

1. UVOD U AKUSTIKU

1.1 Uvod

Akustika je nauka o zvuku. Kao takva, ona se bavi problematikom generisanja zvuka, njegovim prostiranjem u različitim fizičkim sredinama i efektima koje zvuk izaziva u sredini u kojoj se javlja. Akustika je veoma stara nauka, nastala još davno kao deo fizike. Tokom dugačkog perioda razvoja akustika je prošla proces širenja od jedne teorijske grane fizike do široke naučne i tehnološke oblasti. Neke grane akustike danas su interdisciplinarne i u sebi objedinjuju relativno raznorodne oblasti. Primer je oblast elektroakustičkih pretvarača (zvučnici, mikrofoni), u kojoj su sintetizovani mehanika, mikromašinstvo, tehnologija materijala, elektromagnetika, itd. U novije vreme akustika se proširila i na neke teme van inženjerstva koje se na neki način bave zvukom. Primer za to su naučne oblasti koje se bave teorijom rada čula sluha, ljudskim govorom i sličnim temama.

Zvuk je fizička pojava koja predstavlja sastavni deo čovekovog okruženja, gde se javlja kao prateći element mnogih životnih okolnosti. Zvuk je prisutan gotovo svuda: u samom organizmu čoveka, gde se javlja govor, preko najrazličitih zvukova stalno prisutnih u neposrednom životnom okruženju, pa do zvukova u dubinama okeana ili koji u vidu seizmičkih talasa dopiru iz dubine zemlje. Sa takvom disperzijom pojavnih oblika zvuk je fizička pojava kojom se danas bave inženjeri raznih struka. Oni ga posmatraju i analiziraju s različitih aspekata i primenjuju ga u veoma različitim okolnostima. Ne treba zaboraviti da je u ljudskoj civilizaciji zvuk dobio i druge funkcije. Njega koriste neke oblasti umetnosti kao izražajno sredstvo (muzika, film, pozorište, radio, TV), što znači u kreativne svrhe. Zvuk je osnova ljudske komunikacije, pa u raznim oblicima zvukova ljudi nalaze određeni smisao i značenja (govor, razni zvučni signali i slično). Zbog toga se zvukom, osim akustike, na svoj način bave razne društvene nauke i umetnosti.

U tom pogledu elektrotehnika, kao jedna velika inženjerska oblast, među svim tehničkim disciplinama verovatno je najšire povezana sa zvučnim pojavama. Mnoge uže oblasti elektrotehnike, po prirodi stvari, podrazumevaju rad sa zvukom, odnosno sa zvučnim signalima. Među njima je, u prvom redu, oblast telekomunikacija. Razvojem tehnologije, ali i razvojem zahteva korisnika, vremenom su se iz telekomunikacija izdiferencirale neke posebne uže oblasti koje se bave isključivo zvukom. Tako je nastala audiotehnika, koja se bavi prenosom zvučnih informacija u njihovom osnovnom opsegu, radiodifuzija zvuka, koja se između ostalog bavi prenosom zvučnih signala na daljinu, tehnologija multimedija u kojima je zvuk jedno od izražajnih sredstava, itd. Posebno je značajna činjenica da su u telekomunikacijama razvijeni teorijski alati koje je akustika preuzela, a kojim se opisuju akustički prenosni sistemi. Zbog toga se savremena akustika u značajnoj meri naslanja na teoriju telekomunikacija.

1.2 Pojam zvuka i njegova primena

Definicija koja je danas najopštije prihvaćena i koja pokriva sve pojavne oblike glasi: zvuk je svaka vremenski promenljiva mehanička deformacija u elastičnoj sredini. Akcenat u definiciji zvuka je na tri osnovne odrednice: vremenska promenljivost, mehanička deformacija i elastična sredina. „Vremenska promenljivost“ je bitna, jer postoje deformacije u elastičnim sredinama koje su vremenski nepromenljive (razni oblici plastičnih deformacija) i one kao takve nisu zvuk. Odrednica „mehanička deformacija“ je značajna jer pokazuje da je zvuk u svojoj osnovi mehanička pojava, samo na mikro planu strukture materijala. Kasnije će, na primer, biti pokazano da je mehanička energija koja će takođe biti predmet izučavanja ništa drugo nego mehanička energija koja se javlja na nivou mikročestica, njihovog kretanja i elastičnih međuveza. Najzad, u definiciji se pominje odrednica „elastična sredina“ kao uslov za postojanje zvuka. Elastične sredine su sva čvrsta tela i fluidi (gasovi i tečnosti). Samo takozvana amorfnata tela ne spadaju u tu kategoriju. Iz definicije zvuka proizilazi da on ne može postojati ni u vakuumu.

Navedena definicija zvuka nije povezana sa iskustvenim doživljajima zvuka koje svaki čovek ima. Ona obuhvata mnoge zvučne pojave koje su daleko od ljudske percepcije, odnosno čovekovog neposrednog iskustva. Sem u retkim okolnostima, zvučni talas nije dostupan ostalim ljudskim čulima (pored čula sluha). Zato mehanička priroda zvuka nije sama po sebi očigledna, pa ga u svojim predstavama ljudi sasvim pogrešno poistovećuju sa raznim drugim oblicima talasnih pojava. U subjektivnim predstavama mehanizma zračenja i prostora zvuka intuitivno se pribegava izvesnim analogijama. Najčešće zvuk se poistovećuje s elektomagnetskim zračenjem, odnosno sa svetlosnim zracima. Takav model nije tačan prikaz dešavanja u zvučnom polju jer se prenebregava njegova mehanička priroda. I u tehničkoj praksi često se sreću posledice greška u rešavanju akustičkih problema koje su rezultat previđanja činjenice da je zvuk mehanička pojava.

Polazeći od definicije zvuka kao vremenski promenljive mehaničke deformacije dolazi se i do definicije zvučnog talasa. To je mehaničko talasno kretanje koji nastaje mehaničkim oscilacijama u materijalu. Dalje se može definisati i pojam zvučnog polja. To je onaj prostor u kome postoji zvuk, odnosno mehanički poremećaj. Preduslov za oscilatornu pojavu kakav je zvučni talas su masa molekula, odnosno čestica koje osciluju i učestvuju u pojavi kretanja svojom inercijom, i postojanje unutrašnjih elastičnih sila koje teže da sredinu vrate u početno stanje kakvo je bilo pre deformacije. Zato se mehaničke oscilacije koje čine zvuk mogu javljati u fluidima i čvrstim telima. Osnovna definicija zvuka nužno nameće zaključak da postoje razlike u načinima kako se takvi procesi zbivaju u čvrstim telima, s jedne strane, i tečnostima i gasovima, to jest fluidima, s druge. U tečnostima i gasovima zvučne pojave se odvijaju prema opštim zakonima koji određuju ponašanje fluida, što je drugačije nego u čvrstim telima.

Pojava zvuka je u životu čoveka tesno povezana sa njegovim čulom sluha, odnosno sa činjenicom da zvuk izaziva čujnu senzaciju. Zato se u nekim okolnostima, nezavisno od navedene opšte definicije zvuka, koristi subjektivistička definicija koja kaže da je zvuk sve ono što registruje čulo sluha. Ovakva definicija je svakako nepotpuna, jer ne obuhvata zvukove koje čulo sluhe ne može percepirati, a takođe ne objašnjava ni njegovu fizičku prirodu. Ipak, ona je u izvesnom smislu primenjiva u inženjerskim oblastima gde je ljudsko uvo "mera stvari". Takve oblasti su audiotehnika, koja se bavi prenosom i obradom zvučnih informacija namenjenih slušaocima, i arhitektonska akustika koja se bavi zvukom u građevinskim objektima i podešavanjem građevinskog okruženja prema čovekovim shvatanjima komfora.

Zvuk u inženjerstvu

Zbog širine koju akustika kao nauka danas ima, njome se ljudi mogu baviti sa vrlo različitim ciljevima i zadacima. Sužavajući to pitanje samo na oblasti inženjerstva, može se reći da akustika obuhvata razne praktične aspekte primene zvuka. U tako shvaćenom polju delovanja postoji tri moguća inženjerska pristupa akustici, odnosno tri različita načina posmatranja zvučnih pojava:

- zvuk kao sredstvo komunikacije,
- zvuk kao ekološka tema i
- zvuk kao alatka.

Svaki od ova tri pristupa ima svoje specifičnosti zbog kojih je za bavljenje njima neophodna uska specijalizacija.

Prvo, zvuk predstavlja sredstvo komunikacije. U tom pogledu za čoveka su svakako najznačajniji oblici zvučnih pojava govor i muzika. Govor postoji zahvaljujući tome što čovek ima sposobnost kontrolisanog stvaranja zvuka vokalnim traktom, a istovremeno ima i senzor kojim ga može registrovati. Muzika kao specifičan oblik komunikacije otvorila je oblast umetničkog delovanja primenom zvuka kao izražajnog sredstva. U oblasti telekomunikacija postoje i okolnosti kada se zvučni talas koristi kao nosilac informacija, na istim principima kao elektromagnetski talas u telekomunikacijama. Na primer, takvu funkciju zvučni talas se primenjuje u vodenoj sredini u koju elektromagnetski talasi po prirodi stvari ne prodiru.

