičnom mediju. To je **periodična promjena tlaka** koji se širi **elastičnim medijem**, tj. plinovitim, tekućim i krutim elastičnim tvarima određenom brzinom. Nastaje titranjem čestica oko ravnotežnog položaja. Niz pobuđenih čestica prenošenjem energije stvara **zvučni val**.

Prema općoj definiciji zvuk su mehanički titraji koje čovjek može čuti. Znači, da bismo nešto čuli, neki izvor mora istitrati određenu količinu energije koju zatim medij prenosi do uha. Zvuk se ne širi sam po sebi već se titranje prenosi s čestice na česticu. Medij može biti zrak, voda, ili nešto drugo.

U vakuumu nije moguće rasprostiranje zvučnih valova.

Zvuk nije dio elektromagnetskog spektra, kao što su to svjetlosni ili radiovalovi. **Prijenos zvuka moguć je samo uz posredovanje materijalnog medija, dok za prijenos elektromagnetskog vala nije potreban materijalan medij.**

1. Akustični signali

Karakteristike zvučnog vala obuhvaćaju objektivne i subjektivne parametre. Objektivni parametri su:

- brzina širenja,
- valna duljina,
- frekvencija,
- amplituda,
- tlak,
- intenzitet,
- faza,
- harmonijski sadržaj.

Subjektivni parametri su:

- boja tona,
- glasnoća,
- visina tona.

1.1.1.1 Objektivni parametri karakteristika zvučnog vala

Zvuk se kroz prostor širi kao val, pa za njega vrijede zakonitosti o prostiranju valova nekim prostorom.

Brzina širenja zvuka

Brzina širenja zvuka v je brzina kojom se titranje čestica širi kroz neku tvar, a ovisi o fizikalnim svojstvima tog medija (njegovoj gustoći, temperaturi, vlazi, atmosferskom tlaku, i dr.). Možemo je definirati i kao brzinu kojom se određena točka vala pomiče kroz prostor.

Tako npr. brzina zvuka u željezu iznosi oko 5000 m/s, u vodi (pri 10°C) 1440 m/s, a u zraku (pri temperaturi od 20°C i atmosferskom tlaku od 10⁵ Pa) 343 m/s.

Brzina zvuka u nekim sredstvima prikazana je u tablici 1.1.

Tablica 1.1. Brzina zvuka u nekim sredstvima

Sredina (medij)	Brzina zvuka i uvjeti okoline
kisik	317 m/s (kod 20° C i atm. tlaka od 10 ⁵ Pa)
olovo	1300 m/s (10° C/10 ⁵ Pa)
pluto	500 m/s (10° C/10 ⁵ Pa)
voda	1440 m/s (10° C/10 ⁵ Pa)
vodik	1270 m/s (kod 20° C i atm. tlaka od 10 ⁵ Pa)
željezo	5000 m/s (10° C/10 ⁵ Pa)
zrak	319 m/s (kod -20° C i atm. tlaka od 10 ⁵ Pa)
zrak	343 m/s (kod 20° C i atm. tlaka od 10 ⁵ Pa)

Valna duljina

Valna duljina je razmak između dvaju jednakih susjednih zgušnjenja (nadtlača), odnosno razrjeđenja (podtlača) sredine u kojoj se val širi. Jedan puni val predstavlja ujedno i jedan titraj (1 Hz) pa iz toga slijedi da je **broj valova** nekog zvuka u sekundi **jednak frekvenciji** tog zvuka.

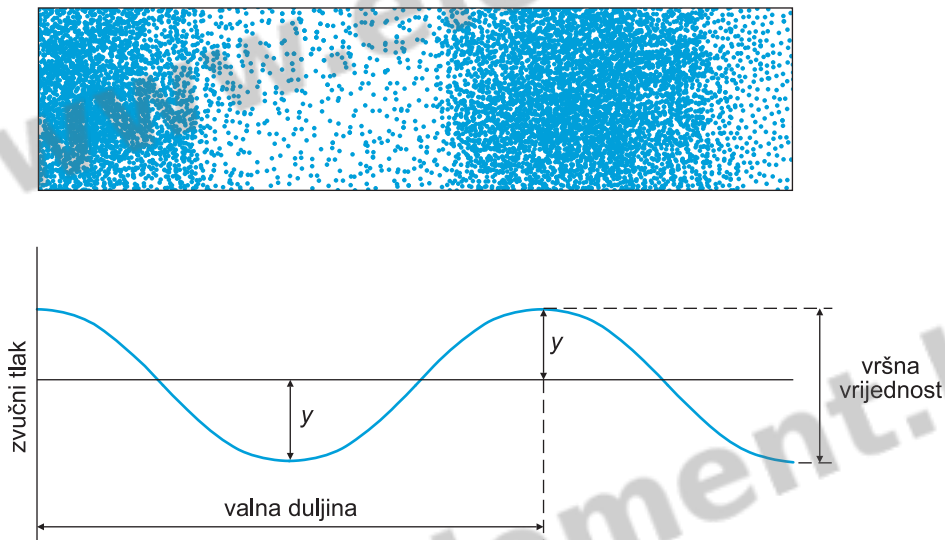
Val se medijem širi stalom brzinom v . Uz poznatu frekvenciju f , prema izrazu (1) može mu se odrediti valna duljina λ .

$$\lambda = v / f \quad (1)$$

Valna duljina λ iskazuje se u metrima, brzina zvučnog vala v u metrima u sekundi, a frekvencija f u hertzima.

Ljudsko uho čuje zvukove u području frekvencija od 16 Hz do 20 kHz, odnosno valnih duljina od 20 m do 1,7 cm.

Udaljenost između dviju točaka najvećeg zgušnjenja ili razrjeđenja medija kroz koji se val širi zove se **perioda T**. Na slici 1.1 prikazano je zgušnjenje i razrjeđenje longitudinalnog vala i grafički prikaz sinusoidnog signala koji predstavlja zvučni titraj. Iz slike je vidljivo da amplitude signala ovise o zvučnom tlaku. U ovom slučaju valna duljina predstavlja udaljenost točaka najvećeg zgušnjenja u longitudinalnom valu, odnosno udaljenost dviju pozitivnih amplituda. Vidi i sliku 1.7 na stranici 13.



Slika 1.1. Valna duljina

Frekvencija

Naučili smo da zvuk nastaje kad neka materija vibrira. Frekvencija ili učestalost f definira se kao broj titraja u sekundi. Frekvencija se iskazuje mjernom jedinicom herc (Hz).

Ljudsko uho čuje frekvencije od 16 Hz do 20 kHz. Zvuk frekvencije manje od 16 Hz naziva se *infrazvuk* (podzvuk), a veće od 20 kHz *ultrazvuk* (nadzvuk). Zvučnu energiju frekvencija ispod 16 Hz ne opažamo kao zvuk, nego je osjećamo kao vibraciju (potresanje). Sluh nekih životinja osjetljiv je i na područje ultrazvuka. Tako npr. pas može čuti frekvenciju 50 kHz, mačka 65 kHz, a dupin čak 150 kHz.

