

DRAGANA ŠUMARAC PAVLOVIĆ
MIOMIR MIJIĆ

ELEKTROAKUSTIKA

Beograd 2017

Elektroakustika

Recenzent

dr Petar Parvica, redovni profesor u penziji

dr Irini Reljin, redovni profesor u penziji

dr Jelena Ćertić, docent

Izdavač

Elektrotehnički fakultet u Beogradu

ISBN 978-86-7225-064-0

SADRŽAJ

Predgovor	1
1.UVOD U AKUSTIKU	4
1.1 Pojam zvuka i njegova primena	5
Zvuk u inženjerstvu	6
Energetski i informacioni aspekt zvuka.....	7
Kratka istorija akustike.....	9
Podela akustike kao nauke danas.....	11
1.2 Zvuk kao fizička pojava	13
Zvučno polje.....	13
Zvučno polje u čvrstim telima	15
Zvučno polje u fluidima.....	17
1.3 Struktura zvučnog talasa u vazduhu.....	18
Jedan jednostavan model nastanka zvuka u vazduhu	18
Zvučni talas u vazduhu	19
Zvučni pritisak	21
Opšte karakteristike zvučnog pritiska u vremenskom domenu	22
Modelovanje zvučnog polja u vazduhu	24
2. ZVUČNI TALAS U VAZDUHU	25
2.1 Procesi u vazduhu pri pojavi zvuka	26
Promene zapremine fluida pri pojavi zvuka.....	27
Brzina oscilovanja	29
Brzina prostiranja zvučnog talasa	30
Talasne dužine zvuka u vazduhu	32
2.2 Rešavanje zvučnog polja pomoću talasne jednačine	32
Rešenje talasne jednačine za ravan talas	33
Brzina oscilovanja u ravanskom talasu.....	34
Gustina energije.....	35
Intenzitet zvuka.....	35

Rešenje talasne jednačine za sferni talas	36
2.3 Koncept impedanse u akustici.....	39
Primeri iz bilijara	39
Akustički medij kao dinamički sistem	40
Specifična akustička impedansa sredine.....	41
Specifična akustička impedansa sfernog talasa.....	42
3. ZVUČNI PRITISAK KAO SIGNAL	46
3.1 Efektivna vrednost zvučnog pritiska	47
Usrednjavanje kao konvolucija.....	48
Eksponencijalno usrednjavanje	50
Vreme integracije pri merenju efektivne vrednosti zvučnog pritiska.....	51
Krest faktor.....	51
3.2 Nivo zvuka	53
Nivo zvučnog pritiska	53
Nivo intenziteta zvuka.....	55
3.3 Karakteristike zvučnog pritiska u frekvencijskom domenu.....	55
Sabiranje spektralnih komponenti	57
Spektralna analiza sa konstantnim filtrima	58
Spektralna analiza sa proporcionalnim filtrima	58
Trodimenzionalni prikazi spektralnog sadržaja signala	63
Karakteristični spektralni oblici akustičkog signala	65
4. PRINCIPI RADA ZVUČNIH IZVORA	67
4.1 Osnovni principi rada zvučnog izvora.....	67
Fizički mehanizmi generisanja zvuka u vazduhu	68
Zvučna snaga izvora	70
Nivo zvučne snage	71
Impedansa zračenja.....	72
4.2 Tačkasti izvor zvuka (tačkasti monopol)	74
Impedansa talasa na površini pulsirajuće sfere.....	75
4.3 Izvori sa usmerenim zračenjem.....	78
Faktor smera.....	78
Izražavanje usmerenosti jednim brojem.....	80
5. SLOŽENI ZVUČNI IZVORI	84

5.1	Grupe tačkastih zvučnih izvora	84
	Zračenje grupe od dva tačkasta izvora.....	84
	Akustički dipol	86
	Grupa više tačkaskih izvora	88
5.2	Neki karakteristični oblici složenih zvučnih izvora.....	90
	Klipna membrana u beskonačnom krutom zidu.....	90
	Beskonačni linijski izvor.....	92
	Ograničavanje prostornog ugla zračenja refleksionim ravnima.....	93
	Prostorni ugao zračenja tačkastog izvora.....	93
	Tačkasti zvučni izvor na beskonačnoj krutoj ravni	94
	Tačkasti zvučni izvor na preseku dve ili tri krute ravni	95
	Slučaj realnih zvučnih izvora na beskonačnoj krutoj ravni.....	95
6.	REFLEKSIJA ZVUČNOG TALASA.....	97
6.1	Pojam slobodnog prostora	97
6.2	Procesi na ravni diskontinuiteta sredine	99
	Koeficijent apsorpcije	102
	Refleksija pri kosoj incidenciji	104
	Refleksije od neravnih površina.....	105
6.3	Zvučno polje u prisustvu refleksije.....	107
	Modelovanje refleksija	108
	Stojeći talas ispred prepreke pri normalnoj incidenciji.....	109
	Frekvencijski sadržaj zvučnog polja sa refleksijom.....	110
7.	POJAVE PRI PROSTIRANJU ZVUKA U VAZDUHU	113
7.1	Pojave u mediju	113
	Disipacija	113
	Refrakcija	118
	Refrakcija pri prelasku talasa u drugu sredinu	120
7.2	Difrakcija	121
	Difrakcione pojave na prerekama konačnih dimenzija	122
	Zaštitna funkcija akustičkih barijera	123
7.3	Doplerov efekat	125
8.	ZVUČNO POLJE U ZATVORENIM PROSTORIMA MALIH DIMENZIJA	128
8.1	Osobine zvučnog polja u prostorima malih dimenzija	129

Zatvorene komore - akustička kapacitivnost	129
Cevi i otvori - akustička induktivnost	131
Disipativne pojave u akustičkim kolima – akustička otpornost.....	133
8.2 Složenija akustička kola.....	134
Akustički rezonator	134
Bočni rezonator u zvukovodu	136
8.3 Refleksije u cevima	137
Rezonace u cevima konačne dužine	138
Rezonantne frekvencije zatvorene cevi	139
Rezonantne frekvencije cevi otvorene na jednom kraju	140
8.4 Glas kao izvor zvuka.....	140
9. OSNOVNI PRINCIPI RADA ČULA SLUHA	145
Percepcija zvuka kao proces preslikavanja.....	146
Primeri varijabilnosti procesa preslikavanja	148
9.1 Fizički deo čula sluha	149
Delovi i funkcija spoljašnjeg uva	149
Delovi i funkcija srednjeg uva	151
Eustahijeva tuba.....	153
Zaštitni efekat srednjeg uva.....	153
Delovi i funkcija unutrašnjeg uva	154
Procesi na bazilarnoj membrani	155
Kritični opsezi	156
Bark skala.....	158
Koštana provodnost	159
Oblast čujnosti zvuka	159
Granične čujnog opsega	161
Promene granice čujnosti	163
9.2 Prostorne karakteristike čula sluha	165
Blok-šema čula sluha.....	165
Glava u zvučnom polju.....	167
Mehanizam određivanja pravca nailaska zvuka – dupleks teorija.....	167
9.3. Rad uva pri kompleksnoj zvučnoj pobudi.....	171
Frekvencijsko maskiranje	171