Prekomerna zvučna energija svojim delovanjem može ugroziti zdravlje ljudi. Ugrožavanje zvukom odvija se na dva nivoa: fizičkim dejstvom na organizam, usled čega se javljaju neke organske promene, i psihološkim dejstvom, jer zvuk može da vrši uznemiravanje. Fizičko ugrožavanje organizma odvija se kroz više "kanala", i nije ograničeno samo na funkciju uva. Posledice delovanja zvuka mogu se javljati na gotovo svim unutrašnjim organima. Njegovo psihološko dejstvo proizilazi iz procesa uznemiravanja i ometanja. Takvo dejstvo zvuka nije srazmerno njegovoj energiji, jer uznemiravanje može nastati i zvucima vrlo niskog energetskog nivoa (na primer, u tišini noći san može biti poremećen i objektivno vrlo tihim zvukovima iz susedstva). U tom smislu je uveden pojam buke. Po definiciji, buka je svaki neželjeni zvuk. Akcenat definicije je na neželjenosti, jer iz te činjenice proističe pojava uznemiravanja.

Zbog kompleksnog dejstva na čoveka, zvuk je postao jedna od nezaobilaznih tema u okviru ekološkog delovanja u savremenom društvu. Zvučne pojave su jedna od oblasti inženjerskog rada u ekologiji. Interesantno je da prekomerna energija zvuka u okruženju, upravo zbog njegove mehaničke prirode, osim čoveka može neposredno ugrožavati i pojedine osetljivije fizičke mehanizme koje karakteriše relativno mala masa pokretnih delova (mikromašine) ili sadrže relativno osetljive električne kontakte. Dobar primer za to su sateliti čiju funkciju zvuk veoma visoke energije, kakav nastaje prilikom lansiranja rakete nosača, može ugroziti. Zbog toga jedna od procedura testiranja satelita u procesu proizvodnje podrazumeva kontrolisano izlaganje zvuku veoma visokih intenziteta.

Zvuk može u različitim okonostima biti i alatka, kao aktivno ili pasivno sredstvo. Kao aktivna alatka zvuk služi kada treba da svojom energijom posluži za izvršenje neke radne operacije ili za izvršavanje neke posebne funkcije. Kao pasivna alatka koristi se kada se vrši registrovanje zvukova koji spontano nastaju, i kada je cilj da se preko zvuka otkrije pojava nekog događaja. Zvuk nosi informacije o izvoru koja ga je

generisao, pa se njegovom analizom dobijaju informacije o procesu u kome je nastao (takozvana dijagnostika stanja).

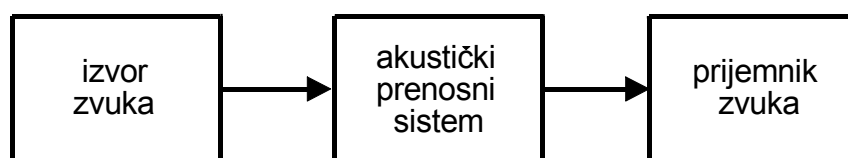
Karakteristična primena zvuka kao aktivne alatke je sistem osmatranja dna u vodi ispod broda (sonar). Može se reći da je to akustički „radar“, jer ovaj uređaj šalje zvučni talas i zatim registruje energiju reflektovanu od prepreka. U takvoj primeni zvuk je aktivno sredstvo osmatranja jer je generisan isključivo zbog te namene. Na istim principima se zasnivaju i ultrazvučne dijagnostičke metode, široko primenjivane u medicini, gde se generiše ultrazvučni talas, pa se zatim registruje refleksije od pojedinih slojeva tkiva u organizmu. Zvuk kao aktivna alatka pojavljuje se i u vrlo jednostavnijim formama, kao što su ultrazvučne kade za čišćenje površine predmeta ili u uređajima za zavarivanje ultrazvukom. Danas se zvuk na takav način koristi i u nekim oblastima koje su naizgled veoma daleko od akustike, kao što je mikroskopija, termomašinstvo i slično.

U kategoriji korišćenja zvuka kao pasivne alatke spadaju sve vrste „oslušivanja“. Paradigma takve upotrebe zvuka je slušanje rada srca i pluća pomoću stetoskopa da bi se utvrdilo zdravstveno stanje tih delova organizma. Sofisticiranija verzija istog postupka je, na primer, sistem za dijagnostiku stanja mašina ili postrojenja, gde se „oslušuju“ zvukovi koji nastaju u radu i analizom utvrđuje njihova ispravnost.

Energetski i informacioni aspekt zvuka

Svaka od pobrojanih inženjerskih upotreba zvuka vodi ka dva moguća, suštinski različita pristupa, odnosno načina posmatranja zvuka. Zvuk se može posmatrati kao energija u prostoru ili kao signal. Posmatranje zvuka kao pojave koja nosi energiju primenjuje se u onim disciplinama akustike gde je od značaja samo energetski nivo zvučnog polja u prostoru. Sve se to radi sa ciljem da se energetski nivo zvuka u nekoj tački ili delu prostora učini dovoljno velikim ili dovoljno malim. Tipičan primer oblasti u kojoj se zvuk posmatra samo kao energija u prostoru jeste zaštita od buke i vibracija, gde se znanje primenjuje da se taj nivo učini dovoljno malim.

U osnovi pristupa u kome se zvuk posmatra kao signal leži činjenica da on može biti prenosilac informacija. Tada se neminovno zvuk mora podvesti pod dobro poznat pojam signala. Na slici 1.1 prikazana je elementarna blok šema prenosa informacija, koja je sasvim primenjiva i na sve akustičke probleme. Da bi postojala neka zvučna pojava uvek mora da postoji izvor. U načinu kako se zvučna energija generiše, u njenim karakteristikama u vremenskom i frekvencijskom domenu koduju se informacije. Pobudna veličina akustičkog prenosnog sistema sa slike je zvučni pritisak ili zvučna snaga, što zavisi od okolnosti. Prijemnik zvuka može biti elektroakustički senzor ili čulo sluha.



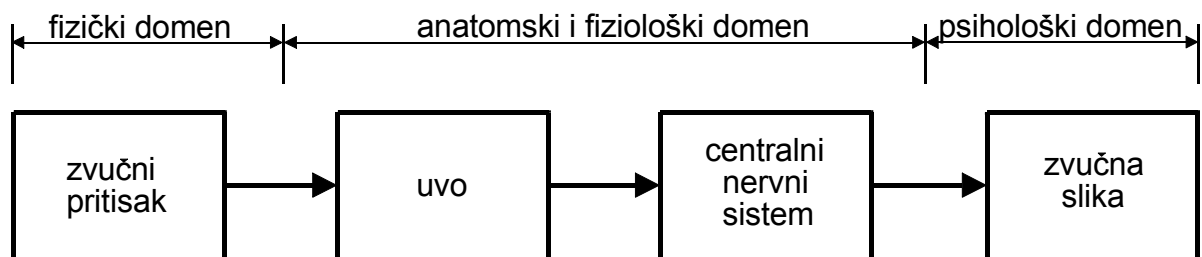
Slika 1.1 - Informaciona blok šema akustičkih pojava

Posmatranje zvuka kao signala nameće potrebu da se u akustici primenjuje osnovna teorija telekomunikacija i teorija informacija. Prenosne funkcije i impulsni odzivi akustičkih sistema predmet su merenja i modelovanja. Time se taj deo akustike kao nauke u celini približava telekomunikacijama. Teorijski alati kojim se koriste u akustici i kojim se analiziraju akustički prenosni sistemi razvijeni su u telekomunikacijama.

Nezavisno od primene teorijskih alata preuzetih iz telekomunikacija, akustika je u jednom svom segmentu direktan deo telekomunikacija. U telekomunikacijama akustika se pojavljuje na dva načina:

- na početku i na kraju prenosa zvučnih informacija, gde je informacija koja se prenosi telekomunikacionim kanalom u akustičkom domenu (na primer, radiodifuzija zvuka, telefonija, itd.) i
- kao celovit komunikacioni sistem u kome je zvuk nosilac informacija čitavim putem (na primer, u oblasti podvodnog zvuka ili u sistemima za ozvučavanje).

U inženjerskim oblastima u kojima se zvuk posmatra kao signal često se na izlazu akustičkog prenosnog sistema, na mestu prijemnika, pojavljuje čovekovo čulo sluha. Takva okolnost uvodi u akustiku kao egzaktnu inženjersku oblast izvesne psihološke i fiziološke fenomene kojima egzaktnost inače nije svojstvena. Ovaj specifični slučaj završetka akustičkog prenosnog sistema može se predstaviti blok šemom sa slike 1.2. Pobudna veličina čula sluha je zvučni pritisak koji se javlja na izlazu iz nekog akustičkog sistema prenosa. On preko uva deluje na centralni nervni sistem, odnosno odgovarajuće centre u mozgu. Odziv koji pri tome nastaje u svesti lušaoca naziva se zvučna slika. Zbog toga se definiše psihološki, dakle subjektivni odziv čoveka na jedan fizički nadražaj koji posredstvom čula sluha dolazi iz okruženja. Proces slušanja mora se shvatiti kao proces preslikavanja signala iz fizičkog domena u skup parametara definisanih u psihološkom domenu.