Zvuk frekvencije iznad 10^{10} Hz naziva se *hiperzvuk*.

Amplituda

Promotrimo val, kao npr. na slici 1.1. Udaljenost od horizontalne osi koordinatnog sustava do maksimuma (ili minimuma) sinusoidnog vala predstavlja amplitudu vala (na slici označeno kao y). Što je amplituda veća, veći je i intenzitet promjene tlaka, tj. veća će biti razina signala.

Udaljenost između najviše i najniže točke vala (maksimalni pozitivni dio i maksimalni negativni dio) naziva se vršna (engl. *peak-to-peak*) vrijednost.

Zvučni tlak

Promjene tlaka ljudsko uho osjeća kao zvučnu energiju. U jednoj poluperiodi on poraste iznad, a u drugoj padne ispod atmosferskog tlaka. Zato zvuk možemo definirati kao stalnu izmjenu podtlaka i nadtlaka, odnosno razrjeđenja i zgušnjenja čestica.

Oznaka za zvučni tlak je p , a mjerna jedinica paskal (Pa).

Intenzitet zvuka

Energija zvučnog vala razmjerna je kvadratu njegove amplitude. Zvučna snaga je razmjerna kvadratu akustičnog tlaka.

Tablica 1.2. Zvučna snaga nekih izvora zvuka

Izvor zvuka	Zvučna snaga (W)
normalan govor	$7 \cdot 10^{-6}$
klavir	0,2
orkestar	70
mlazni avion	105

Intenzitet (jakost) zvuka je količina energije koja u jednoj sekundi prostruji kroz plohu površine 1 m^2 postavljenu okomito na smjer širenja zvuka. Jakost zvuka izražava se i mjeri u vatima po kvadratnom metru (W/m^2). Mlad čovjek zdravog sluha može zamijetiti zvuk jakosti od 10^{-12} W/m^2 i to je, prema međunarodnom dogovoru akustičara, određeno kao *referentni zvučni intenzitet*. Zvuk tog intenziteta proizvodi zvučni tlak od $20 \text{ }\mu\text{Pa}$, ta se vrijednost uzima za *referentni zvučni tlak*. Kako su u slušnoj akustici omjeri zvučnih tlakova, odnosno zvučnih intenziteta vrlo veliki, dogovoreno je da se zvučne snage i tlakovi iskazuju logaritmom omjera.

$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ referentni zvučni intenzitet, a $p_0 = 20 \text{ }\mu\text{Pa}$ referentni zvučni tlak.

Mjerna jedinica kojom se iskazuje logaritam odnosa dviju snaga nazvan je bel (B) (u čast A. G. Bella, izumitelja telefona). Iz praktičnih se razloga rabi deset puta manja jedinica decibel (dB), kojim se **iskazuje** razina zvuka **preko omjera u logaritamskoj bazi**.

Logaritamski izračunate veličine nazivamo razinama. Odnosi zvučnih intenziteta od $10^{12}:1$ i zvučnih tlakova od $10^6:1$ izraženi ljestvicom u decibelima svedeni su na mnogo manje i preglednije veličine čiji se omjeri kreću od 0 dB do 130 dB. Raspon intenziteta koji ljudsko uho čuje omeđen je *pragom čujnosti* vrijednosti 0 dB i *pragom bola* vrijednosti 130 dB.

U tablici 1.3 prikazani su intenziteti različitih zvukova.

Tablica 1.3. Intenziteti različitih zvukova

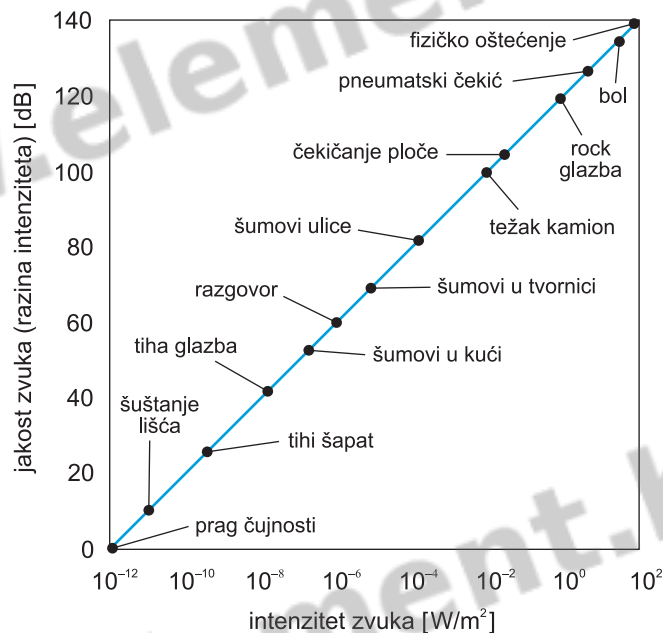
Izvor zvuka	Intenzitet zvuka
šuštanje lišća	10 dB
vrlo tihi šapat	20 dB
dnevna soba	40 dB
razgovor	66 dB
prometna ulica	75 dB
unutrašnjost autobusa	80 dB
podzemna željeznica	90 dB
bučna tvornica	100 dB
mlazni avion	120 dB

Zvukove po intenzitetu, odnosno zvučnom tlaku, uspoređujemo prema broju decibela u odnosu na prag čujnosti. **Prag čujnosti** predstavlja reakciju uha na najslabiji zvuk koji se može čuti.

Kažemo da je neki zvuk jači od praga čujnosti za određeni broj decibela.

1. Akustični signali

Na slici 1.2 prikazan je pregled jakosti zvuka i njegovog intenziteta u odnosu na prag čujnosti, za nekoliko različitih izvora.



Slika 1.2. Pregled jakosti zvuka i njegovog intenziteta u odnosu na prag čujnosti

Jakost zvuka, iskazana omjerom u decibelima prema referentnom intenzitetu naziva se **razina intenziteta** (engl. *intensity level, IL*). **Zvučni tlak**, iskazan omjerom u decibelima prema referentnom zvučnom tlaku naziva se **razina zvučnog tlaka** (engl. *sound pressure level, SPL*).

Prag čujnosti predstavljaju zvučni tlak $p_0=20 \mu\text{Pa}$ i zvučni intenzitet $I_0=10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Omjer zvučnog tlaka koji primamo p_1 i zvučnog tlaka koji predstavlja prag čujnosti p_0 možemo prikazati izrazom (2):

$$SPL = 20 \cdot \log \frac{p_1}{p_0}, \quad (2)$$

gdje je $p_0=20 \mu\text{Pa}$ referentni zvučni tlak (prag čujnosti), a p_1 zvučni tlak izvora zvuka.

Omjer intenziteta zvuka koji dolazi do našeg uha I_1 i intenziteta zvuka koji predstavlja prag čujnosti I_0 možemo prikazati izrazom (3):

$$IL = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} \quad (3)$$

gdje je $I_0=10^{-12} \text{ W/m}^2$ referentni zvučni intenzitet (prag čujnosti), a I_1 zvučni intenzitet izvora zvuka.