Vremensko maskiranje	174
Efekat prvenstva	175
9.4. Osnovni pojmovi psihoakustike.....	177
Doživljaj visine zvuka – teorija položaja.....	177
Skala visine tona - Mel skala	178
Uticaj intenziteta zvuka na doživljaj visine tona.....	180
Percepcija visine zvučnih događaja složene spektralne strukture	180
Nivo glasnosti	182
Subjektivni doživljaj jačine složenih zvukova – glasnost	184
10. PERCEPCIJA GOVORA.....	186
Osobine govornog signala značajne za njegovu percepciju	186
Modulacione osobine govornog signala.....	190
Analiza auditornih događaja – auditorni tok.....	191
Koktel efekat.....	193
10.1. Ocena kvaliteta prenosa govora	194
Preciznosti primljenih zvučnih informacija – razumljivost govora	194
Degradacija govora prekrivanjem delova signala	195
10.2. Mere kvaliteta prenosa govora.....	197
Logatomska razumljivost govora	198
Indeks prenosa govora (STI)	201
11. ZVUČNO POLJE U PROSTORIJAMA.....	209
11.1 Akustički odziv prostorije	210
Impulsni odziv prostorije.....	211
Načini prikazivanja impulsnog odziva prostorije.....	215
Generalizovani oblik impulsnog odziva prostorije	217
11.2 Matematički modeli zvučnog polja u prostorijama	218
Pojam poželjnog odziva prostorije.....	221
12. STATISTIČKI MODEL ZVUČNOG POLJA U PROSTORIJAMA.....	222
12.1 Preduslovi za analizu pomoću statističke teorije	222
Direktan i reflektovan zvuk.....	223
Jednačina dinamičke ravnoteže u prostoriji.....	224
12.2 Stacionarno stanje zvučnog polja.....	224
Snaga disipacije	225

Intenzitet reflektovanog zvuka u prostoriji	227
Opadanje zvuka i vreme reverberacije.....	229
13. TALASNI I GEOMETRIJSKI MODEL ZVUČNOG POLJA U PROSTORIJAMA	231
13.1. Talasna teorija zvučnog polja u prostorijama	231
Talasna jednačina u paralelopipednoj prostoriji.....	232
Gustina rezonanci na frekvencijskoj osi	235
13.2 Geometrijski model zvučnog polja u prostorijama	238
Metoda likova	239
Rej trejsing.....	240
14. OPŠTA TEORIJA ELEKTROAKUSTIČKIH PRETVARAČA.....	244
14.1 Vrste i struktura elektroakustičkih pretvarača	244
Elektroakustički pretvarač kao sistem prenosa.....	245
Dvostepenost pretvaranja	247
14.2 Membrana kao mehanički sistem	248
Princip mehaničko - električnih analogija	249
Ekvivalentna električna šema membrane.....	251
Oblast primenjivosti modela membrane sa ekvivalentnom šemom.....	254
14.3 Sprega membrane sa akustičkim okruženjem	255
Model veze između mehaničkog i akustičkog domena	255
Primeri realni membrana i njihovih ekvivalentnih šema	257
14.4 Električno-mehaničko pretvaranje kao četvoropol	258
Elektrodinamički pretvarač	259
Elektrostatički pretvarač.....	261
15. MIKROFONI	263
15.1 Osnovne karakteristike mikrofona	263
Faktor pretvaranja – osetljivost mikrofona	264
Dinamički opseg mikrofona	265
Usmerenost mikrofona.....	268
15.2 Akustička podela mikrofona	268
Presioni mikrofon.....	268
Gradijentni mikrofon	270
Kombinovani mikrofoni.....	272
15.3 Električna podela mikrofona.....	274

Elektrostatički (kondenzatorski) mikrofoni.....	274
Elektret mikrofoni.....	276
Elektrodinamički mikrofoni.....	277
15.4 Mikrofoni velike usmerenosti.....	278
16. ZVUČNICI	283
16.1 Osnovni koncept elektrodinamičkog zvučnika	284
Odvajanje zračenja membrane sa prednje i zadnje strane	285
Snaga zračenja membrane zvučnika	287
Usmerenost zračenja membrane	289
Konstrukcija zvučnika	290
Membrana zvučnika	291
Linearizacija snage zračenja membrane	292
16.2 Osnovne karakteristike zvučnika kao pretvarača	294
Efikasnost (faktor pretvaranja).....	295
Električna snaga zvučnika	296
Impedansa zvučnika.....	297
Izobličenja.....	299
16.3 Modelovanje rada zvučnika.....	300
Ekvivalentna šema zvučnika.....	301
16.4 Složeniji zvučnički sistemi	303
Višesistemske zvučničke kutije	304
Zvučnici sa levkom.....	305
17. ZVUČNA ZAŠTITA I AKUSTIČKI KOMFOR	308
17.1 Dejstvo buke na čoveka i njegovo zdravlje.....	309
17.2 Merenje nivoa buke	312
17.3 Akustički komfor	320
Zakonska regulativa u oblasti zaštite od buke	323
17.3 Osnovni principi zaštite od buke	326
Zaštita na izvoru buke	327
Zaštita na prenosnom putu	329
Zaštita na prijemniku.....	332
17.4 Akustički komfor u zgradama	335
Principi zvučne izolacije u zgradama.....	336

17.5 Izolaciona svojstva pregrade i izolovanost	340
Zvučna izolacija jednostrukih pregrada	341
Proračun zvučne izolovanosti	348
Izražavanje izolacione moći jednim brojem	350
Merenje izolacione moći	351
Izolacija od udarnog zvuka	352
Merenje zvučne izlovanosti od udarnog zvuka	353
LITERATURA	355

Predgovor

Glavni motiv za pisanje knjige bila je želja da se konačno na jednom mestu objedine tekstovi koji su godinama nastajali iz predavanja studentima viših godina Elektrotehničkog fakulteta na predmetu Elektroakustika (predavači su autori ove knjige) – i kasnije se pojavljivali kojekuda po internetu, na sajtu katedre, anonimno, raštrkano – i sistematizuju u nešto što bi ličilo na udžbenik. Ideja je da se za svaku od oblasti koja se u knjizi obrađuje predstavi način matematičkog modelovanja fizičkih pojava, ali i inženjerski pristup u sagledavanju pojedinih problema i zadataka.

Obim gradiva izložen u ovoj knjizi u nekim segmentima prevazilazi ono što studenti u predmetu Elektroakustika treba da savladaju, no i tako knjiga predstavlja samo prvi korak u upoznavanju studenata s problematikom akustike, oblasti veoma raznovrsne i koja obrađuje vrlo raznorodne teme.

Elektroakustika je prvi predmet s kojim se studenti sreću na fakultetu a koji se bavi zvukom i njegovim različitim fizičkim i inženjerskim aspektima. Na osnovnim i master studijama Elektrotehničkog fakulteta zvuk se nakon Elektroakustike detaljnije obrađuje kroz nekoliko predmeta. To su: Audio sistemi, Osnovi govornih komunikacija, Akustički dizajn prostorija, Ozvučavanja, Obrada audio signala, Zaštita od buke i vibracija, i za sve te predmete je materija obrađena u ovoj knjizi osnov na koji se nadovezuju znanja iz pojedinih užih oblasti bavljenja zvukom.