Slika 1.2 - Veza između zvučnog polja i zvučne slike

Iako su u pitanju različiti fizički pristupi, u nekim okolnostima posmatranje zvuka kao energije i kao signala mora se kombinovati. Takav primer su, recimo, učionice i amfiteatri u kojima glas govornika na mestu najudaljenijeg slušaoca treba da bude dovoljno glasan, to jest da ima dovoljno veliku energiju, i da istovremeno bude razumljiv, što znači da njegov informacioni sadržaj bude očuvan.

Kratka istorija akustike

Istorija akustike počinje veoma davno, još u antičko doba. Postoje dokazi koji datiraju još iz III veka p.n.e. da su tada korišćeni neki akustički fenomeni. Iz tog starog veka ostalo je zabeleženo ime arhitekta i inženjera Vitruvijusa. Neki akustički fenomeni tada primenjeni u drevnim građevinama postali su slavni i kao takvi predmet intresovanja turista danas. Poznati su amfiteatri iz tog vremena (o kojima će inače biti reči kasnije) i hramovi sa izvesnim akustičkim efektima. Taj period razvoja neki autori nazivaju period kada je akustika bila umetnosti, a zasnivala se na empirijskom znanju.

Istini za volju, u nekim krajevima sveta tokom srednjeg veka umesto umetnosti to je preraslo u obično kopiranje, bez stvarnih udubljanja u principe i namene. Jedna ilustracija akustičkog delovanja u srednjem veku na našem tlu jesu akustički rezonatori izvađeni iz svodova starih srpskih crkava, prikazani na slici 1.4.



Slika 1.3 - Fotografije akustičkih rezonatora izvađenih iz svodova Gornje crkve u Sremskim Karlovcima (levo) i ruševina crkve u selu Komorane (desno)

Razvoj akustike od tih davnih antičkih vremena do danas može se podeliti u nekoliko perioda:

- period antike i srednjeg veka (akustika kao umetnost),
- period od XVIII veka do početka XX veka (akustika postaje nauka),
- period od početka XX veka (uvođenje električnih uređaja i eksperimenti),
- period poslednjih tridesetak godina (primena računara za modelovanje i merenje).

Osnove savreme akustike postavljene su početkom XVII veka, kada ona polako postaje nauka. Prvo eksperimentalno merenje brzine zvuka u vazduhu izvršeno je još 1635. godine (na osnovu razlike u stizanju bljeska i zvuka pri pucnju iz topa). U tom veku Njutn je postavio matematičke osnove prostiranja zvuka. U XVIII veku nekim segmentima akustičke problematike bavili su se i takva imena kao što su Ojler i Lagranž. Osnove teorijske postavke zvuka u fluidima postavljene su u 18. veku.

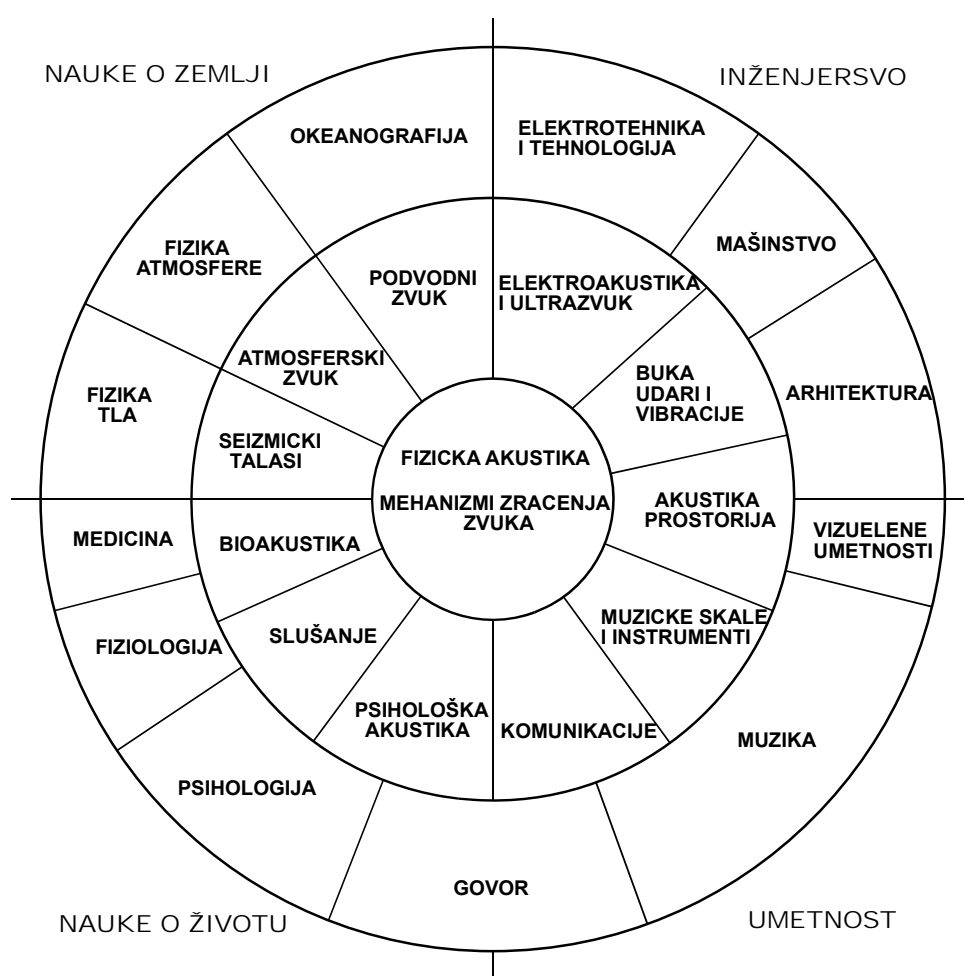
Akustika postaje savremena inženjerska oblast početkom dvadesetog veka. Za taj period vezano je ime Amerikanca Sabina, koji je postavio teorijske osnove akustike prostorija. Sve to prethodilo je pojavi električnih mernih instrumenata. Sa pojavom mikrofona, zvučnika i sistema za zapisivanje signala razvoj akustike dobio je novi zamah, posebno izražen u drugoj polovini XX veka. Tome je naviše doprineo razvoj tehnologije, pre svega elektrotehnike koja je omogućila korišćenje moderne merne opreme, senzora i pretvarača.

Najnovija epoha u istorijskom razvoju akustike prepoznaje se proteklih tridesetak godina zahvaljujući korišćenju računara. Oni su omogućili dva ozbiljna pomaka: u oblasti modelovanja zvučnog polja i u oblasti merenja. Čak i neke klasične oblasti akustike koje se već dugo razvijaju, kao što je akustika prostorija, poslednjih dve decenije doživele su veliki pomak zahvaljujući primeni računara u merenjima. Dovoljno je napomenuti da je teorija o kvalitetu koncertnih dvorana doživela najveći progres tek u

poslednjim decenijama. Šta više, veza između subjektivnih atributa zvučnog polja i fizičkih karakteristika koncertnih sala još uvek je otvorena tema za istraživanja.

Podela akustike kao nauke danas

Kako se vremenom razvijala primena zvuka, tako se i akustika kao nauka širila ka raznim drugim oblastima nauke i života u kojima se zvuk pojavljuje kao tema. Tako su nastajale nove, često potpuno zaokružene discipline unutar šire oblasti akustike, pa je čitava oblast akustike kao nauke danas postala veoma razuđena. Postoji preplitanje akustike sa tehnologijom, odnosno sa industrijom, nastajale su veze sa mnogim oblastima inženjerstva, posebno onima iz šire oblasti elektrotehnike, a postoji i spoj akustike sa netehničkim naukama, kao što je medicina, psihologija, umetnost.



SLIKA 1.4 – Jedna moguća šematska podele akustike.

Na slici 1.3 prikazan je jedna moguća šematska podela akustika kao nauke kakva je ona danas. Vidi se da je ljudska delatnost u celini podeljena na četiri velike podoblasti od kojih svaka ima svoj kvadrant: nauke o zemlji, nauke o životu, inženjerstvo (odnosno tehnologija) i umetnost. Ove četiri oblasti označene su u uglovima slike. U centru šeme nalazi se fizička akustika. To je oblast koja se, najkraće rečeno, bavi proučavanjem generisanja zvuka i prirodom zvuka i zvučnih pojava. Ona objašnjava nastanak zvuka i pojave pri njegovom prostiranju. Šema pokazuje da se

akustika vremenom iz tog svog jezgra razvijala prema sve četiri nabrojane oblasti ljudskog delovanja.