U akustici se decibeli primjenjuju za iskazivanje:

- razine zvučnog tlaka,
- razine intenziteta zvuka.

U tablici 1.4 prikazano je nekoliko preračunatih omjera zvučnih intenziteta i tlakova u odnosu prema pragovima čujnosti.

Tablica 1.4. Preračunati omjeri zvučnih intenziteta i tlakova u odnosu prema pragovima čujnosti

Odnos	dB (intenzitet)	dB (tlak)
10	10	20
100	20	40
1000	30	60
10000	40	80

► Zadatak 1.

1. Koliko je puta intenzitet zvuka jači od praga čujnosti ako je njegov iznos 80 dB?

$$IL = 80 \text{ dB}$$

$$I_1/I_0 = \log^{-1} (IL/10)$$

$$I_1/I_0 = \log^{-1} (80/10)$$

$$I_1/I_0 = \log^{-1} 8$$

$$I_1/I_0 = 100\,000\,000 = 10^8.$$

2. Ako je zvučni tlak koji emitira neki izvor jači za 40 dB od praga čujnosti, koliki je zvučni pritisak koji taj izvor emitira?

$$SPL = 40 \text{ dB}$$

$$p/p_0 = \log^{-1} (SPL/20)$$

$$p/p_0 = \log^{-1} (40/20)$$

$$p/p_0 = \log^{-1} 2$$

$$p/p_0 = 100$$

$$p = 100 \cdot p_0 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.}$$

3. Koliki je intenzitet zvuka nekog izvora izražen u decibelima ako je on jači od praga čujnosti 100 puta?

$$IL = 10 \log (I/I_0)$$

$$IL = 10 \log 100$$

$$IL = 10 \cdot 2 = 20 \text{ dB.} \blacktriangleleft$$

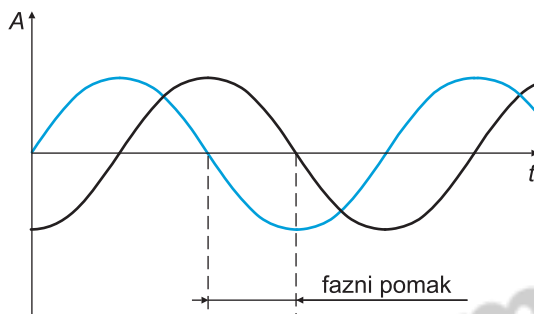
Faza

Promotrimo izraz (4) za opću jednadžbu vala:

$$y = A \cdot \sin(\omega t - \varphi). \quad (4)$$

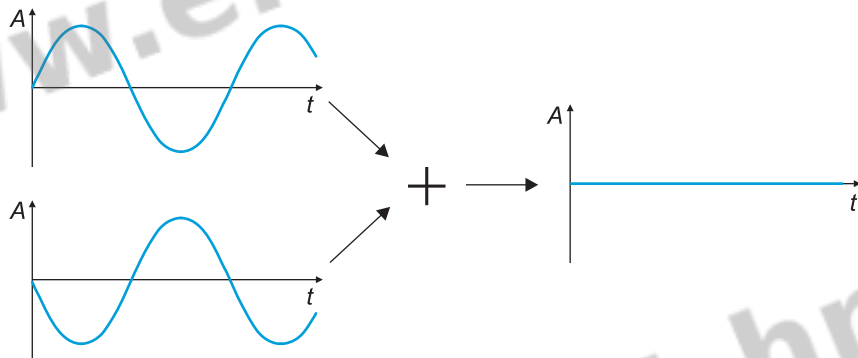
y predstavlja trenutnu udaljenost čestice koja titra od ravnotežnog položaja (elongaciju), A predstavlja amplitudu vala, ω kružnu frekvenciju, t vrijeme, a φ fazni pomak, koji označava određeno kašnjenje. Izražava se u stupnjevima iako se radi o vremenskom pomaku. Razlog je tome što je vrijeme pomnoženo s kružnom brzinom ω .

Pojam faze najlakše je objasniti na primjeru dvaju valova.



Slika 1.3. Fazni pomak dvaju sinusnih valova

Na slici 1.3 prikazana su dva sinusoidna vala istih amplituda, ali pomaknuta u fazi za određeni kut. Drugi val kasni za prvim određeno vrijeme. Superpozicijom ovih dvaju valova možemo dobiti rezultatni val tako da se njihovi dijelovi zbrajaju. Imamo li dva vala koja su u protufazi (pomak od 180°), oni se superpozicijom ponište, kao na slici 1.4.



Slika 1.4. Superpozicija dvaju valova u protufazi

Ako se radi o istom audiosignalu iz dvaju protufaznih izvora, oni će se poništiti. U idealnim uvjetima, ukoliko se signali potpuno ponište, nećemo čuti ništa.

Harmonijski sadržaj

Dosad smo govorili o karakteristikama zvučnog vala na primjeru sinusoidnog vala koji se sastoji od jedne frekvencije koja proizvodi čisti ton. No, zvučne pojave obič-

no nemaju čisti sinusoidni oblik. Glazbeni instrumenti vrlo rijetko proizvode sinusoidne tonove, što je i dobro jer kada bi bilo tako, svi bi zvučali isto. Prisutnost i drugih frekvencija uz onu osnovnu omogućuje nam da razlikujemo zvukove različitih instrumenata. Zato drukčije zvuče npr. gitara i flauta kad odsviraju isti glazbeni ton.

1.1.1.2 Subjektivni parametri karakteristika zvučnog vala

Glasnoća zvuka je subjektivni osjećaj intenziteta zvuka. Iskazuje se u **fonima**. Ponekad se događa da se intenzitet ili jakost zvuka poistovjećuje s glasnoćom. No to su posve različiti pojmovi. Fonska se ljestvica ne podudara s decibelskom. Tako npr. ton frekvencije 100 Hz i jakosti 85 dB ima glasnoću od 80 fona. Odnos fona i decibela prikazuje se tzv. krivuljama jednake glasnoće ili izofonama. Na frekvenciji od 1000 Hz fonska i decibelska krivulja se podudaraju. Vidi sliku 1.15 na stranici 21.

Istraživanja su pokazala da u području zvučnih intenziteta između 30 dB i 120 dB ljudski sluh razlikuje oko 235 stupnjeva glasnoće.

Visina tona

Visina tona psihoakustična je značajka zvuka. Različiti zvukovi, pa i šumovi mogu pobuditi osjet tonske visine. Za razliku od frekvencije zvuka koja se može mjeriti instrumentima, visina tona određuje se izravnim opažanjem slušatelja. Osjet visine tona proporcionalan je omjeru promjene frekvencije.

To znači da se osjet visine tona mijenja s logaritmom omjera frekvencija.

Boja tona

Osjet boje tona ovisi o frekvenciji i amplitudi pojedinih harmonika zvučnog signala, omjeru i međusobnom rasporedu njihovih frekvencija, izobličenju, vremenu kašnjenja, itd.

