# FIZIČKA AKUSTIKA, 2. DEO

## 1.1 Frekvencija, period i talasna dužina zvuka

Pretpostavimo da su talasi zvučnog pritiska periodični, slika 1.10, to jest da se stalno ponavljaju u jednakim vremenskim intervalima. Broj promena u jedinici vremena kod ovakvih talasa daje frekvenciju zvuka.

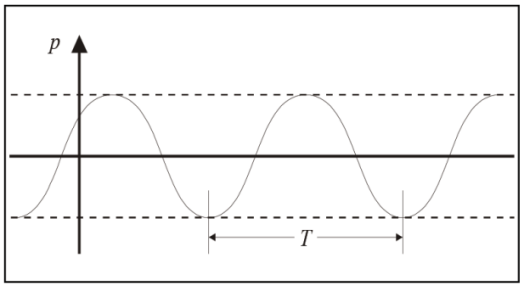
Frekvencija se obeležava sa $f$ i izražava u hercima (Hz). Čujni zvuk pokriva frekvencije od oko 20 Hz do 20 kHz.

Zvuk čija je frekvencija manja od 20 Hz naziva se infra zvuk, a zvuk čija je frekvencija veća od 20 kHz naziva se ultra zvuk.

Trajanje jedne potpune promene zvučnog talasa (od datog trenutka pa do vraćanja u identično stanje) naziva se perioda i obeležava sa $T$. Između periode $T$ i frekvencije $f$ zvučnih talasa, postoji odnos:

$$T = \frac{1}{f} \qquad (1.5)$$

Talasna dužina zvuka date frekvencije je rastojanje između uzastopnih ponavljanja zvučnog talasa koji se prostire kroz vazduh ili neku drugu sredinu. Drugim rečima, to je put koji pređe jedan zvučni talas za vreme koje je jednako periodi zvuka. Talasna dužina se obeležava sa $\lambda$ i izražava u metrima.

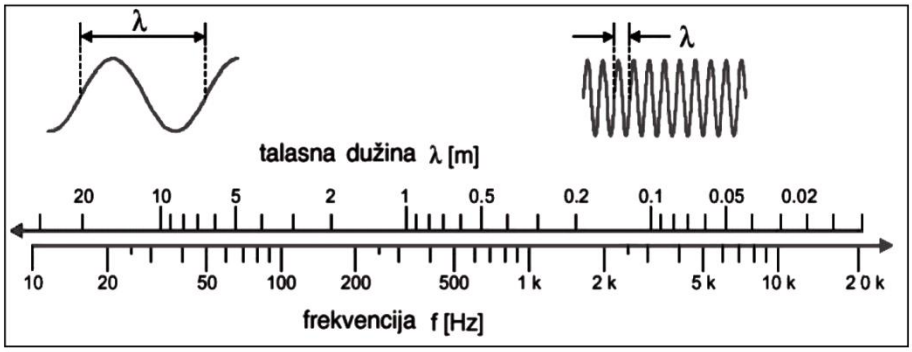



*Slika 1.10 - Promena zvučnog pritiska p sinusnog talasa u vremenu t*

Na osnovu prethodne definicije, talasna dužina zvuka $\lambda$ se može predstaviti relacijom:

$$\lambda = c \quad T = \frac{c}{f} \qquad (1.6)$$

Prema izrazu (1.6) dobija se da su talasne dužine zvuka 17,2 m, 0,345 m i 17,2 mm na frekvencijama od 20 Hz, 1 kHz i 20 kHz, respektivno, slika 1.11. Iz prethodnog je jasno da je opseg talasnih dužina čujnog zvuka veoma veliki što, kako ćemo videti, ima značajan uticaj na ponašanje zvuka.