U spoljašnjem koncentričnom prstenu šeme pobrojane su razne discipline u kojima postoji veza sa akustikom. U inženjerstvu su navedeni: elektrotehnika, mašinstvo i arhitektura. U umetnosti spregu sa akustikom imaju vizuelne umetnosti (pre svega dizajn enterijera), muzika i govor kao izražajna sredstva umetnosti. Govor je takođe, uz medicinu, fiziologiju i psihologiju, deo šire oblasti nauka o životu s kojima je akustika povezana. Na kraju, u naukama o zemlji akustika je povezana s okeanografijom, koja proučava vodenu sredinu, fizikom atmosfere, koja proučava vazдушnu sredinu, i sa fizikom tla, u kome se javljaju seizmički talasi.

U srednjem koncentričnom prstenu šeme nalaze se uže oblasti akustike, pozicionirane na šemi tako da se njihova polja dodiruju sa poljima drugih disciplina sa kojima su povezane. Na primer: oblast komunikacija u akustici na šemi je povezana sa govorom i sa muzikom, i bavi se komunikacijom zvukom. Akustika prostorija ima svoje veze sa arhitekturom, jer se bavi prostorima u građevinskim objektima, zatim sa vizuelnim umetnostima, jer sve akustičke mere su i deo enterijera, i sa muzikom, jer akustika prostorija određuje ambijent za muzička izvođenja.

Ovakav disperzivan razvoj akustike vremenom je učinio da pojedine njene oblasti sa šeme, iako su u svom korenu deo iste bazične nauke, postanu u stručnom smislu međusobno veoma udaljene i zahtevaju usku specijalizaciju onih koji se njima bave. To takođe znači da se niko ne može baviti akustikom u celini. Specijalizacija u pojedinim oblastima akustike sa šeme često podrazumeva potpuno raličito prethodno obrazivanje.

1.3 Zvuk kao fizička pojava

Definicija utvrđuje da zvuk predstavlja vremenski promenljivu deformaciju u elastičnoj sredini. To znači da u svakoj elastičnoj sredini može nastati mehanička deformacija tako što će mali delovi materije nekom spoljašnjom silom biti izvedni iz svog ravnotežnog položaja i tako podstaknuti na kretanje oko nekog svog ravnotežnog položaja koji zauzimaju u materijalu. Veličina deformacije sredine funkcija je prostornih koordinata i vremena. Izvor spoljašnje sile koja izaziva poremećaj naziva se izvor zvuka. Prostor u kome postoji zvuk naziva se zvučno polje.

Za pojavu zvuka od značaja su mase malih delova materije koji osciluju i unutrašnje restoracione sile koje teže njihovom vraćanju u ravnotežno stanje. Pod malim delovima materije podrazumevaju se molekuli ili grupe molekula koji u takvom procesu vibracija imaju jednako, odnosno združeno kretanje. Pri tome nije od značaja kolika je veličina tih sitnih delova materije koji se oscilatorno kreću, već je odlučujući parametar njihovo zajedničko kretanje u procesu oscilovanja i činjenica da se ono jedinstveno kvantifikuje jednim fizičkim podatkom o kretanju.

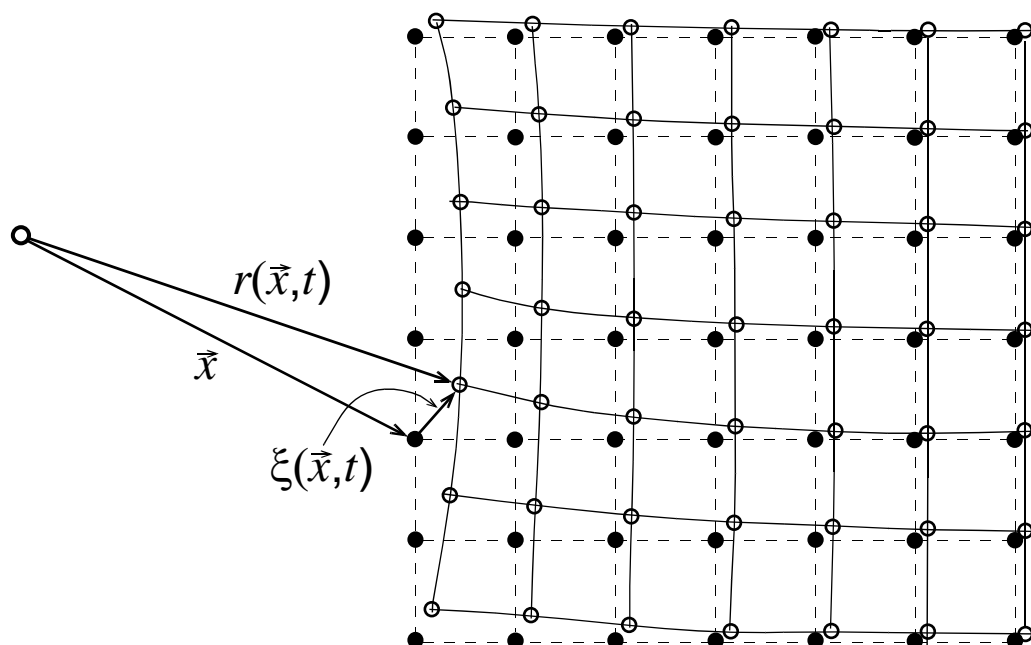
U zvučnim pojavama kakve se javljaju u čovekovom okruženju, što je predmet interesovanja u telekomunikacijama, pojavljuju se samo male deformacije, odnosno vibracije veoma malih amplituda. U takvim okolnostima važe linearne zavisnosti između pobude i odziva materijala, i to predstavlja oblast takozvane linearne akustike. U slučaju veoma velikih deformacija promene koje trpe elastičnosti u materijalu izlaze iz granica linearnosti, pa i odnos pobude i odziva prestaje da bude linearan. Tada fizički procesi u zvučnom polju postaju složeni.

Iako je suština zvuka kao fizičke pojave definisana na mikro planu kroz mehaničko kretanje čestica materijala, u većini inženjerskih disciplina gde se

proučavaju zvučne pojave od interesa su samo makroskopski efekti zvuka. Posmatra se medijum u celini kao sredina u kojoj se javlja zvuk i analiziraju se makroskopski fenomeni koji su posledica njegovog postojanja. Proces i na nivou delova materijala koji osciluju od značaja su samo u onoj meri u kojoj su potrebni za razumevanje i modelovanje pojava i u kojoj utiču na opšta fizička zbivanja.

Zvučno polje

Kvantitativni pokazatelj stanja u zvučnom polju može biti svaka fizička veličina koja opisuje deformaciju u mediju kao funkciju vremena i prostornih koordinata. Jedan uprošćeni šematski prikaz poremećaja u materijalu koji se javlja pojavom zvuka dat je na slici 1.5. Označen je položaj \vec{x} jedne čestice materijala kada je u miru, i u jednom trenutku njenog kretanja usled prisustva zvuka $\vec{r}(\vec{x}, t)$.



SLIKA 1.5 - Šematski prikaz strukture sredine koja je pobuđena zvukom sa označenim karakterističnim veličinama

Sa slike se vidi da najdirektniji pokazatelj, odnosno kvantifikator zvučnog polja može biti pomeraj čestice, jer on najneposrednije definiše deformaciju materijala. Pomeraj posmatrane čestice iz tačke \vec{x} u tačku $\vec{r}(\vec{x}, t)$ je $\xi(\vec{x}, t)$. Ovako definisan pomeraj čestice je kontinualna promenljiva u prostoru i vremenu i ona definiše zvučno polje, odnosno zvuk. U opštem slučaju, pomeraj u zvučnom polju $\xi(\vec{r}, t)$ predstavlja složenu funkciju vremena i prostornih koordinata. Mogući oblici kretanja čestica u polju oko svog ravnotežnog položaja određene su prirodom materijala i u čvrstim telima mogu biti različiti, dok su u fluidima ta kretanja pri malim pobudama (oblast linearne akustike) odvijaju samo na jedan mogući način.

Za opisivanje zvučnog polja, osim pomeraja, takođe se može upotrebiti brzina oscilovanja čestice ν i njeno ubrzanje a . Između pomeraja, brzine i ubrzanja postoji definisana veza (vidi okvir), pa je principijelno svejedno koja se od ove tri veličine usvaja da bude kvantifikator zvučnog polja.

U procesu oscilovanja opšta veza između pomeraja, brzine i ubrzanja je:

$$v = \frac{d\xi}{dt} \quad ; \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2\xi}{dt^2}$$

Za prostoperiodične pojave izvodi u gornjim izrazima se pojednostavljaju, pa je:

$$v = \omega\xi \quad ; \quad a = \omega^2\xi$$

Pretvaranje signala jedne veličine u drugu svodi se na primenu integratora ili diferencijatora.