1.1.2. Vrste zvukova

S obzirom na oblik zvučnog spektra, zvuk može biti:

- čisti ton,
- složeni zvuk (glazbeni ton),
- šum i
- prasak

Čisti ton je jednostavno sinusoidno titranje jedne stalne frekvencije. U elektroakustici se vrlo često primjenjuje pri različitim mjerenjima. U prirodi se gotovo ne pojavljuje.

1. Akustični signali

Složeni zvuk sastoji se od osnovnog čistog tona i njegovih harmonika, tj. niza tonova višestruko viših frekvencija od osnovnog tona. Nastaje kombinacijom čistih tonova različitih frekvencija, tj. većeg broja sinusoidnih titranja. Često se može čuti u prirodi, gdje se javlja kao glazbeni ton (harmoničan zvuk). Njegova se karakteristika sastoji od osnovnog tona i određenog broja harmoničkih tonova (nadvalova) koji su cjelobrojni višekratnici osnovnog tona (to je omjer cijelih brojeva - 1:2, 1:3, 1:4 itd.). Slušnu visinu tona određuje osnovni ton. Ako se osnovna frekvencija prema višim tonovima nalazi u nekom drukčijem omjeru, a ne kao cjelobrojni višekratnik, složeni je zvuk neharmoničan. Svaki se složeni zvuk može rastaviti na svoje osnovne sastavnice, tj. niz čistih tonova. Samoglasnici u govoru imaju svojstva harmoničnog zvuka. Broj i jakost harmonika određuju boju zvuka.

Oktava (tal. *ottava*) je razmak između dviju nota, čiji je razmak osam tonova. Predstavlja frekvencijski odnos 1:2. Kad tonovi kojima se frekvencije odnose na takav način zvuče zajedno, rezultat je ugodan, 'suzvučan' zvuk. Viša nota ima pritom dvostruko veću frekvenciju od niže. Tako, primjerice, ukoliko ton a_1 zvuči 440 Hz, njegova će oktava zvučati 880 Hz. Takve note imaju isti naziv.

Ljudi mogu čuti tonove u rasponu frekvencija od oko 16 Hz do 20000 Hz. To čujno područje obuhvaća spektar tonova do 10 oktava.

Neki ljudi imaju sposobnost prepoznati i imenovati glazbeni ton (visinu tona) bez zadane referencije. Ta je sposobnost vrlo rijetka. Naziva se 'apsolutni sluh'. Procjenjuje se da je posjeduje samo 1% čovječanstva.

Šum je nepravilno, odnosno neperiodičko titranje, čija amplituda i frekvencija po primaju slučajne iznose. U njegovom spektru nema niti stalnih frekvencija, niti stalnih amplituda. Čujemo ga i u prirodi. Postoji više vrsta šumova. Spomenut ćemo dva karakteristična oblika šuma koji se često primjenjuju u mjerenjima. To su:

a) bijeli šum je oblik složenog zvuka koji u sebi sadrži velik broj frekvencija čujnog spektra. Akustička energija jednoliko je raspoređena u cijelom spektru. Naziv je dobio po analogiji na 'bijelo', danje svjetlo koje u sebi sadrži sve boje (sve valne duljine vidljivog spektra).

b) ružičasti šum (engl. *pink noise*) po spektralnom je sastavu identičan bijelom šumu, ali mu se intenzitet unutar spektra linearno smanjuje od najniže k najvišoj frekvenciji. U svakoj sljedećoj oktavi intenzitet opada za 3 dB.

Prasak je kratkotrajni zvučni impuls velike snage.

1.1.2.1 Spektralni prikaz zvuka

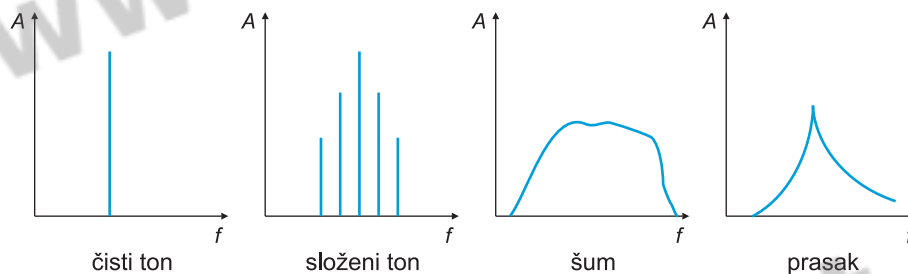
Zvuk može biti **jednostavan** ili **složen**, ovisno o tomu od koliko je komponenti sastavljen. Raspodjela akustične energije kao funkcije frekvencije se često naziva spektar zvuka. Tako različiti glazbeni instrumenti imaju različitu kakvoću zvuka jer im je spektar drukčiji. Jednostavni zvuk sastoji se od jedne frekvencijske komponente određene frekvencije, a složeni je sastavljen od većeg broja komponenata različitih frekvencija. Frekvencije komponenata glazbenih tonova višekratnici su osnovne frekvencije. Osnovna frekvencija glazbenog tona naziva se osnovnim harmonicom. Komponente čija je frekvencija višekratnik osnovne nazivaju se višim harmonicima. Njihov raspored i jakost daju boju tona, po kojoj se na primjer razlikuju tonovi instrumenata.

Na slici 1.5 prikazan je spektar pojedinih vrsta zvuka. Položaj komponente složenog tona na apscisi određen je frekvencijom. Na ordinati je prikazana amplituda svake pojedine komponente.

Ako su komponente vrlo gusto raspoređene, a pojedine se ne mogu izdvojiti, tada govorimo o šumu.

Osim šuma i prasak ima kontinuiranu amplitudno-frekvencijsku karakteristiku, a čisti i složeni ton diskretnu.

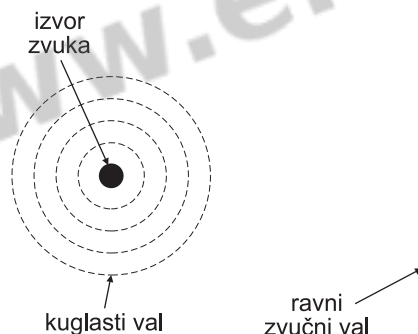
U spektralnom prikazu na ordinati mogu biti prikazane jakosti zvuka pojedinih komponenata.



Slika 1.5. Spektralni prikazi pojedinih vrsta zvuka

1.1.3. Širenje zvuka

Zvučni valovi su **mehanički valovi** koji se prenose kroz materijalni medij (krutina, tekućina, plin) određenom brzinom koja ovisi o elastičnosti i tromosti tog medija.



Slika 1.6. Rasprostiranje zvučnog vala

Zvuk se širi zbog elastične veze među molekulama medija, koncentrično od izvora.

Blizu izvora zvuka zvučni je val kuglastog oblika. Što je radijus udaljevanja od izvora zvuka veći, fronta širenja vala je manje zakrivljena. Tako na većoj udaljenosti zvučni val ima izgled ravnog vala, kao što je prikazano na slici 1.6.

Ponovimo

Longitudinalni valovi

U longitudinalnom valu čestice titraju u smjeru širenja vala.