U današnjem svetu informacije predstavljaju važan resurs, i razmena informacija među ljudima zauzima vrlo značajno mesto. Čovek ima organe kojima kontrolisano proizvodi različite zvukove (govor, muzika, zvižduk, itd.) i čulo sluha sposobljeno za prijem zvučnih informacija, njihovu obradu i dekodovanje. Ako se čovek koji kontrolisano proizvodi zvuk i njime koduje svoje misli shvati kao izvor informacija, a zvučno polje kao komunikacioni kanal, onda se komunikacija zvukom može posmatrati kao najstariji sistem za razmenu informacija koji su ljudi tokom svog razvoja osvojili.

S vremenom su razvijani brojni komunikacioni sistemi s ciljem da se obezbedi razmena informacija među prostorno udaljenim korisnicima. U raznolikim sistemima za komunikaciju koji danas postoje – bežični, žičani, internetski, satelitske veze – veliki deo ukupnog saobraćaja zauzima razmena audio i video sadržaja. To znači da na početku i na kraju svakog takvog sistema postoji zvuk, odnosno zvučno polje. Tako jedna fizička

pojava (zvuk) predstavlja početnu i krajnju tačku različitih savremenih sofisticiranih sistema za komunikaciju. Zbog toga govoriti o akustici, što je tema ove knjige, znači posmatrati celinu sastavljenu od izvora i prijemnika zvuka u zvučnom polju, to jest posmatrati jedan fizički domen koji omogućava uspostavljanje komunikacionog kanala između izvora i prijemnika, bez obzira na to da li se oni nalaze u istom ili prostornom udaljenom zvučnom polju.

Zavisno od prirode zvučnih informacija, načina njihovog nastanka i prenosa, kao i od informacionog sadržaja i uticaja na čovekov život, razvijale su se različite specifične uže oblasti akustike. Sve one počivaju na zakonitostima koje određuju rad zvučnih izvora način prostiranja i rad prijemnika zvuka.

Teorija izložena u ovoj knjizi, iako tretira zvuk kao fizički pojavu čija je priroda u osnovi mehanička, oslanja se na tri važne oblasti elektrotehnike. Prva veza sa elektrotehnikom zasniva se na postojećim analogijama u prostiranju akustičkih, odnosno mehaničkih, i elektromagnetskih talasa. To omogućava da se isti matematički modeli koriste za opisivanje obe vrste pojave, bilo da se radi o analogijama koje postoje u domenu električnih kola s koncentrisanim ili raspodeljenim parametrima. Druga veza je u načinu posmatranja sistema koji čine izvor zvuka, akustički prenosni sistem, odnosno zvučno polje, i prijemnik zvuka. U tom smislu akustički sistem prenosa predstavlja komunikacioni sistem koji se može posmatrati kao bilo koji drugi komunikacioni sistem obrađivan u elektrotehnici, s jedinom razlikom što signal koji se prenosi ostaje sve vreme u svom osnovnom, takozvanom čujnom opsegu. Treća važna oblast elektrotehnike u posmatranju zvučnih pojava danas je nezaobilazna digitalna obrada signala. Upravo je metodologija obrade i opisivanja signala koju je omogućila digitalna tehnika unela revolucionarne promene u način posmatranja zvučnih pojava. To je, dalje, omogućilo razvoj mnogih novih disciplina kao što su: obrada govornog signala, prepoznavanje i sinteza govornih i muzičkih signala, komunikacija između čoveka i mašina, itd.

Iako se bavljenje zvukom danas ne može razdvojiti od savremenih tehnologija digitalne obrade i prenosa signala, razumevanju ove važne fizičke pojave prethodi razumevanje dva važna segmenta: načina generisanja i prostiranja zvuka kroz medije i osnovnih karakteristika zvučnih informacija kao što su govor, muzika i ambijentalni zvuk. Zato su njima posvećena početna poglavљa ove knjige.

Smatrajući da je čovek najvažniji izvor i prijemnik zvučnih informacija, u nastavku knjige detaljno su izloženi svi važniji aspekti percepције zvuka, od anatomske i fiziološke karakteristika čula sluha do fenomena vezanih za procese koji u psihološkom domenu određuju osobine i granice ljudske percepције. Razumevanje procesa pretvaranja zvučnih informacija u doživljaj zvuka, dekodovanje tih informacija i formiranje zvučne slike u svesti slušaoca osnov je za razvoj specifičnih inženjerskih načina opisivanja zvuka u vremenskom i frekvencijskom domenu.

Važnu celinu u ovoj knjizi čini opisivanje načina rada elektroakustičkih pretvarača, mikrofona i zvučnika. Oni su posrednici između fizičkog zvučnog polja i sveta električnih

signala kojim se prenosi informacioni sadržaj. Pronalazak elektroakustičkih pretvarača omogućio je posmatranje, vrednovanje, obradu, prenos i zapisivanje zvučnih informacija.

Komunikacija zvukom, govorom ili muzikom ostvaruje se pre svega posredstvom zvučnog polja koje se formira u nekom prostoru gde se nalaze izvor i prijemnik zvuka. Akustika prostorija bavi se zvučnim poljem u zatvorenom prostoru, što znači matematičkim modelima za njegovo opisivanje i predikciju. U tom smislu su u akustici prostorija nezaobilazna tema savremeni softverski alati za predikciju zvučnog polja, a posebno su značajni alati koji se koriste za podešavanje akustičkog odziva prostora kako bi se on prilagodio zahtevima slušaoca. Ti zahtevi mogu ići u pravcu što vernijeg prenosa zvučnih informacija, ili ka nekoj željenoj estetici zvučne slike.

Zvuk je s vremenom postao i važna ekološka tema. Savremen način života i upotreba tehnologije u različitim domenima učinili su da je čovek izložen neželjnim zvukovima, nusproizvodom različitih ljudskih aktivnosti, saobraćaja, rada različitih uređaja, procesa, itd. Nivo neželjenog zvuka u životnoj sredini permanentno se povećava, kao i potreba da se njegov nivo kontroliše. Stoga oblast zaštite od buke postaje svakim danom sve aktuelnija tema u akustici, pa je jedno poglavlje knjige posvećeno toj temi. Obrađeni su osnovni principi zaštite od buke u spoljašnjoj sredini, zvučna zaštita u zgradama koja se bavi prenosom zvuka kroz razne građevinske elemente i sklopove, načinima proračuna, kontrole i merenja.

Zvuk će još dugo biti značajna tema u raznim inženjerskim disciplinama i aplikacijama koje će se razvijati u budućnosti. Svaka od njih će podrazumevati i neka osnovna znanja o samoj prirodi fizičke pojave zvuka i njegovoj percepciji, pa je i materija izložena u ovoj knjizi koncipirana tako da bude nezaobilazna osnova i za neke nove tehnologije koje će vreme doneti.