U inženjerskoj praksi izbor veličine kojom će se kvantifikovati zvučno polje zavisi od okolnosti. Na primer, senzori zvuka u čvrstim telima najčešće rade na principima interakcije inercijalnih masa i piezo materijala. Zbog toga takvi senzori zvuka na svom izlazu daju signal koji se srazmeran ubrzanju duž jedne definisane ose, i nazivaju se akcelerometri. Neki senzori zvuka na svom izlazu daju električni signal koji je srazmeran pomeraju zbog toga što se u njima registruje pomeranje sredine. Prema tome, izbor veličine kojom se karakteriše stanje zvučnom polju je samo stvar tehničkih okolnosti, uglavnom tehnoloških mogućnosti pretvarača za merenje.

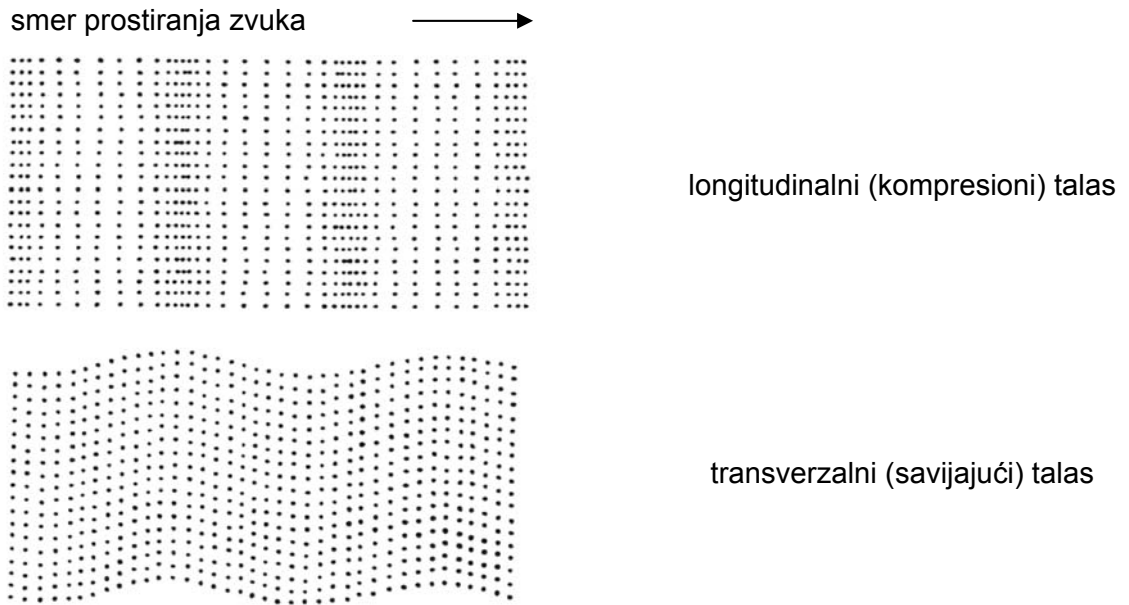
Na osnovu slike 1.5 jasno je da se energija u zvučnom polju sastoji od zbira energija mehaničkih oscilacija svih čestica zahvaćenih oscilovanjem. Ta energija ima svoju komponentu kinetičkog oblika energije čestica u kretanju i komponentu potencijalnog oblika koja se javlja u elastičnostima njihovih unutrašnjih veza. Zbir ove dve energije čini ukupnu zvučnu energiju koja postoji u materijalu. Ta energija se može posmatrati kao veličina totalne energije u mediju zahvaćenom zvukom (najčešća oznaka je W), ili kao lokalni pokazatelj preko gustine energije definisane u jednoj tački prostora (oznaka E , izražena u količini energije po jedinici zapremine).

Zvučno polje u čvrstim telima

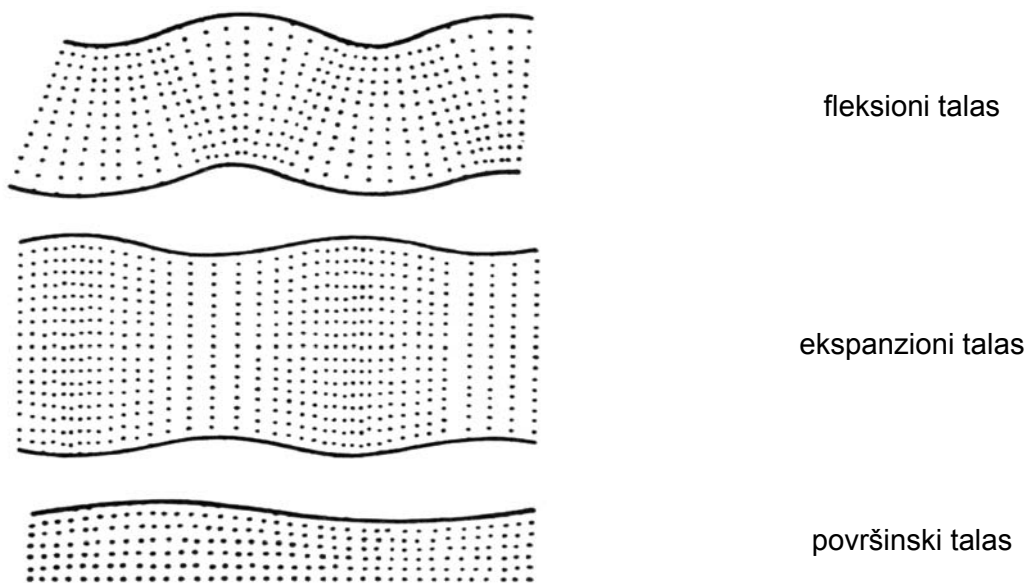
Pojave oscilovanja u čvrstim materijalima, makroskopski posmatrano, mogu biti raznoliki. Na slici 1.6 prikazana su dva oblika zvučnog talasa koji može nastati u masivu materijala, odnosno u komadima koji su u sva tri pravca dovoljno veliki u odnosu na talasnu dužinu. To su longitudinalni i transferzalni talas. Oni se razlikuju po pravcu oscilovanja čestica materijala u odnosu na pravac prostiranja talasa. Vidi se da longitudinalni talas podrazumeva oscilovanje čestica u pravcu prostiranja talasa, a transferzalni oscilovanje normalno na pravac prostiranja talasa.

U komadima materijala kod kojih je bar jedna dimenzija relativno mala u odnosu na talasnu dužinu (ploče, šipke, žice) postoje i drugi fizički oblici zvučnih talasa. Oblici oscilovanja u njima prikazani su na slici 1.7. U pločama i šipkama mogu se javiti oscilovanja savijanjem (fleksioni talasi) ili promenom debljine (ekstenzioni) talasi. Najzad, u svim fizičkim formama materijala moguća je pojava površinskih talasa. Kod njih su pobudom zahvaćene samo čestice u jednom ograničenom površinskom sloju.

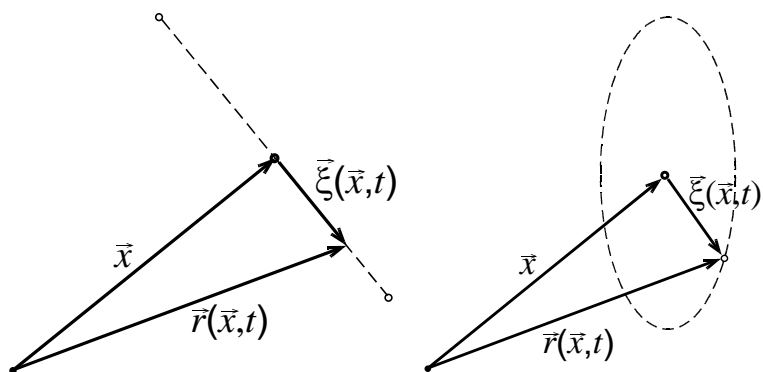
Da bi se na neki način kvantifikovala raznolikost kretanja čestica u čvrstim telima, uveden je pojam polarizacije. On označava oblik kretanja čestica pri oscilovanju u zvučnom polju. Ovo je ilustrovano na slici 1.8. Ako se kretanje čestica dešava samo po jednoj pravoj, kao što je ilustrovano na levom delu slike, onda se to naziva linearna polarizacija sredine. Ako čestica istovremeno vrši dva linearna kretanja sa međusobno normalnom polarizacijom i pomerajem faze, kao što je prikazano je na desnom delu slike 1.8, onda je to poremećaj sredine sa eliptičnom polarizacijom.



Slika 1.6 - Oblici oscilovanja u masivu čvrstih materijala



Slika 1.7 - Oblici oscilovanja u pločama i šipkama



Slika 1.8 - Ilustracija linearne (levo) i eliptične polarizacije (desno).

Zvučno polje u fluidima

Nastanak i širenje zvuka u fluidima razlikuje se od zvuka u čvrstim telima. To je posledica prirode fluida kao fizičke sredine i zakona koji definišu njihova moguća stanja. Činjenica da čovek živi u vazdušnoj sredini čini da je u inženjerskom smislu priroda zvuka u gasovitim sredinama od posebnog značaja. Sve oblasti akustike koje podrazumevaju čovekovo čulo sluha kao prijemnik, što je uvek slučaj sa akustikom u telekomunikacijama, prevashodno se bave zvukom u vazduhu. Zbog toga je prirodno ovde stavljeno težište na vazduh kao medij u kome se javlja zvuk.