Transverzalni valovi

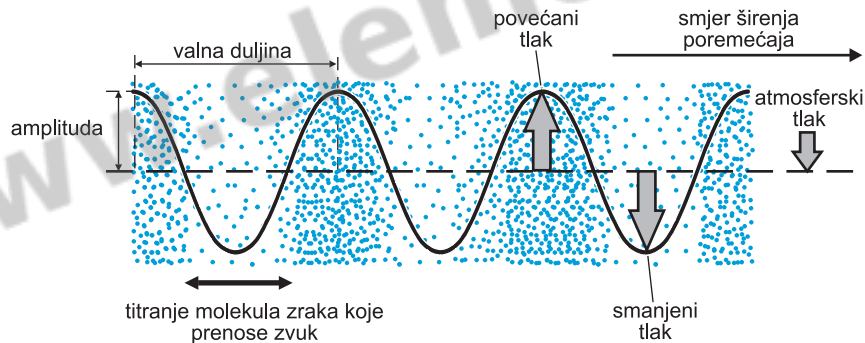
U transverzalnom valu čestice titraju okomito na smjer širenja vala.

Zvučni val se širi na **dva načina**. U zraku, plinovima i vodi zvučni se val širi isključivo kao longitudinalni val, jer ga prenose čestice sredstva titrajući u smjeru širenja vala. U čvrstim tvarima širi se kao transverzalni val, jer čestice materije titraju okomito na smjer širenja vala. Na slici 1.7 crtežom je prikazano načelo širenja zvuka kao longitudinalnog vala. Na slici 1.8 crtežom je prikazano načelo širenja zvuka kao transverzalnog vala.

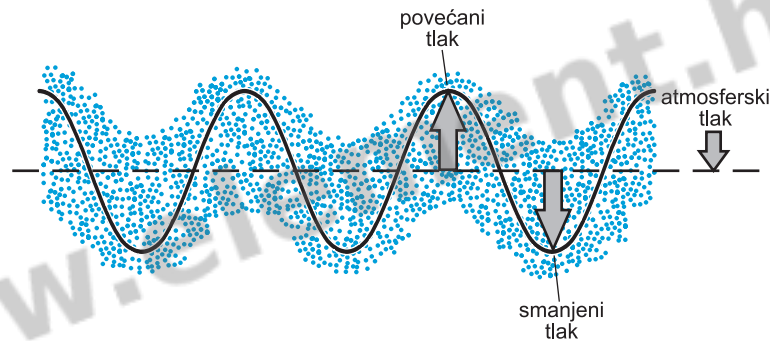
Širenje zvuka u prostorijama drukčije je od širenja zvuka u otvorenom prostoru. **U otvorenom prostoru, u idealnim uvjetima, zvučni valovi ne nailaze na prepreke.**

Naučili smo da se zvučni valovi emitirani iz izvorišne točke šire sferno, jednako u svim smjerovima.

Za one koji žele znati više ...



Slika 1.7. Širenje zvuka kao longitudinalnog vala



Slika 1.8. Širenje zvuka kao transverznog vala

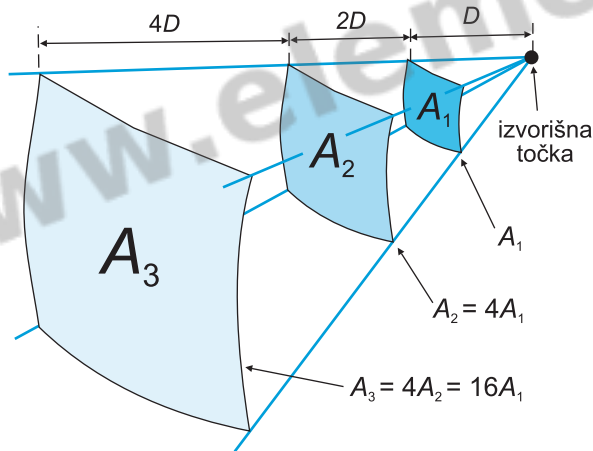
Širenje zvuka u vodi često se prikazuje pomoću puteva kojima signal prolazi od izvora do odredišta. Redovito imamo najmanje tri puta:

- izravan,
- jeku odjeka od površine,
- jeku odjeka od dna.

Na granicama različitih medija (na primjer vode i zraka prema površini) zvuk se dijelom reflektira a dijelom prodire u zrak. Ako je površina vode valovita, dolazi i do promjene frekvencije reflektiranog akustičkog signala. Kamenito dno omogućuje brže rasprostiranje zvuka. Zato se može dogoditi da jeka od dna, koja dio svog puta prevali kroz stijene ispod dna, stigne do cilja prije izravnog signala.

1. Akustični signali

U otvorenom prostoru zvučni valovi putuju od izvora u sfernoj valnoj fronti koja se stalno širi. Zvučna energija raspodijeljena je po zamišljenoj sferi s površinom koja raste razmjerno kvadratu udaljenosti od izvorišne točke.



Površina sfere raste 4 puta sa svakim udvostručenjem udaljenosti od izvora. S udaljenošću od izvora razina zvuka pada. Svako udvostručenje udaljenosti od izvorišne točke prouzročit će smanjenje razine zvuka za 6 dB. Na slici 1.9 prikazan je dio sferne fronte zvučnih valova.

U zatvorenom prostoru zvučni valovi nailaze na različite prepreke, pa možemo razmatrati sljedeće pojave:

Slika 1.9. Dio sferne fronte zvučnih valova

- refleksija ili odbijanje valova,
- difrakcija ili ogib valova,
- refrakcija ili lom valova,
- apsorpcija ili upijanje valova,
- Dopplerov efekt,
- interferencija valova,
- stojni val.

Refleksija je pojava odbijanja zvuka od prepreke. Refleksija zvuka je bolja što je hrapavost površine prepreke manja, a veća gustoća materijala od kojeg je ona izrađena.

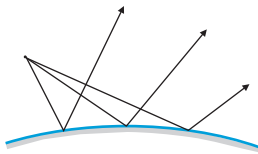
Kad se zvuk odbija od ravne, čvrste površine, reflektirani val jednak je ulaznom. Ako je površina ispupčena, konveksna, zvuk se raspršuje (disperzira). Ako je površina udubljena, konkavna, može doći do:

- usnopljavanja ako je $d > \frac{r}{2}$,
- paralelnosti zraka ako je $d = \frac{r}{2}$,
- raspršenja ako je $d < \frac{r}{2}$,

gdje je r radijus zakrivljenosti konkavne površine, a d udaljenost izvora od površine.

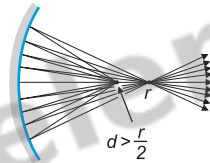
Na slici 1.10a prikazano je raspršenje zvuka od ispupčene površine, a na slikama 1.10b, 1.10c, i 1.10d redom usnopljavanje reflektiranih zraka, te njihova paralelnost zraka i raspršenje prilikom refleksije od udubljene površine.

konveksna ploha:

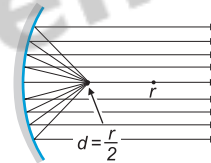


a) disperzija zvuka;

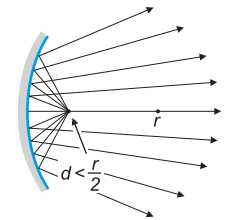
konkavna ploha:



b) usnopljavanje zvuka;



c) paralelnost zraka;

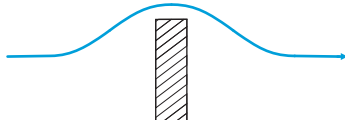


d) disperzija zvuka.