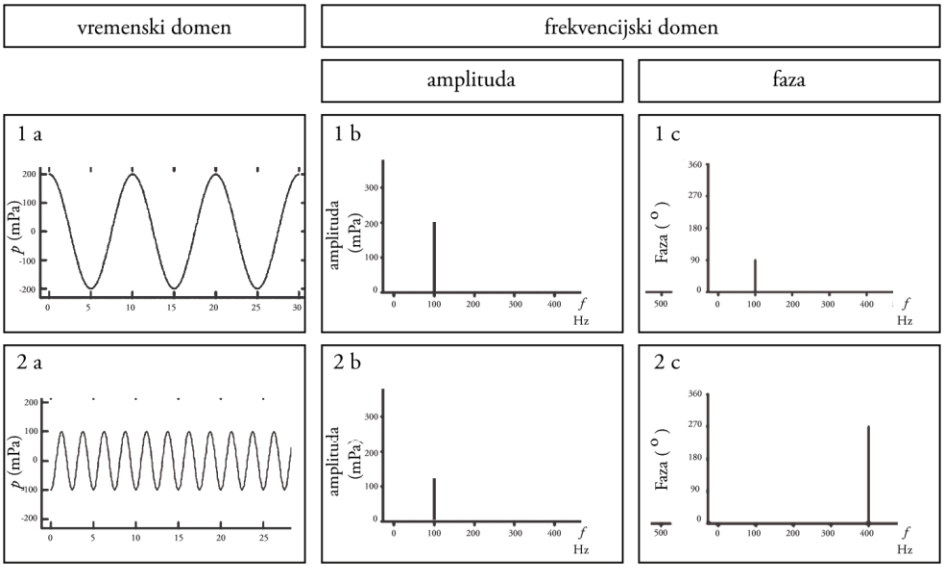

*Slika 1.11 - Frekvencije i odgovarajuće talasne dužine čujnog zvuka*

Treba ovde istaći da su prostopriodične ili sinusne promene zvučnog pritiska, prikazane na slici 1.10, u prirodi veoma retke. Ipak one u akustici imaju određeni značaj, o čemu će nešto više reči biti u odeljku 1.13.

## 1.2 Amplituda i faza zvučnog talasa

U tabeli 1.2 prikazana je funkcija (1.2) u vremenskom i frekvencijskom domenu za dva konkretna slučaja prostoperiodičnih promena zvučnog pritiska. U vremenskom domenu (prva kolona) je prikazana trenutna promena zvučnog pritiska u funkciji vremena, dok su u frekvencijskom domenu (druga i treća kolona) prikazane vrednosti amplitude i početne faze u funkciji frekvencije.

*Tabela 1.2 - Vremenski i frekvencijski prikaz dve prostoperiodične promene zvučnog pritiska [29].*




Tri dijagrama u prvom redu tabele (1a, 1b i 1c) se odnose na prostoperiodični zvučni talas amplitude $p_m = 200\mu Pa$, frekvencije $f = 100Hz$ i početne faze $\theta_0 = \frac{\pi}{2}\text{rad} = 90°$, dok tri dijagrama u drugom redu (2a, 2b i 2c) predstavljaju karakteristike prostoperiodičnog zvučnog talasa amplitude $p_m = 100\mu Pa$, frekvencije $f = 400Hz$ i početne faze $\theta_0 = \frac{3\pi}{2}\text{rad} = 270°$. Matematički izrazi koji opisuju pomenute talase sada glase:

$$p_1(x,t) = p_{1m} \cdot sin\left[(200\pi \cdot t - k \cdot x) + {}^{\pi}/_{2}\right] \qquad \text{(prvi red dijagrama)}$$

$$p_2(x,t) = p_{2m} \cdot sin\left[(800\pi \cdot t - k \cdot x) + {}^{3\pi}/_{2}\right] \qquad \text{(drugi red dijagrama)}$$

Kao što se vidi sa dijagrama i navedenih izraza $p_1(x, t)$ i $p_2(x, t)$, obe funkcije su sinusne, samo se razlikuju po amplitudi, frekvenciji i početnoj fazi. Pri tome treba imati u vidu da se pod fazom podrazumeva deo ukupnog ciklusa ($2\pi$) sinusne funkcije koji je dosegnut u datom trenutku vremena $t$. Kao početak ciklusa računa se tačka u kojoj je trenutna vrednost pritiska $p$ jednaka nuli i prelazi iz negativnih u pozitivne vrednosti. U oba slučaja prikazana u tabeli 1.2 početak ciklusa funkcije koja opisuje promene zvučnog pritiska se ne poklapa sa trenutkom od koga računamo vreme ($t = 0$). U slučaju 1a funkcija $p_1$ ima vrednost koja odgovara četvrtini ciklusa ($\pi/2$), a funkcija $p_2$ vrednost koja odgovara tri četvrtine ciklusa ($3\pi/2$), u trenutku kada počinje računanje vremena ($t = 0$).

## 1.3 Akustička snaga izvora zvuka

Akustička snaga $P_a$ je osobina zvučnog izvora i predstavlja energiju koja u jedinici vremena prođe kroz površinu koja obuhvata izvor. Akustička snaga se izražava u $W$, i za uobičajene zvučne izvore ima vrlo male vrednosti. Na primer, akustička snaga koju čovek stvara pri normalnom govoru je oko 10 μW, dok pri pojačanom govoru dostiže vrednosti do oko 100 $\mu W$. Akustička snaga tačkastog zvučnog izvora se može predstaviti izrazom [6]:

$$P_a = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot c} \omega^4 \cdot S_d^2 \cdot d_{max}^2 \qquad (1.7)$$

gde su: $S_d$ efektivna površina i $d_{max}$ maksimalni pomeraj efektivne površine izvora, dok su ostale veličine prethodno definisane.