U mnogim okolnostima akustički prenosni sistem je složen, i sastoji se od kombinacija vazdušnih prostora i čvrstih tela. Tipičan primer ovako kombinovanog prenosnog sistema je pri prostiranju zvuka iz jedne prostorije, gde se nalazi neki izvor zvuka, u susednu prostoriju gde se može naći neki prijemnik. Zvuk se u takvim okolnostima prostire kroz vazduh prve sobe do pregradnih zidova, poda i tavnice, prolazi kroz materijal ovih pregrada i nastavlja do prijemnika kroz vazduh druge sobe. U inženjerskim oblastima koje se bave zvučnom izolacijom ovako postavljene prostorije nazivaju se "predajna" i "prijemna". Dakle, prenosni put se u ovom slučaju sastoji od dva vazdušna prostora i jedne masivne strukture. U praksi je moguće pronaći i složenije primere akustičkih prenosnih sistema gde zvuk od izvora do prijemnika više puta menja sredinu kroz koju se prostire.

Osnovna osobina gasova značajna za pojavu zvuka je da se njihova zapremina može deformisati, i da se pri tome javlja unutrašnja pojava suprotstavljanja lokalnim deformacijama zapremine. Kao odziv na lokalnu pobudu koja vrši deformaciju javlja se unutrašnja restoraciona sila koja teže povratku u početno stanje. Ta sila u fluidu, koja se javlja pojavom deformacije, definisana je lineranom jednačinom stanja koja povezuje tri fizičke veličine od kojih zavisi njegovo termodinamičko ponašanje:

$$p = \rho rT \quad (1.1)$$

gde je

p	- ukupni pritisak u Pa,
ρ	- gustina fluida kg/m ³ ,
T	- apsolutna temperatura u K,
r	- konstanta koja zavisi od vrste gasa.

Prema tome, izraz (1.1) pokazuje da u gasovima postoji srazmera $p \sim \rho T$. Iz ovoga proizilazi da se lokalni pritisak može posmatrati kao pokazatelj stanja lokalne deformisanosti gasa. Njegova vrednost se može menjati spoljašnjim uticajima kojima se menja gustina, što je slučaj kada se spoljašnji uticaj vrši sabijanjem gasa, ili menjanjem lokalne temperature, što se može vršiti pogodnim lokalizovanim zagrevanjem.

Eksperimentalno je utvrđeno da se pojava zvuka u vazduhu sa dovoljnom tačnošću mogu posmatrati kao adijabatski proces. Da bi akustički poremećaj u fluidu bio adijabatski, uslov je da susedni elementi fluida ne smeju rasmenjivati toplotnu energiju. Da bi to bilo zadovoljeno, potrebno je da budu ispunjeni sledeći uslovi:

- toplotna provodnost sredine mora biti mala,
- temperaturni gradijent koji se javlja pojavom zvuka mora biti mali,

- promene stanja moraju se dešavati dovoljno brzo.

Toplotna provodnost vazduha jeste dovoljno mala, za normalne zvukove iz čovekovog okruženja temperaturni gradijent je relativno mali, a za čujne frekvencije promene stanja su dovoljno brze. U takvim okolnostima toplotni fluks između susednih elemenata fluida za vreme promena stanja je zanemarljiv.

U uslovima adijabatskih promena stanja u vazduhu njegova temperatura nije konstantna, već entropija. Vazduh se sa dovoljnom tačnošću može smatrati idealnim gasom, a za idealne gasove važi adijabatska jednačina stanja:

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (1.2)$$

gde je γ odnos specifičnih toplota. Odavde sledi da je $p = f(\rho)$. Ovo je veoma značajna relacija linearne akustike. Za fluide koji nisu idealan gas adijabatska jednačina stanja je složenija. Takođe pri veoma visokim intenzitetima zvučne pobude uslovi za adijabatske procese prestaju da budu zadovoljeni (nastaje veliki lokalni temperaturni gradijent) pa gornja relacija ne važi.

1.4 Struktura zvučnog talasa u vazduhu

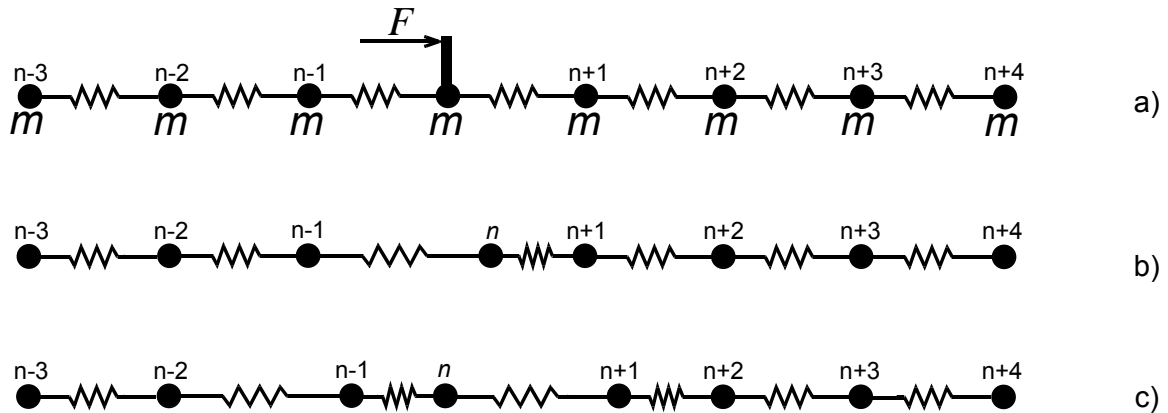
Ravnotežno stanje gasa pre nastanka zvuka u njemu predstavljeno je početnim pritiskom p_0 , odnosno gustinom ρ_0 . Ova vrednost odgovara atmosferskom pritisku koji postoji u sredini. Deformacija pri pojavi zvuka nastaje zgušnjavanjem i razređivanjem, što znači promenama vrednosti pritiska i gustine dva pokazatelja stanja. Pojave koje nastaju u tom procesu određuju prirodu zvučnog polja.

Jedan jednostavan model nastanka zvuka u vazduhu

Jedan jednostavan model na kome se može opisati priroda elastičnih deformacija u vazduhu zasniva se na jednodimenzionalnom nizu kuglica jednakih masa m međusobno povezanih oprugama. Ovaj model je šematski prikazan na slici 1.9a. Kuglice svojim masama modeluju molekule, odnosno delove vazduha koji se zajedno kreću, a opruge modeluju elastične sile koje postoje između njih.

Kada se na jednu od kuglica u nizu sa slike kratkotrajno deluje nekom spoljašnjom silom F i tako joj se preda neki impuls energije, dolazi do lokalne deformacije sredine. Ona se manifestuje kretanjem kuglice na osnovu kinetičke energije koju je dobila. Dolazi do pomeranja kuglice u pravcu dejstva sile i postepenog prelaska kinetičke energije njenog kretanja u potencijalni oblik u susednim oprugama. Ovo stanje je prikazano na slici 1.9b. Dalje se poremećaj prenosi na susedne kuglice i nastavak tog procesa prikazan je na slici 1.9c. Sa slike je vidljivo pomeranje impulsa energije u prostoru na obe strane niza. Za svaku pobuđenu kuglicu u tom kretanju može se definisati brzina kretanja v , ali one nisu označene na slici zbog preglednosti crteža. Suština pojave zvuka je u brzini dešavanja, čime deformacija ostaje lokalna pojava.

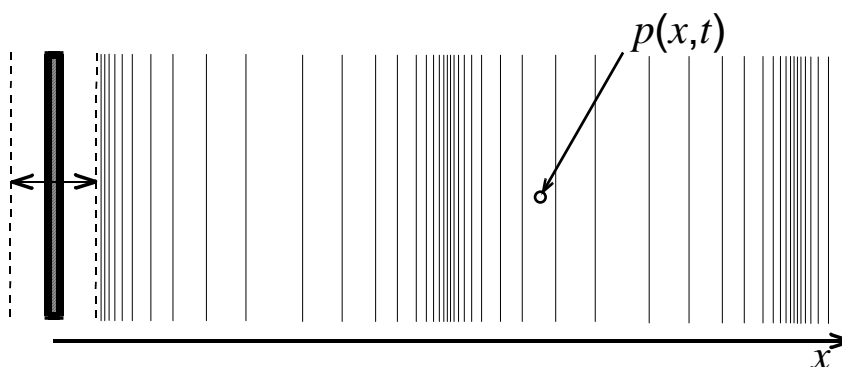
Eventualno sporo dejstvo sile na modelu sa slike 1.9 vršilo bi translatorsno pomeranje čitavog sistema u pravcu dejstva sile, što nije zvuk već makroskopsko kretanje materije.