Slika 1.10. Refleksija (odbijanje) zvuka od zakrivljenih površina

Refleksija može prouzročiti manje produljenje trajanja zvuka, što se naziva **odjek**. Veće produljenje trajanja zvuka naziva se **jeka**.

Difrakcija je pojava savijanja ili ogiba zvuka. Osim što se odbija od prepreke, zvuk je jednim dijelom može i zaobići kao što je prikazano na slici 1.11. Difrakcija je obrnuto razmjerna visini tona (frekvenciji zvučnog vala), pa je izraženija kod nižih frekvencija.



Slika 1.11. Difrakcija zvuka

Ako je zapreka mala u odnosu na valnu duljinu, gotovo i ne utječe na širenje zvučnog vala.

Refrakcija je pojava loma zvučnog vala kod koje dolazi do promjene smjera zvuka. Događa se uslijed promjene u sredstvu kojim se zvuk kreće (temperatura, tlak zraka i sl.). Tipični primjer je skretanje zvuka pod utjecajem vjetera. Zvučne zrake se lome pri prijelazu iz jednog sredstva u drugo. Indeks loma ovisi o odnosu brzina širenja zvuka u sredstvima.

Apsorpcija je pojava upijanja zvuka koja se javlja prilikom refleksije. Kad zvučni val udari o neku plohu postavljenu na čvrstu podlogu, jedan se dio zvučne energije reflektira, a ostatak se apsorbira. Jedan je dio zvučne energije tada predan materiji od koje se zvuk reflektira.

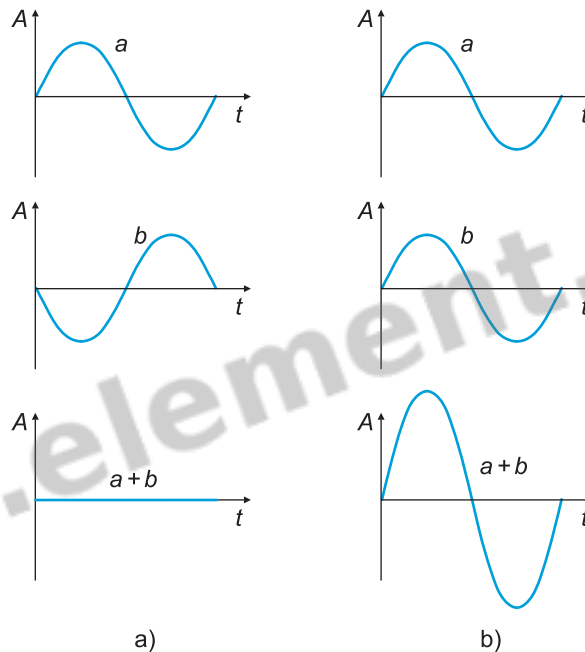
Prilikom apsorpcije veći se dio energije pretvara u toplinu tj. zvuk se u nekom materijalu apsorbira tako da se pretvori u drugi oblik energije i onda u toplinu. Za materijale se određuje koeficijent apsorpcije (α), koji je definiran kao odnos apsorbirane i upadne zvučne energije.

Dopplerov efekt je pojava promjene visine tona zbog kretanja zvučnog izvora u odnosu na slušača (npr. automobil koji projuri kraj slušača velikom brzinom). Ako nam se izvor zvuka približava, zvučni se valovi zgušnjavaju tj. povećava im se frekvencija. Ako se izvor zvuka udaljava, valovi se prorjeđuju, a zvuk dobiva sve manju frekvenciju, dok se ton čuje kao niži.

1. Akustični signali

Približavanjem izvora zvuka, slušaču dolazi više zvučnih valova u jedinici vremena nego kad izvor zvuka stoji. Tada je frekvencija zvuka koju slušač čuje viša od one koju izvor zapravo emitira. Situacija je obrnuta kad se izvor udaljava od slušača. Te se pojave događaju bez obzira giba li se izvor zvuka, slušač, ili obojica istovremeno.

Interferencija je pojava koja nastaje uzajamnim djelovanjem dvaju valova koji se susreću. Ako im se faze poklope, dolazi do zbrajanja po amplitudi kao na slici 1.12a, a ako su protufazni, njihove se amplitude oduzimaju kao što je prikazano na slici 1.12b.



Slika 1.12. Interferencija valova

Stojni val je pojava koja nastaje uslijed interferencije dolazećeg i reflektiranog vala. U tom slučaju nastaje mjestimično poništavanje i pojačavanje zvuka. Na mjestima poništavanja nastaju tzv. nule, a na mjestima pojačanja 'maksimumi' zvuka. Pojava se očituje kao potpuna odsutnost zvuka u nekim dijelovima prostora.

1.2. Građa uha i slušni proces

Auditorni sustav je senzorni sustav koji služi za čulo sluha.

Senzorni (čulni, osjetilni) sustav je dio živčanog sustava koji se sastoji od senzornih receptora, živčanih veza i dijelova mozga koji obrađuju preko njih dobivene informacije. Specifični senzorni sustavi su za čulo osjeta, vida, mirisa, okusa i sluha.

Uho je organ sluha. Služi za detektiranje zvučnih valova. U zdravom stanju čuje frekvencije od 16 Hz do 20 kHz i osjeća promjenu zvučnih tlakova od 20 μ Pa do 20 Pa.

Na svim frekvencijama nije jednako osjetljivo. Najosjetljivije je u rasponu frekvencija od 350 Hz do 3500 Hz (pripada području ljudskog glasa) gdje može osjetiti razliku zvučnih tlakova od 10^{-5} Pa. Najveći zvučni tlak koji može podnijeti bez oštećenja je 100 Pa. Premda ovisno o životnoj dobi čujemo zvukove od 16 Hz do 20000 Hz, na još neobjašnjeni način osjetimo više i niže frekvencije.

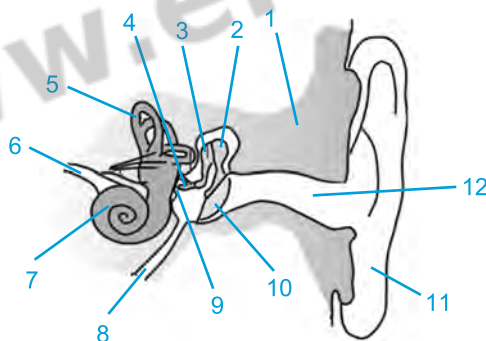
Buka je neželjeni zvuk koji onemogućava komunikaciju, remeti koncentraciju te oštećuje sluh.