Dragana Šumarac Pavlović

Miomir Mijić

1.UVOD U AKUSTIKU

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 dugog perioda razvoja akustika se širila od jedne teorijske grane fizike do široke i razuđene 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 i percepcijom, 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 onih 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 različitim 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 nlike i umetnosti.

U tom pogledu je 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, iz telekomunikacija su se vremenom izdiferencirale neke 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. Značajna je činjenica da su u telekomunikacijama razvijeni teorijski alati koje je akustika preuzeila, a kojim se opisuju

akustički sistemi prenosa. Zbog toga se savremena akustika u značajnoj meri i na razne načine naslanja na teoriju telekomunikacija.

1.1 Pojam zvuka i njegova primena

Definicija koja je danas najopštije prihvaćena i koja pokriva sve pojavnne 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. Odrednica „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“ 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 prikazivanja u ovoj knjizi, 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 amorfna 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 i zvučne pojave koje su daleko od ljudske percepcije i 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 druge prirode. U subjektivnim predstavama mehanizma zračenja i prostoranja zvuka intuitivno se pribegava izvesnim analogijama. Najčešće se zvuk poistovećuje s elektromagnetskim 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 grešaka u rešavanju akustičkih problema koje nastaju zbog 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, to jest čestica koje osciluju i svojom inercijom učestvuju u pojavi kretanja, i postojanje unutrašnjih elastičnih sila koje teže da sredinu vrate u početno stanje kakvo je bilo pre pojave deformacije. Zato se mehaničke oscilacije koje čine zvuk mogu javljati u fluidima i čvrstim telima. Osnovna definicija zvuka nužno nameće zaključak da postoji razlike u načinima kako se takvi procesi zbivaju u čvrstим 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 čvrstим telima.

U životu čoveka pojava zvuka je 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 registrovati, 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 se može posmatrati kao:

- sredstvo komunikacije,
- ekološka tema i
- alatka.

Svaki od ova tri pristupa ima svoje specifičnosti zbog kojih je za bavljenje njima neophodna izvesna 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 senzorski sistem 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. U tom slučaju zvuk je preuzeo funkciju nosioca na isti način kao elektromagnetski talas u vazduhu.

Prekomerna zvučna energija svojim delovanjem može ugroziti zdravlje ljudi, pa je zbog toga zvuk postao jedan od ekoloških tema. Ugrožavanje zvukom odvija se na dva nivoa: fizičkim dejstvom na organizam, usled čega se javljaju neke organske promene, i psihološkim dejstvom, jer zvuk svojim prisustvo može nekoga uznemiravati i ometati. 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. Psihološko 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 zvog 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 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 registrovanjem zvukova koji spontano nastaju, i kada je cilj da se preko njih 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 uređaja šalje zvučni talas i zatim registruju 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, a zatim registruju refleksije od pojedinih slojeva tkiva u organizmu i tako formira slika strukture. 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 kao alatka koristi i u nekim oblastima koje su naizgled veoma daleko od akustike kao što je mikroskopija, termomašinstvo i slično.

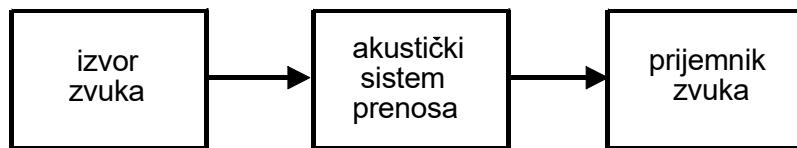
U kategoriji korišćenja zvuka kao pasivne alatke spadaju sve vrste "osluškivanja". Paradigma takve upotrebe zvuka je slušanje rada srca i pluća pomoću stetoskopa da bi se utvrdilo zdravstveno stanje tih delova organizma. Sofisticiranija verzija istog postupka je, na primer, sistem za dijagnostiku stanja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

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 sistema prenosnog 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

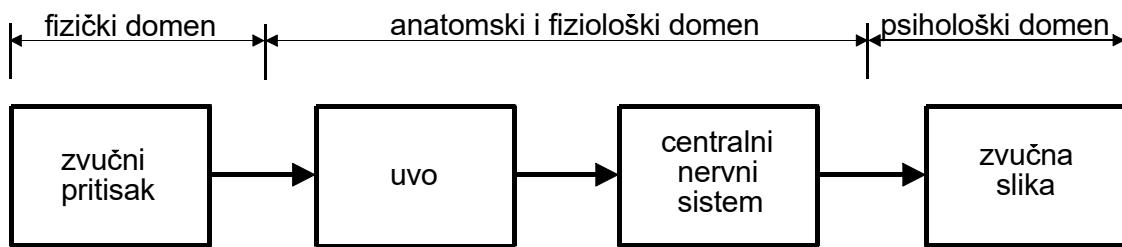
Posmatranje zvuka kao signala nameće potrebu da se u akustici primenjuje osnovna teorija telekomunikacija i teorija informacija. Predmet merenja i modelovanja su funkcije prenosa i impulsni odzivi akustičkih sistema. Time se taj deo akustike kao nauke u celini približava telekomunikacijama. Teorijski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

Nezavisno od primene teorijskih alata preuzetih iz telekomunikacija, akustika je u jednom svom segmentu direktni deo telekomunikacija, gde 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 svih vrsta, sistemi govornih komunikacija preko interneta, 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 sistema prenosa 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, to jest na odgovarajuće centre u mozgu. Odziv koji pri tome nastaje u svesti slušaoca naziva se zvučna slika, što je psihološki, dakle subjektivni odziv čoveka na jedan fizički nadražaj koji posredstvom čula sluha dolazi iz okruženja. Zbog toga se proces slušanja mora 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 jak, to jest da ima dovoljno veliku energiju, ali i da istovremeno bude razumljiv, što znači da njegov informacioni sadržaj bude očuvan i detektabilan.

Kratka istorija akustike

Istorijski 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 arhitekte i inženjera Vitruvija. Neki akustički fenomeni tada primenjeni u drevnim građevinama postali su slavnici 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 koji skreće pažnju. Taj period razvoja neki autori nazivaju doba kada je akustika bila umetnost, a zasnivala se na empirijskom znanju. Istini za volju, u nekim krajevima sveta tokom srednjeg veka umesto umetnosti to je prerastlo u obično kopiranje, bez stvarnih udubljivanja u principe i namene. Jedna ilustracija akustičkog delovanja u srednjem veku na našem tlu su akustički rezonatori izvađeni iz svodova starih srpskih crkava, prikazani na slici 1.3.



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 (uvodenje 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 akustike 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 se dešavalo pre pojave 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 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 do tada već dugo razvijale, 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 dvadesetog veka. 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 širila ka raznim oblastima nauke i života u kojima se zvuk pojavljuje kao tema. Vremenom su nastajale nove, često potpuno zaokružene discipline unutar šire oblasti akustike, pa je čitava akustika kao nauka danas postala veoma razuđena. Postoji preplitanje akustike sa tehnologijom, odnosno sa industrijom, nastajale su veze sa mnogim oblastima inženjerstva, posebno onima iz elektrotehnike, a postoji i spoj akustike sa netehničkim naukama kao što je medicina, psihologija, umetnost.