SLIKA 1.9 - Šema prenošenja impulsa na modelu sa oprugama i masama: a - početno stanje i mesto gde deluje spoljašnja sila, b) i c) - dva sukcesivna stanja sistema po prestanku impulsa.

Zvučni talas u vazduhu

Model sa kuglicama i oprugama sa slike 1.9 na uprošćen način pokazuje šta se dešava kada u vazduhu osciluje jedan kruti klip i svoju energiju saopštava neposrednoj vazdušnoj okolini, kao što je prikazano na slici 1.10. Klip na levoj strani slike svojim oscilacijama stvara poremećaje u neposrednom okruženju koji svojom prirodom kvalitativno odgovaraju opisanom procesu sa kuglicama. Umesto kroz pokretanje jedne kuglice, ovde se poremećaj javlja u vidu talasnog fronta koji nastaje u vazduhu po čitavoj površini klipa.



SLIKA 1.10 - Ilustracija nastanka zvuka u vazduhu oscilovanjem krutog klipa

Taladni front označava površinu na kojoj svi molekuli vazduha imaju istu fazu kretanja. Talasni front kao ravan, što je slučaj prikazan na slici 1.10, predstavlja najjednostavniji slučaj, i kao takav je u izvesnom smislu izuzetak u prirodi. Uobičajeno je da talasni front odstupa od idealne ravni i ima manji ili više zakrivljen oblik. Da bi se u praksi generisao ravan talasni front potrebno se stvoriti izvesne preduslove (videti tekst u okviru).

Osim zbog činjenice da ravan talasni front predstavlja izuzetak, primer sa slike 2.6 takođe predstavlja i idealizaciju sa aspekta nekih drugih detalja, a koji su uvedeni radi pojedostavljenja objašnjenja. Na slici je zanemareno nekoliko važnih činjenica. Prvo, poremećaj u vazduhu nastaje sa obe strane klipa, pri čemu su ta dva generisana zvuka u protivfazi (kada je sa jedne strane zgušnjavanje vazduha, sa druge strane nastaje razređenje, i obrnuto). Zvuk koji nastaje radom klipa sa jedne njegove strane širio bi se oko klipa, što stvara uslove da dođe do poništavanja sa onim što je nastalo sa suprotne strane. Najzad, nije razmatrano kako klip stoji u zadatoj poziciji i kako na njega deluje pobudna sila. Ipak, sva ta zanemarivanja ne umanjuju primenljivost ove ilustracije za objašnjenje nastanka zvuka u vazduhu.

Lokalni pritisak p , vektor brzine \mathbf{v} i gustina ρ su parametri koji pokazuju stanje u zvučnom polju. Sve promenljive veličine polja moraju zadovoljavati jednačine dinamike fluida. Na osnovu adijabatske jednačine stanja predstavljene izrazom (1.2) u procesu koji nastaje ispred klipa važi:

$$p = f(\rho) \quad (1.3)$$

U svim razmatranjima o kojima će biti reč u nastavku smatraće se da je sredina u kojoj se prostire zvuk homogena. U idealizovanom eksperimentu sa slike 1.10, uz pretpostavku da je sredina homogena, pritisak, brzina i gustina neće zavisiti od položaja, odnosno od prostornih koordinata.

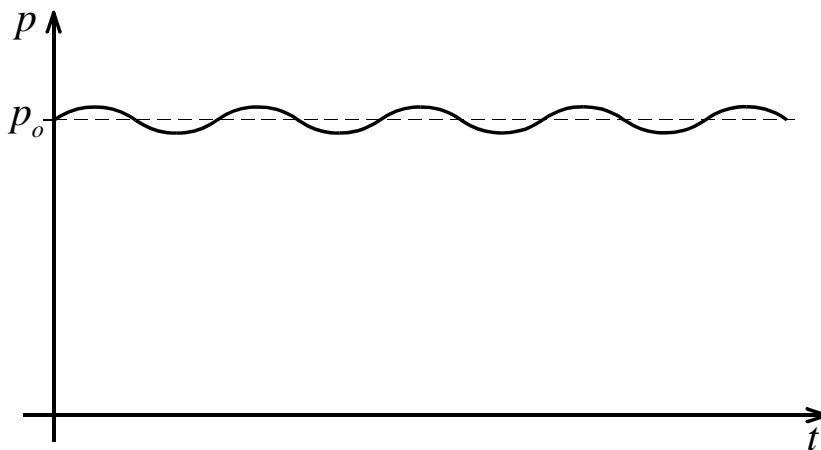
Primer problema kada se ne može pretpostaviti homogenost sredine je analiza prostiranja zvuka na relativno velika rastojanja, reda više stotina metara odnosno kilometara. Na prostorima takve veličine nehomogenost vazdušne sredine je uobičajena. Na manjim rastojanjima, na primer u prostorijama kao čestom obliku sredine gde se analizira zvučno polje, eventualna nehomogenost vazduha se, po definiciji, zanemaruje.

Zvučni pritisak

U prisustvu deformacije u gasu kakva nastaje pojavom zvuka pritisak i gustina imaju svoju statičku komponentu i promenljivu komponentu, odnosno:

$$p = p_0 + p(t) \quad \rho = \rho_0 + \rho(t) \quad (1.4)$$

Kada se pojava zvuka posmatra u vazduhu i primeni gornji izraz za pritisak, statička komponenta p_0 predstavlja atmosferski pritisak. Posmatrano u jednoj tački prostora negde ispred klipa promena pritiska u vremenu prikazana je na slici 1.11. Vidi se da se promena pritiska dešava oko njegove statičke vrednosti.



Slika 1.11 - Dijagram promene pritiska u vremenu pri pojavi zvuka u fluidu

Drugi član izraza (1.4) koji predstavlja vremenski promenljivu komponentu naziva se zvučni pritisak. Karakteristično je da čulo sluha i mikrofoni nisu osetljivi na statički pritisak, jer je on na odgovarajući način iskompenzovan. Zahvaljujući tome ovi senzori reaguju samo na vremenski promenljivu komponentu zvučnog pritiska.

U čovekovom uvu kompenzacija atmosferskog pritiska rešena je odgovarajućim anatomskim detaljima (eustahijeva tuba između srednjeg uva i usne duplje). Međutim, postoje okolnosti kada taj mehanizam ne funkcioniše, na primer zbog upale sluzokože, pa se tada javlja bol pri ronjenju jer u vodi vlada povišen statički pritisak, ili u toku leta avionom gde je pritisak nešto niži od atmosferskog.

Jedinica za pritisak je Paskal (Pa), dimenziono N/m^2 . U starijoj akustičkoj literaturi može se kao jedinica za pritisak sresti mikrobar (μb). Između Paskala i mikrobara postoji relacija $1 \text{ Pa} = 10 \mu\text{b}$. Statička komponenta pritiska u vazduhu pod normalnim uslovima je približno $p_0 = 100 \text{ kPa} = 10^5 \text{ Pa}$ (ova vrednost se kolokvijalno naziva "1 atmosfera").

Red veličine normalnih zvukova u vazduhu se kreće u širokim granicama. Najtiši zvuk koga čovečije uvo može registrovati reda je veličine 10^{-5} Pa , zvukovi normalne jačine (na primer pri normalnom govoru) su reda veličine $0,1 \text{ Pa}$, a zvukovi čiji su pritisci reda veličine 1 Pa i više spadaju u jake, odnosno veoma jake zvukove. Dakle, i za najjače zvukove u čovekovom okruženju efektivna vrednost vremenski promenljive komponente pritiska je za nekoliko redova veličine manja od jednosmerne komponente atmosferskog pritiska.

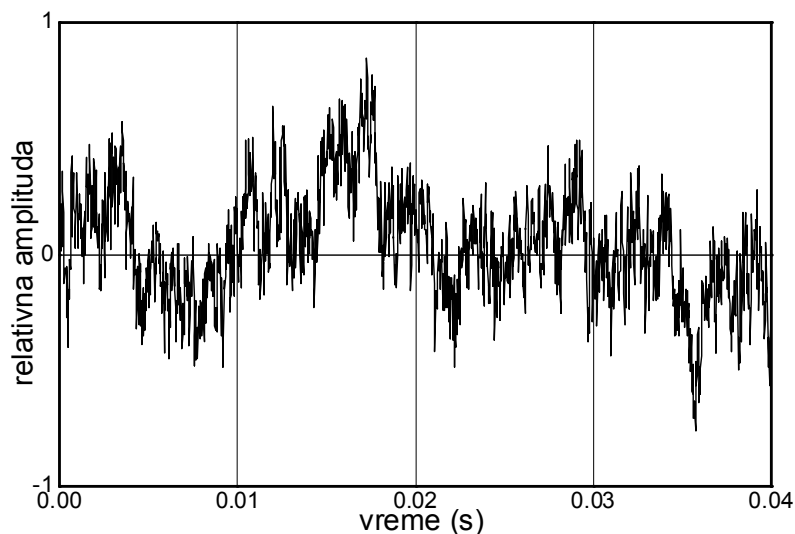
Opšte karakteristike zvučnog pritiska u vremenskom domenu

Za uobičajene zvukove u vazduhu funkcija $p(t)$ može biti veoma komplikovana, bez prepoznatljivih i ponovljivih formi. Sukscesivno ponavljanje identičnih talasnih oblika praktično se ne javlja u realnim zvukovima i u njima je nemoguće pronaći ponovljive forme. Zvuk čiste frekvencije $p(t) = p \sin(\omega t)$ je izuzetak, može se reći idealizacija, i u prirodi praktično ne postoji. Sinusni zvuk se može generisati samo veštački, koristeći elektronske generatore signala, uz stanovitu pažnju da se minimizira izvesna neumitna deformacija takvog signala u procesu njegovog pretvaranja u zvučni talas. To naravno

ne umanjuje značaj sinusnog talasnog oblika kao jedne od korišćenih idealizacija u teorijskim analizama.