Ljudsko uho može procijeniti zvuk kao jednostavan ili kao složen. Jednostavni zvukovi ne postoje u prirodi. Sastavljeni su od samo jedne frekvencije. Složeni zvukovi sadrže veći broj osnovnih frekvencija. Uz osnovne frekvencije sadrže još i njihove višekratnike koji se nazivaju višim harmonicima. Oni daju boju tona i mogu se razlikovati čak i kad im je osnovna frekvencija ista. Ako je broj frekvencija i viših harmonika vrlo velik i ima neprekinutu (kontinuiranu) amplitudno-frekvencijsku karakteristiku, uho čuje šum. Dakle, uho je vrlo složen i osjetljiv organ, koji zajedno s mozgom **radi kao analizator spektra, određuje smjer zvuka, glasnoću, visinu i boju, otkriva amplitudna, fazna i harmonička izobličenja te je precizni davalac položaja u prostoru.**

Ranije smo naučili da šum nema određenu frekvenciju i da se dijeli na bijeli i ružičasti. Bijeli šum je onaj šum koji ima jednoliko raspoređenu akustičku energiju dok kod ružičastog šuma spektar opada 3 dB po oktavi.

1.2.1. Dijelovi uha

Uho se sastoji se od tri glavna dijela: **vanjskog**, **srednjeg** i **unutrašnjeg uha**. Sva tri dijela prenose zvučnu informaciju u mozak, koji je prevodi u svojstvo sluha.



Slika 1.13. Dijelovi uha: 1. lubanja 2. čekić, 3. nakovanj, 4. stremen, 5. polukružni kanalić, 6. slušni živci, 7. pužić, 8. Eustahijeva cijev, 9. predvorje, 10. opna, 11. ušna školjka, 12. ušni kanal

Vanjski dio uha sastoji se od ušne školjke i ušnog kanala (zvukovoda). **Srednje uho** se sastoji od bubnjića koji je povezan s trima slušnim košćicama koje se nazivaju čekić, nakovanj i stremen. **Unutarnje uho** čine polukružni kanali, pužnica, slušni živac i Eustahijeva cijev. Dijelovi uha prikazani su na slici 1.13.

1.2.2. Slušni proces

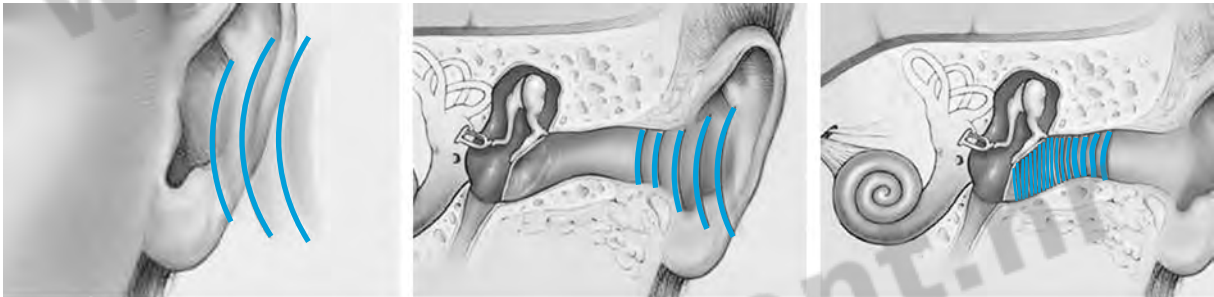
Vanjski dio uha, koji se sastoji se od ušne školjke i slušnog kanala (zvukovoda) prikuplja zvukove iz okoline i prenosi zvučne valove kroz slušni kanal do bubnjića. Slušni kanal je dugačak približno između 2 cm i 2,5 cm, a presjek mu je približno od 0,3 cm² do 0,4 cm². U njemu se nalaze sićušne dlačice koje štite uho od vanjskih utjecaja. **Srednje uho** ima obujam približno 1 cm³. Od vanjskog dijela uha odvojen je membranom bubnjića, koji je povezan trima slušnim košćicama koje se nazivaju čekić, nakovanj i stremen. Zvučni valovi prouzročit će vibriranje bubnjića. Te se vibracije prosljeđuju preko triju slušnih košćica u srednjem uhu do glavnog osjetilnog organa u unutarnjem uhu, pužnice. One predstavljaju polugu nejednakih krakova, a svojim djelovanjem povećavaju zvučni tlak od 10 do 20 puta. Pločicu stremena zatvara membrana pod nazivom ovalni prozorčić koja predstavlja granicu između srednjeg i unutarnjeg uha.

Unutarnje uho čine polukružni kanali, pužnica, slušni živac i Eustahijeva cijev, a zbog svog izgleda naziva se i labirint. Pužnica sadrži vlaknaste živčane stanice. Vibriranjem opne ovalnog prozorčića tekućina se prenosi do opne u pužnici, glavnom osjetilnom dijelu unutarnjeg uha. Ti pokreti iz srednjeg uha prouzročite kretanje tekućine (limfe) u pužnici.

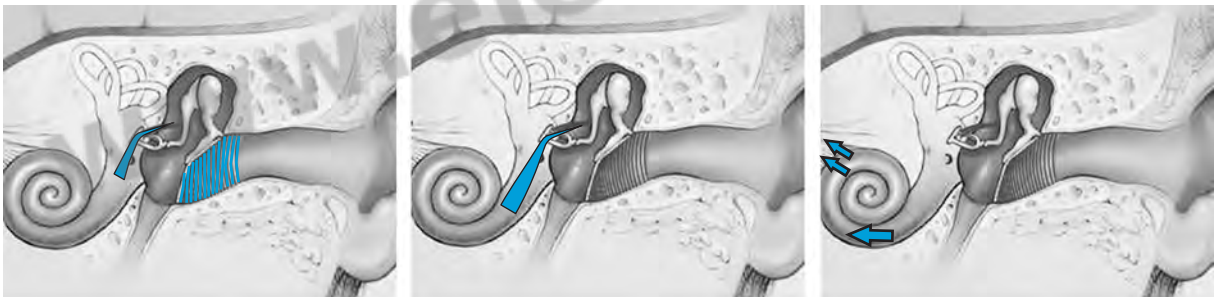
Vlknaste stanice u tkivu pužnice te pokrete prevode u električne impulse koji se prenose na vlakna slušnog živca. Električni se impulsi tada šalju slušnim živcem u mozak gdje se interpretiraju kao zvuk.

Eustahijeva cijev spaja usnu šupljinu sa srednjim uho i služi za održavanje ravnoteže. Veći dio vremena je zatvorena. Otvara se samo u određenim trenucima, kao na primjer prilikom zijevanja ili gutanja i na taj način izjednačuje tlakove zraka s obje strana bubnjića kako ne bi došlo do njegovog oštećenja.

Na slikama 1.14a i 1.14b pojednostavnjeno je prikazano širenje zvuka kroz uho.



Slika 1.14a. Zvučni valovi ulaze iz okoline u ušnu školjku, prolaze kroz nju i ulaze u ušni kanal.