Na slici 1.4 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 na slici ima svoj kvadrant: nauke o zemlji, nauke o životu, inženjerstvo (to jest tehnologija) i umetnost. Ove četiri oblasti označene su u uglovima slike. U centru šeme nalazi se fizička akustika. To je deo akustike koji se, najkraće rečeno, bavi proučavanjem generisanja zvuka i prirodom zvuka i zvučnih pojava. Fizička akustika objašnjava nastanak zvuka i njegovo prostiranje.

Šema pokazuje da se akustika vremenom iz tog svog jezgra razvijala prema sve četiri oblasti ljudskog delovanja. U spolašnjem 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 vazdušnu sredinu, i sa fizikom tla u kome se javljaju seizmički talasi.

U srednjem koncentričnom prstenu šeme prikazane su uže oblasti akustike pozicionirane na šemi tako da se njihova polja dodiruju sa pojima 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 njene pojedine 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 нико ne može baviti akustikom u celini. Specijalizacija u pojedinim oblastima akustike sa šeme često podrazumeva potpuno raličito prethodno obrazivanje.



Slika 1.4 – Šema jedne moguće podele akustike kao nauke.

U srednjem koncentričnom prstenu šeme prikazane su 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 njene pojedine 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.

1.2 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.

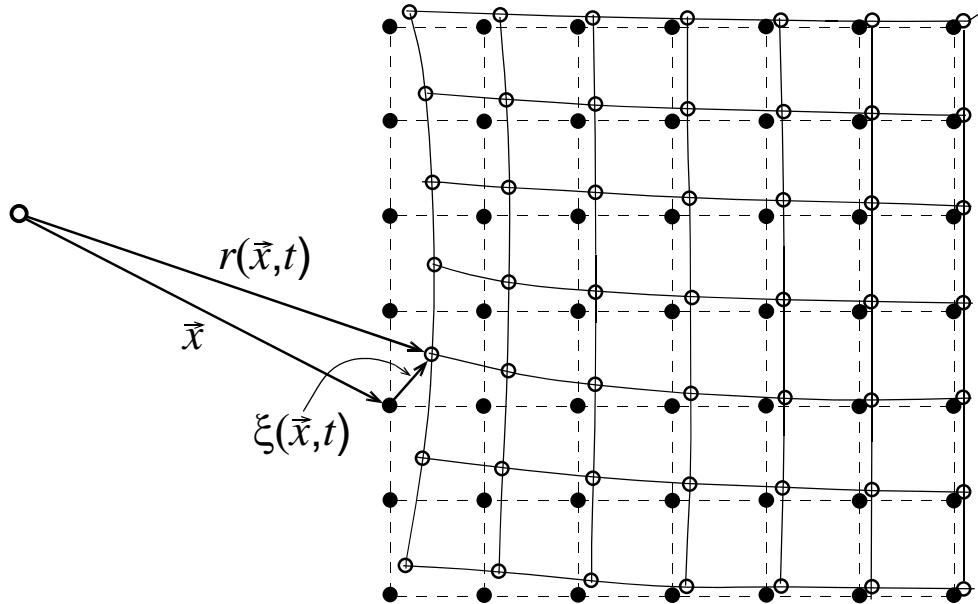
Za pojavu zvuka od značaja su mase malih delova materije koji osciluju i unutrašnje restorative sile koje teže njihovom vraćanju u ravnotežno stanje. Pod malim delovima materije podrazumevaju se molekuli ili grupe molekula koji u takvom procesu vibracija imaju jednako, odnosno združeno kretanje. Pri 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. To može biti zajednički pomeraj, brzina kretanja ili ubrzanje.

U zvučnim pojavama kakve se javljaju u čovekovom okruženju, što je predmet interesovanje u telekomunikacijama, pojavljuju se samo male deformacije, to jest vibracije veoma malih amplituda. U takvim okolnostima važe linearne zavisnosti između pobude i odziva u materijalu, 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 složeniji, a takvim pojavama se bavi takozvana nelinearna akustika.

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. Procesi 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 pojmom zvuka dat je na slici 1.5. Označen je vektor položaja \mathbf{x} jedne čestice materijala kada je u miru, i u jednom trenutku njenog kretanja usled prisustva zvuka $\mathbf{r}(\mathbf{x}, t)$.



Slika 1.5 - Šematski prikaz strukture sredine koja je pobudena zvukom sa označenim karakterističnim veličinama

Sa slike se vidi da najdirektniji pokazatelj, to jest kvantifikator zvučnog polja može biti pomeraj čestica, jer on najneposrednije definiše deformaciju materijala. Pomeraj posmatrane čestice iz tačke x u tačku $r(x, t)$ je $\xi(r, t)$. Ovako definisan pomeraj čestica je kontinualna promenljiva u prostoru i vremenu i ona definiše zvučno polje, odnosno zvuk. U opštem slučaju, pomeraj u zvučnom polju $\xi(r, t)$ 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 v 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 inženjerskoj praksi izbor veličine kojom će se kvantifikovati zvučno polje zavisi od okolnosti. Na primer, senzori zvuka u čvrstим telima najčešće rade na principima interakcije pločice piezo materijala i neke mase koja je stavljen na nju. 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 samo je stvar tehničkih okolnosti, uglavnom tehnoloških mogućnosti pretvarača za merenje.

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

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

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

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

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

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).

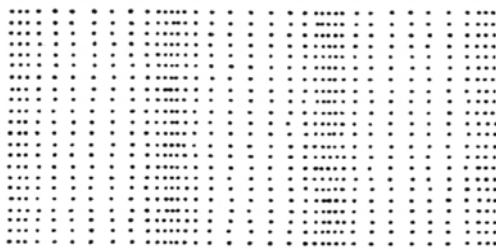
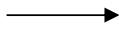
Zvučno polje u čvrstim telima

Pojave oscilovanja u čvrstим 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 talasi. 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.

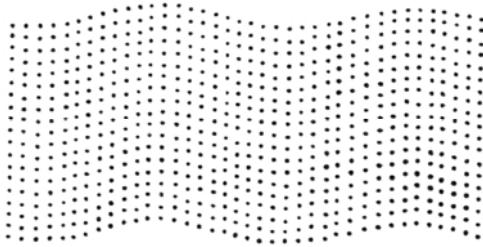
U komadima materijala kod kojih je bar jedna dimenzija relativno mala u odnosu na talasnu dužinu (ploče, šipke, žice) postoje i drugi fizički oblici zvučnih talasa. Oblici oscilovanja u njima prikazani su na slici 1.7. U pločama i šipkama mogu se javiti oscilovanja savijanjem (fleksioni talasi) ili promenom 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.