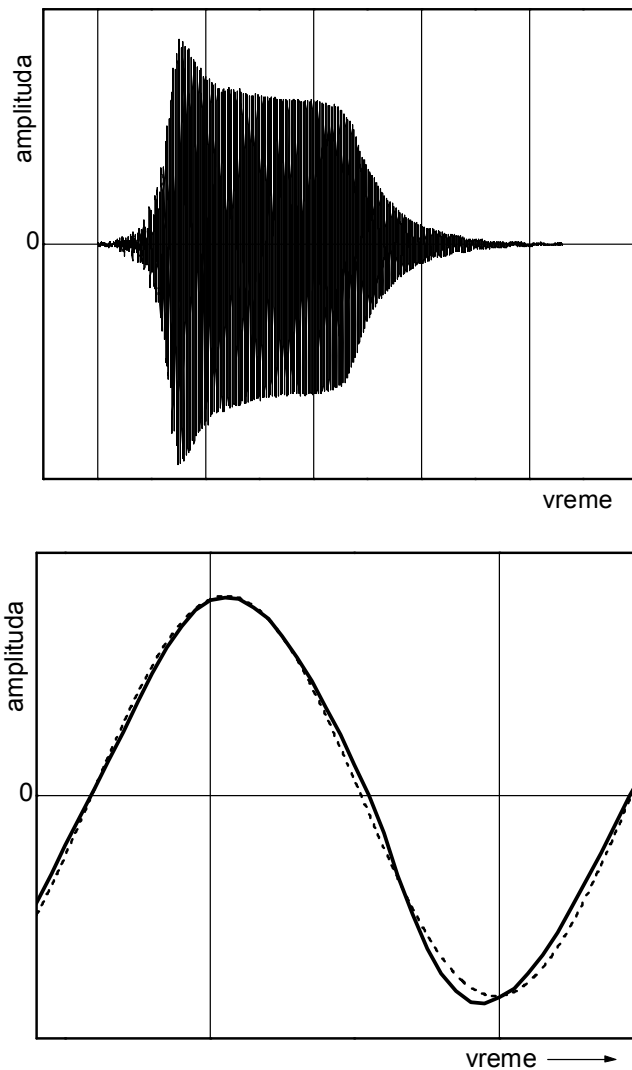
U takvim okolnostima posmatranje i analiza talasnog oblika zvučnog pritiska u vremenskom domenu ne daje mnogo informacija o zvuku. Kao mera stanja u zvučnom polju uobičajeno se posmatraju veličine dobijene različitim usrednjavanjima amplitude pritiska, kao i njegov frekvencijski sadržaj. Samo u retkim slučajevima posmatranje talasnih oblika u vremenskom domenu ima svoj smisao. Jedan takav primer je analiza impulsnih odziva akustičkih prenosnih sistema, gde se, po prirodi stvari, mnoge činjenice sagledavaju iz talasnih oblika u vremenskom domenu.

Da bi se ilustrovao problem nedovoljne informativnosti vremenskog domena pri analizi zvučnog pritiska, u nastavku su prikazana dva primera. Na slici 1.12 pokazan je jedan mali segment vremenskog oblika šuma. Jasno je da se iz ovakvog talasnog oblika ne može zaključiti ništa detaljnije o prirodi zvuka, a pogotovo ne o subjektivnom doživljaju koji će imati slušalac. Na slici 1.13 prikazan je talasni oblik jednog tona odsviranog na flauti. Prvi dijagram prikazuje čitav ton, gde se uočava njegovo vremensko trajanje i obvojnica, sa definisanim početkom i krajem. Na drugom dijagramu iste slike prikazana je jako uvećana samo jedna perioda istog signala, izvađena negde iz sredine odsviranog tona. Vidi se da ovaj talasni oblik odstupa od sinusoida, ali je vrlo teško na direktan način izvesti meru tog odstupanja. Samo promene u spektralnom domenu, koje pri tome nastaju, predstavljaju lako samerljiv podatak.



Slika 1.12 - Isečak talasnog oblika belog šuma.

Sa slike 1.13 vidi se da zvučna pojava kakav je jedan muzički ton ima karakterističnu obvojnica. Obvojnica signala može se shvatiti kao amplitudska modulacija zvučnog pritiska, i kao takva takođe predstavlja signal, u smislu kako se to posmatra u telekomunikacijama, samo znatno manjeg informacionog kapaciteta od osnovnog signala ispod obvojnice. U mnogim okolnostima kada se zvučne pojave posmatraju u vremenskom domenu, analiza se svodi samo na posmatranje obvojnice signala, a ne same funkcije $p(t)$. To je posebno korisno kao postupak u analizi signala govora i muzičkih signala. Instrumenti koji se široko koriste za merenje audio signala (takozvani modulometri) upravo imaju zadatak da približno pokazuju veličinu obvojnice zvučnog pritiska.



Slika 1.13 - Talasni oblik jednog tona odsviranog na flauti (gore) i uvećana samo jedna perioda istog zvuka, izvađena približno iz sredine odsviranog tona (dole). Isprekidano je označen talasni oblik čiste sinusoide.

Modelovanje zvučnog polja u vazduhu

Dva su uobičajena oblika predstavljanja zvučnog polja: kao vremenska promena pritiska $p(t)$ u zadatim tačkama prostora i kao prostorna raspodela pritiska $p(x,y,z)$ u nekom trenutku vremena. Zbog toga je cilj svake akustičke analize zvučnog polja utvrđivanje veličine zvučnog pritiska kao vremenske funkcije ili funkcije prostornih koordinata. To se u realnim uslovima postiže merenjem, a u fazi projektovanja predikcijom pomoću različitih matematičkih modela.

Generalno se može reći da je matematičko modelovanje zvučnog polja bremenito različitim praktičnim problemima. Posebno delikatno je modelovanje zvučnog polja u prostorijama, koje su veoma značajan oblik akustičkih prenosnih sistema u praksi. U akustičkoj teoriji je razvijeno nekoliko različitih matematičkih pristupa modelovanju takvog zvučnog polja.

Svaki pokušaj matematičkog modelovanja zvučnog polja i utvrđivanje traženih veličina $p(t)$, odnosno $p(x,y,z)$, podrazumeva uvođenje nekih ograničenja da bi se zamišljeni matematički model učinio rešivim. Takva pojednostavljenja na samom početku procesa modelovanja znače činjenicu da je tačnost napravljenog modela ograničena i zavisi od toga koliko uvedene polazne pretpostavke u posmatranom slučaju odgovaraju

realnosti. Zato svaka formula iz literature kojom se izračunava neki parametar zvučnog polja ili kojom se opisuje stanje u polju u nekim konkretnim uslovima (na primer u prostorijama) implicitno sadrži ograničenja koja definišu oblast njene važnosti i, u krajnjoj liniji, tačnost u inženjerskim aplikacijama. Ova činjenica ima veliki značaj u praksi da bi se pravilno tumačili numerički rezultati dobijeni pomoću nekog od modela.

Velika tačnost u predikciji zvučnog polja, posebno u prostorijama, u gotovo svim okolnostima teško je dostižna bez obzira na vrstu primenjenog modela. U takvim okolnostima u akustici veoma veliki značaj ima merenje, jer se jedino merenjem mogu sagledati realnosti zvučnog polja i utvrditi njegove karakteristike u svim detaljima. Mnogi elementi matematičkih modela podešavani su usaglašavanjem sa rezultatima merenja u realnom polju. Ipak, i akustička merenja imaju svoja ograničenja i neku konačnu tačnosti. Ona su, pre svega, posledica odabira parametara koji određuju vremensku i frekvencijsku rezoluciju.

Zbog svega toga neophodno je biti svestan da je tačnosti sa kojom se može ostvariti uvid u stanje zvučnog polja konačna. Broj značajnih cifara u numeričkim podacima relevantnim za analizu zvučnog polja teško premašuje tri, pa je neophodna kritičnost u preuzimanju rezultata izračunavanja, koji se po definiciji dobijaju s relativno velikim brojem cifara.