Slika 1.14b. Zvučni valovi prouzročili su vibriranje bubnjića koje uzrokuje pokretanje triju koščica (čekića, nakovnja i stremena), što i prenosi zvučni val do pužnice. Vibriranje se prenosi kroz fluid pužnice do slušnog živca, koji prosljeđuje električne impulse u mozak.

Titraji prolaze kroz rezonantni prostor vanjskog uha, u srednjem uhu prelaze u vibracije, a u unutarnjem uhu u elektrokemijske impulse koji putem slušnog živca informaciju o zvuku prenose u mozak.

Dva uha čine stereo sustav koji omogućuje identifikaciju položaja izvora zvuka i utvrđivanje smjera njegovog pomicanja.

1. Akustični signali

Već smo ranije spomenuli da se ljudski sluh može ograničiti u rasponu jakosti zvuka od 0 dB (prag čujnosti) do 130 dB (prag bola) i frekvencijskom rasponu od 16 Hz do 20 kHz. Ljudski govor najčešće se nalazi u području intenziteta od 20 dB (šapat) do 80 dB (vikanje) i frekvencija od 300 Hz do 4 000 Hz. Zvuk se najučinkovitije prenosi u području od 1kHz do 4kHz.

Zvučne podražaje uho ne provodi linearno.

Za one koji žele znati više ...

Buka je neželjeni zvuk koji onemogućava komunikaciju, remeti koncentraciju te oštećuje sluh. Može djelovati vrlo ometajuće i odvlačiti pozornost od rada za koji je potrebna povećana koncentracija. Dugotrajno izlaganje buci (primjerice u tvorničkom pogonu) može dovesti i do:

- fizičkih poremećaja (kao što su oštećenja sluha ili njegov gubitak),
- psihičkih poremećaja (problemi u komunikaciji, nezadovoljstvo, smanjenje produktivnosti, nervoza, itd.).

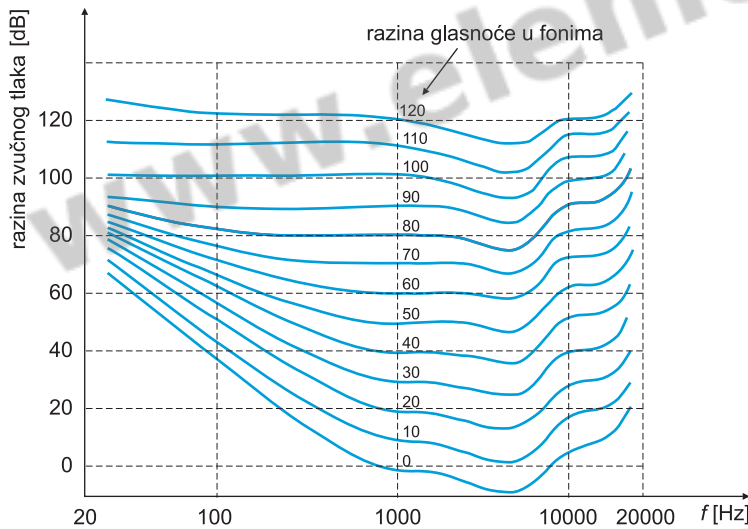
Ovisno o izvoru, buka se može podijeliti na

- izravnu i
- neizravnu.

Izravna ili direktna buka je određena jakošću izvora i njegovom udaljenošću. Neizravna buka ovisi o koeficijentima refleksije poda, zidova, stropa itd. i o poziciji takvih objekata.

Intenzitet zvučnih valova objektivna je fizikalna veličina. Mjeri se pomoću instrumenta i ne ovisi o ljudskom sluhu. Ako čovjek sluša neki zvuk osjetilom sluha, čuje zvuk određene jačine. Ljudsko uho ne reagira na tlak i frekvenciju zvučnog vala na jednak način kao elektronički mjerni instrumenti. Osjetljivost uha ima nejednoliku karakteristiku koja ovisi o frekvenciji i jačini zvuka. Dakle, pojam **jakost zvuka** je subjektivne prirode i pripada području fiziološke akustike. **Čovjek ne čuje jednako zvukove istog intenziteta, nego jačina zvuka ovisi o frekvenciji njegovog izvora.** Na slici 1.15 prikazan je primjer audiograma zdravog čovjeka. Najniža krivulja daje najtiši zvuk koji uho može zapaziti i detektirati u ovisnosti o frekvenciji što znači da zvuk frekvencije 1000 Hz zapaža pri razini intenziteta od 0 dB, a onaj od oko 33 Hz tek pri razini intenziteta od 70 dB. Tako na primjer, razlika zapažanja zvukova između 33 Hz i 100 Hz bit će vrlo velika, a razlika između 2000 Hz i 2100 Hz bit će vrlo mala. Za čujnost zvuka frekvencije od 50 Hz potrebna je jačina 75 dB, dok je na 5 kHz zvuk te jačine subjektivno vrlo glasan. Mjerilo razine zvuka može primjerice izmjeriti zvučni tlak frekvencije 60 Hz kao 50 dB, a frekvencije od 1000 Hz kao 25 dB. No, ovisno o tlaku u okolini slušatelj može te zvukove procijeniti kao

jednako glasne. Na niskim tlakovima srednje frekvencije čujemo bolje nego više frekvencije i mnogo bolje nego niže frekvencije. Pri visokim tlakovima, ta pojava nije tako izražena i sve frekvencije čujemo podjednako.



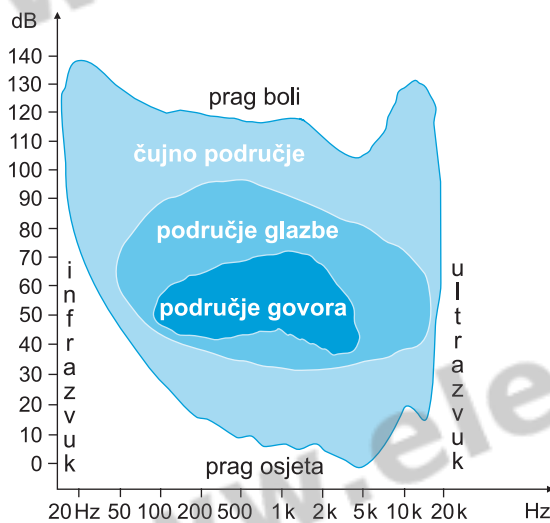
Slika 1.15. Primjer audiograma zdravog čovjeka

Posljednja krivulja na vrhu dijagrama na slici 1.15 daje jačinu zvuka koju uho može detektirati bez osjećaja bola, a nije jednak za sve frekvencije.

Ostale krivulje prikazuju ovisnost čujnosti o frekvenciji za različite razine intenziteta zvuka.

Na zvuk utječe prostor između zvuka i slušatelja. Ono što čujemo mješavina je izravnog i odbijenog zvuka.

Dulja izloženost jakom zvuku može prouzročiti oštećenja pužnice, a time i sluha.



Slika 1.16. Područja interpretacije zvuka

Na slici 1.16 skicirana su različita područja interpretacije zvuka i granice osjeta u ovisnosti o frekvenciji izvora i jačini zvuka.