smer prostiranja zvuka

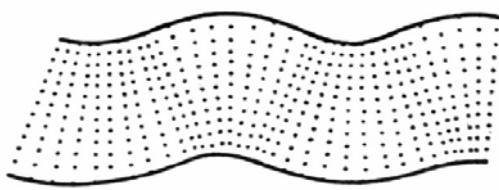


longitudinalni (kompresioni) talas

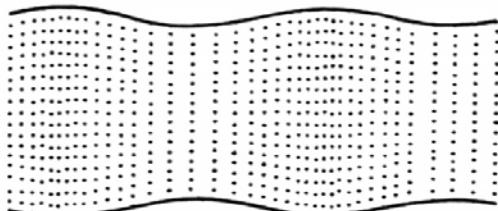


transverzalni (savijajući) talas

Slika 1.6 - Oblici oscilovanja u masivu čvrstih materijala



fleksioni talas

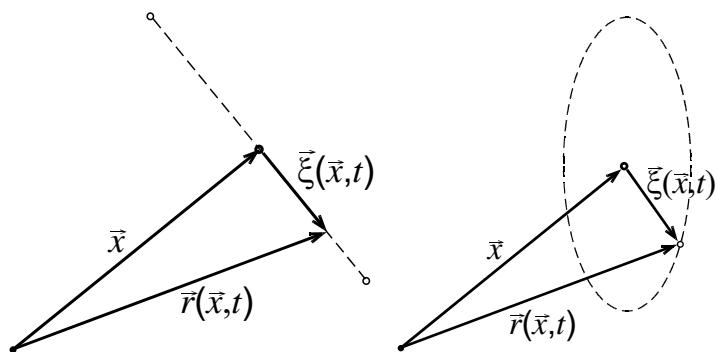


ekspanzionni talas



površinski talas

Slika 1.7 - Oblici oscilovanja u pločama i šipkama



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

Zvučno polje u fluidima

Nastanak i širenje zvuka u fluidima razlikuje se od zvuka u čvrstим 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 stavljen težiste 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 pojmom deformacije, definisana je lineranom jednačinom stanja koja povezuje tri fizičke veličine od kojih zavisi njegovo termodinamičko ponašanje:

$$p = \rho r T \quad (1.1)$$

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 srazmerna $p \sim \rho T$. 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 može posmatrati kao adijabatski proces. Da bi akustički poremećaj u fluidu bio adijabatski, uslov je da susedni elementi fluida ne smeju razmenjivati 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 pojmom 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:

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

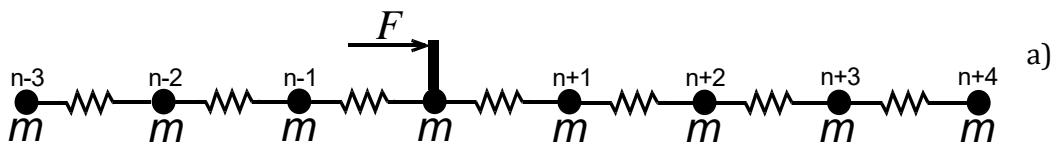
gde je γ odnos specifičnih toplota. Odavde sledi da je $p = f(\rho)$. Ovo je veoma značajna relacija linearne akustike. Za fluide koji nisu idealan gas adijabatska jednačina stanja je složenija. Takođe pri veoma visokim intenzitetima zvučne pobude uslovi za adijabatske procese prestaju da budu zadovoljeni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

1.3 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 vazdušnoj sredini. Deformacija pri pojavi zvuka nastaje zgušnjavanjem i razređivanjem, što znači promenama vrednosti pritiska i gustine koji su 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.

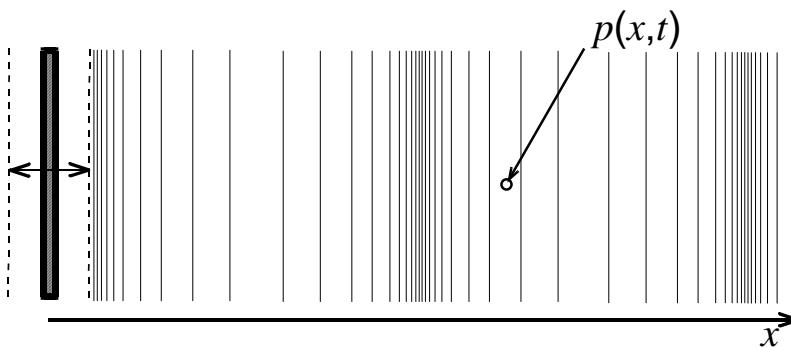


SLIKA 1.9 - Šema prenošenja impulsa na modelu sa oprugama i masama: a - početno stanje i mesto gde deluje spoljašnja sila, b) i c) - dva sukscesivna stanja sistema po prestanku pobudnog impulsa.

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 translatorno pomeranje čitavog sistema u pravcu dejstva sile, što nije zvuk već makroskopsko kretanje materije.

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

Talasni 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 manje ili više zakrivljen oblik. Da bi se u praksi generisao ravan talasni front potrebno se stvoriti izvesne preduslove (videti tekst u okviru).

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 prepostavku da je sredina homogena, pritisak, brzina i gustina neće zavisiti od položaja, odnosno od prostornih koordinata.

Osim zbog činjenice da ravan talasni front predstavlja izuzetak, primer sa slike 1.10 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 s 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 primenjivost ove ilustracije za objašnjenje nastanka zvuka u vazduhu.

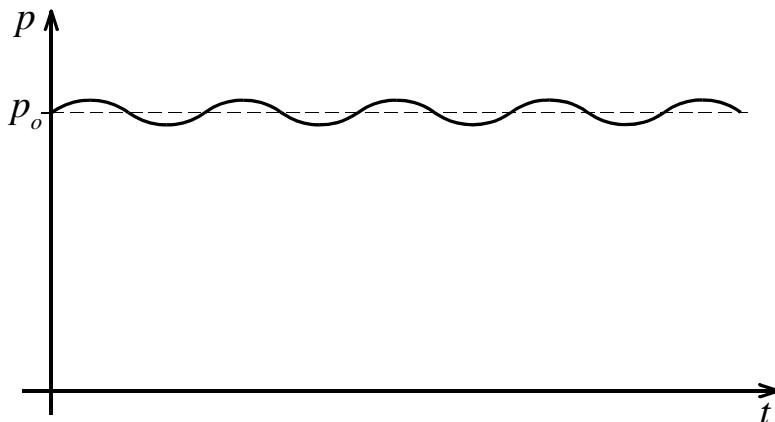
Primer problema kada se ne može prepostaviti homogenost sredine je analiza prostiranje zvuka na relativno velika rastojanja, reda više stotina metara odnosno kilometara. Na prostorima takve veličine nehomogenost vazdušne sredine je uobičajena. Na manjim rastojanjima, na primer u prostorijama kao čestom obliku sredine u kojoj 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:

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

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 u njima 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 koji su objašnjeni kasnije (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 $1 \text{ Pa} = 10 \text{ } \mu\text{b}$. Statička komponenta pritiska u vazduhu pod normalnim uslovima približno je $p_0 = 100 \text{ kPa} = 10^5 \text{ Pa}$ (ova vrednost se kolokvijalno naziva "1 atmosfera").

Red veličine zvučnog pritiska pri normalnim zvukovima u vazduhu kreće se 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.