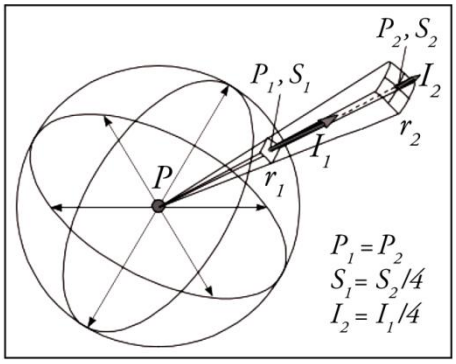
Iz izraza (1.7) se jasno vidi da je akustička snaga izvora veća što je njegova efektivna površina $S_d$ veća i što je veći pomeraj $d_{max}$te površine. Sa druge strane, uticaj frekvencije je veoma značajan, jer kako se iz pomenutog izraza vidi akustička snaga je proporcionalna frekvenciji na četvrti stepen. To drugim rečima znači da izvori visokih frekvencija mogu generisati datu snagu iako su im dimenzije male. Takav primer je sudijska pištaljka koja se čuje na celom velikom stadionu. Izvori niskih frekvencija moraju, za datu snagu, imati znatno veće dimenzije ili veće pomeraje. Podsetimo se da zvučnici za reprodukciju basova imaju mnogo veće membrane, sa većim maksimalnim pomerajima, nego zvučnici za reprodukciju visokih frekvencija. Takođe, muzički instrumenti za reprodukciju niskih tonova, kao što su čelo i bas imaju znatno veće dimenzije od violina koje reprodukuju tonove viših frekvencija.

## 1.4 Intenzitet zvuka

Pored zvučnog pritiska intenzitet zvuka je veličina koja se u akustici mnogo koristi, pre svega zbog toga što vrlo dobro ukazuje na promene do kojih dolazi pri prostiranju zvučnih talasa. Veza između intenziteta zvuka i zvučnog pritiska je [6]:

$$J = \frac{p^2}{\rho\, c} \qquad (1.8)$$

Ovaj izraz nećemo dokazivati, ali ćemo samo reći da je $\rho \cdot c$ konstanta koja je karakteristična za svaku sredinu, pa i za vazduh. U vazduhu, na 22 °C, $\rho \cdot c$ iznosi 400 IS jedinica. Navedeni obrazac važi i za ravne i za sferne talase, i u praksi se često koristi.




*Slika 1.12 – Opadanje intenziteta zvuka sa povećanjem rastojanja od izvora*

Po definiciji intenzitet zvuka je ona količina akustičke energije koja u jedinici vremena prođe kroz jediničnu površinu normalnu na pravac prostiranja zvučnih talasa. Kada poznajemo akustičku snagu tačkastog zvučnog izvora možemo da odredimo intenzitet zvuka, na rastojanju $r$, na sledeći način:

$$J = \frac{P_a}{S} = \frac{P_a}{4\pi\, r^2}, [J] = {}^{W}/_{m^2} \qquad (1.9)$$

Ovde je površina $S$ jednaka površini sfere poluprečnika $r$, koja obuhvata izvor. Očigledno je iz izraza (1.9) da intenzitet zvuka opada sa kvadratom rastojanja, što treba uvek imati na umu.

Do istog zaključka se može doći ako se posmatra deo prostora u koji zrači neusmeren zvučni izvor, slika 1.12. Na rastojanju $r_1$ od izvora zvučna snaga $P_1$ pokriva površinu $S_1$ a na rastojanju $r_2$ ista zvučna snaga $P_1$ se zrači na četiri puta veću površinu (4 $S_1$) pa će intenzitet na tom rastojanju biti četiri puta manji.

Pošto je intenzitet zvuka srazmeran kvadratu zvučnog pritiska, to će zvučni pritisak opadati linearno sa rastojanjem od zvučnog izvora. Iz ovoga proizilazi da je proizvod zvučnog pritiska $p$ i rastojanja od zvučnog izvora $r$ konstantan:

$$p \cdot r = const \qquad (1.10)$$

Ovo važi za sve pravce prostiranja i redovno se koristi u proračunima (pri ozvučavanju i sl.).

## 1.5 Gustina akustičke energije

Kao što smo prethodno videli, zvučni pritisak se prenosi na daljinu posredstvom pomeranja, tj. oscilovanja čestica sredine oko svojih ravnotežnih položaja. Čestice sredine koje osciluju poseduju određenu akustičku energiju, tako da i ceo okolni prostor postaje, (brzinom kojom se zvuk prostire), sedište energije kojom ga snabdeva izvor. U rešavanju mnogih akustičkih problema potrebno je znati kolika je ta energija, odnosno kolika je njena gustina u određenom prostoru u kojem postoji zvučno polje. Pod gustinom ovde podrazumevamo količinu akustičke energije po jedinici zapremine. Ne ulazeći u detaljnija objašnjena, navešćemo da za ravanske talase gustina akustičke energije $w$ iznosi [6]:

$$w = \frac{p^2}{\rho \cdot c^2} = \frac{J}{c} \qquad (1.11)$$

gde su sve veličine odranije poznate.