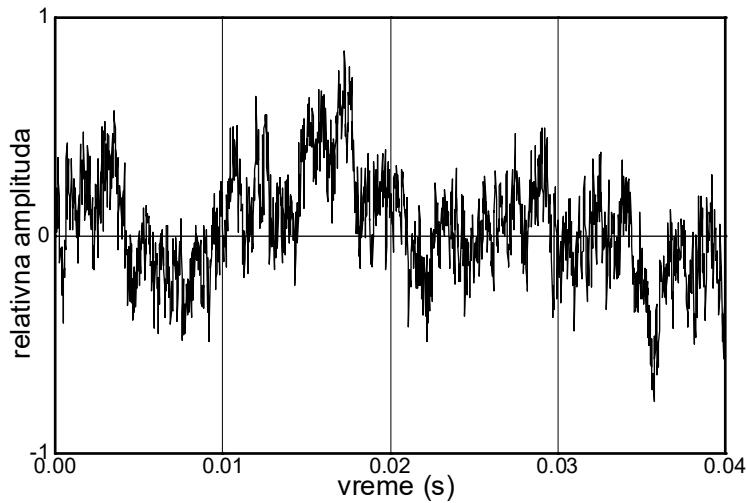
Opšte karakteristike zvučnog pritiska u vremenskom domenu

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. 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.

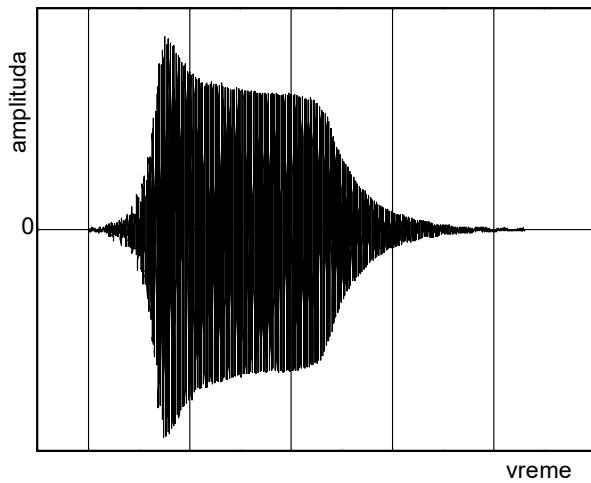
Posmatranje i analiza talasnog oblika zvučnog pritiska u vremenskom domenu ne daje mnogo informacija o zvuku. Kao mera stanja u zvučnom polju uobičajeno se posmatraju veličine dobijene različitim usrednjavanjima amplitude pritiska, kao i njegov frekvencijski sadržaj. Samo u retkim slučajevima posmatranje 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 pritika, 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 sinusoide, ali je vrlo teško na direkтан начин izvesti meru tog odstupanja. Samo promene u spektralnom domenu, koje pri tome nastaju, predstavljaju lako samerljiv podatak.

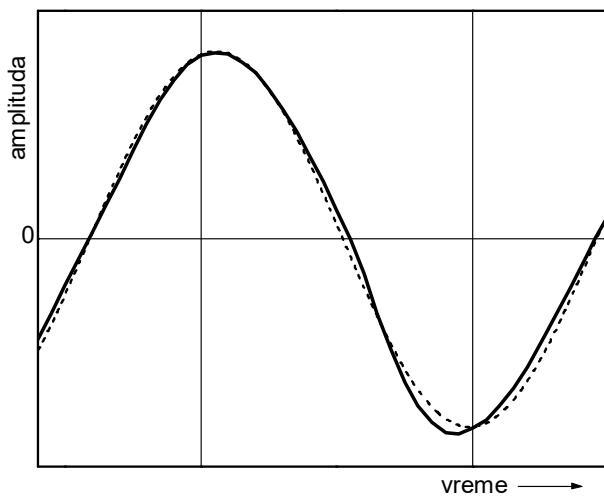
Sa slike 1.13 vidi se da zvučna pojava kakav je jedan muzički ton ima karakterističnu obvojnicu. Obvojnica signala može se shvatiti kao amplitudska modulacija zvučnog pritiska, i kao takva takođe predstavlja signal, u smislu kako se to posmatra u telekomunikacijama, samo znatno manje informacionog kapaciteta od osnovnog signala ispod obvojnica. U mnogim okolnostima kada se zvučne pojave posmatraju u vremenskom domenu, analiza se svodi samo na posmatranje obvojnica 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 zadatku da približno pokazuju veličinu obvojnice zvučnog pritiska.



Slika 1.12 - Isečak talasnog oblika belog šuma.



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 koja se može naći u literaturi 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. Ova činjenica ima veliki značaj u praksi da bi se pravilno tumačili numerički rezultati dobijeni pomoću nekog od matematičkih modela.

Velika tačnost u predikciji zvučnog polja, posebno u prostorijama, u gotovo svim okolnostima teško je dostižna bez obzira na vrstu primjenjenog 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 tačnost. Ona su, pre svega, posledica odabira parametara koji određuju vremensku i frekvencijsku rezoluciju.

Zbog svega toga neophodna je svest o tome da je tačnosti s 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.

2. ZVUČNI TALAS U VAZDUHU

Zvučni talas kao fizička pojava postoji u koordinatama prostora i vremena. Osnova svakog talasnog kretanja kakav je i zvuk jeste činjenica da prostorne i vremenske promene nisu nezavisne, već su na neki način međusobno povezane. Kad se posmatra zvuk u vazduhu te su veze definisane preko zakona termodinamike, kinematike i raznih dinamičkih uslovljenosti. Zadatak kojim se bavi akustika je nalaženje modela kojim bi se u različitim zadatim okolnostima mogao odrediti zvučni pritisak kao funkcija prostornih koordinata i funkcija vremena. U praksi se određivanje te funkcije može vršiti i merenjem.

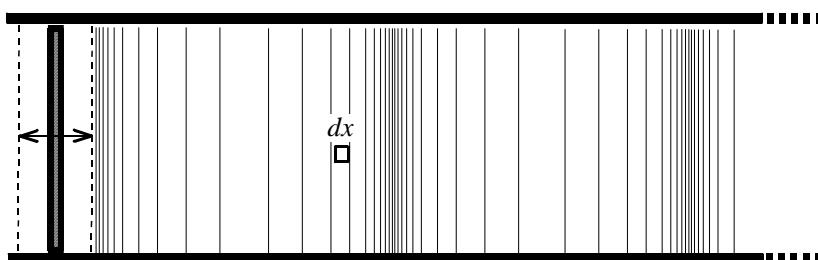
Najopštiji matematički izraz koji opisuje povezanost prostornih i vremenskih promena zvučnog polja naziva se talasna jednačina. To je po svojoj prirodi diferencijalna jednačina u kojoj figurišu prostorne i vremenske promene fizičke veličine kojom se opisuje zvučno polje. U vazduhu se pojava zvuka definiše zvučnim pritiskom, pa je u osnovnom obliku akustičke talasne jednačine promenljiva zvučni pritisak.

Teoretski gledano, uvid u stanje zvučnog polja u nekim zadatim konkretnim okolnostima može se dobiti rešavanjem talasne jednačine koja bi bila postavljena za posmatrani slučaj. Međutim, za rešavanje talasne jednačine, kao i svake druge diferencijalne jednačine, potrebno je utvrditi granične uslove. Nažalost, u gotovo svim realnim okolnostima određivanje tih granični uslova nije jednostavno, ili čak uopšte nije moguće. Zbog toga primena talasne jednačine u rešavanju praktičnih problema u zvučnom polju uglavnom nije moguća. Postoje numeričke metode, zasnovane na diskretizaciji prostora koje u nekim jednostavnijim slučajevima omogućavaju numeričko rešavanje talasne jednačine i predikciju zvučnog polja (takozvana „metoda konačnih elemenata“ i „metoda graničnih elemenata“). Nažalost, postoje ozbiljna praktična ograničenja zbog kojih se takav pristup ne može koristiti, kao na primer pri rešavanju zvučnog polja u realnim prostorijama i sličnim problemima iz inženjerske prakse.

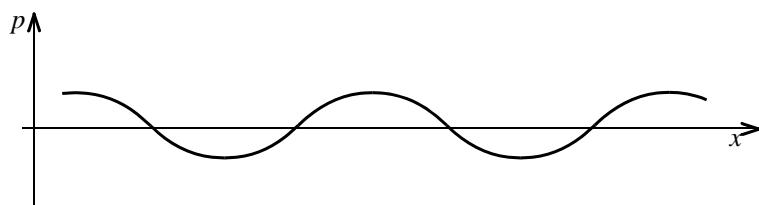
I pored toga, analitička rešenja talasne jednačine u nekim karakterističnim, dovoljno jednostavnim okolnostima imaju fundamentalni značaj za razumevanje ponašanja zvučnog talasa. Iz nje se dobijaju osnovni zakoni po kojima se odvija širenje zvuka u vazdušnom prostoru i koji su u svojoj osnovi ipak relativno jednostavni.

2.1 Procesi u vazduhu pri pojavi zvuka

Najjednostavniji slučaj zvučnog talasa je ravanski talas sa slike 1.10. On se može generisati oscilatornim kretanjem krutog klipa. Talasni front u takvom slučaju je ravan, pa se sve prostorne promene svode na jednodimenzionalni problem sa promenama duž samo jedne ose. Realna okolnost u kojoj se ravanski talas može generisati klipom u opisu prikazanom u prethodnom poglavlju tada su bile zanemarene. U realnosti talas sa slike 1.10 može se napraviti u cevi kao što je prikazano na slici 2.1. Klip se postavlja na jednom njenom kraju. Ovakva cev u kojoj nastaje zvučni talas, koji se zatim prostire duž nje, naziva se zvukovod.



Slika 2.1 - Kruti klip
u beskonačnoj cevi



Da bi se primer sa zvukovodom učino dovoljno jednostavnim i sveo na elementarne fizičke pojave, u njega se uvode razna zanemarivanja. Prvo, zanemaruju se sve pojave koje doprinose gubicima energije duž cevi. Smatra se da je cev napravljena od dovoljno masivnog materijala da bi se mogao zanemariti eventualni prolazak zvučne energije kroz zid u spoljašnju sredinu. Takva "curenje" energije unesilo bi gubitke sa aspekta zvučnog polja u cevi, što bi zvučno polje činilo složenijim. Iz istih razloga se smatra da su zidovi idealno glatki i da na njima nema trenja molekula vazduha, što bi takođe unelo gubitke energije. Dalje, prepostavlja se da je fluid u cevi homogen i izotropan (prostiranje deformacije u svim pravcima je jednako). Takođe se smatra da je u pitanju idealan gas. Ovo su sve prepostavke koje su u svim realnim praktičnim inženjerskim problemima sa zvukom u cevima zadovoljene (videti tekst u okviru). Najzad, prepostavlja se da je cev zvukovoda beskonačna, jer u realnosti završetak zvukovoda predstavlja mesto na kome se javlja refleksija talasa. Tada je zvučno polje u njemu rezultat superponiranja direktnog i reflektovanog talasa, što bi usložnjavalo stanje u polju i onemogućilo objašnjenje njegovih elementarnih osobina. Kao i u primeru sa slike 1.10, i ovde se zbog jednostavnosti ne razmatra gde se nalazi sila koja pokreće klip i odakle dolazi ta energija.

Brojne su okolnosti gde se zvukovod javlja u praktičnim aplikacijama. Može se smatrati njegovom paradigmom ona cev na starim brodovima kroz koju su se slale gorovne

komande sa kapetanskog mosta u mašinsku prostoriju. Zvukovodi su takođe i creva stetoskopa koja vezuju senzorski deo naslonjen na pacijenta i deo koji se stavlja u uši. U tehnici merenja često se koriste zvukovodi kao dodaci mikrofonima da bi se registrovalo zvučno polje u nekoj zadatoj tački kojoj mikrofon iz nekih razloga ne može da pridje. U novije vreme za neke postupke procesiranja audio signala potrebno je dobiti signale zvučnog pritiska na bumbnim opnama slušaoca. Za takve namene postoji komercijalno dostupan mikrofonski sistem kod koga se dva mala zvukovoda napravljena od plastičnih cevčica postavljaju u slušne kanale do bubne opne, a mikrofoni se poput slušalica nalaze spolja na glavi.

Procesi na površini cevi

Proces kretanja čestica vazduha u sloju koji se nalazi neposredno uz unutrašnju površinu cevi zvukovoda neumitno podrazumevaju izvesno trenje. U tom procesu od značaja je viskoznost fluida, koja definiše debljinu sloja uz cev u kome će se osećati uticaj trenja. Pri trenju deo mehaničke energije u zvučnom polju pretvara se u toplotu. To je disipativni proces zbog koga se javlja slabljenje zvučne energije koja je krenula od klipa i prostire se kroz cev. Zvučni pritisak duž cevi će zbog toga sa udaljavanjem od klipa neumitno slabiti u skladu sa slabljenjem energije zvučnog talasa.

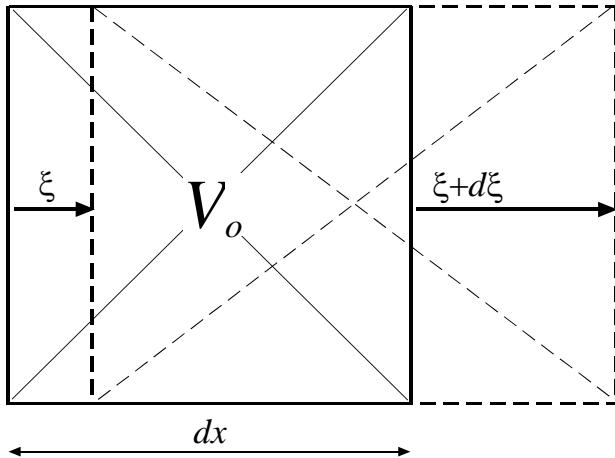
To dalje podrazumeva da više nije svejedno gde se u cevi posmatra polje. Model takvog polja postaje složeniji; parametri polja zavise od rastojanja do klipa kao izvora, odnosno funkcija su prostorne koordinate. Za prikaz osnovnih osobina zvučnog talasa, što je ovde cilj, takvo usložnjavanje nije potrebno, pa se u daljoj analizi zanemaruje svaka pojava disipacije energije na zidovima. U tom cilju, obično se kao dodatak početnim uslovima navodi da su unutrašnji zidovi cevi idealno glatki. Time se indirektno daje do znanja da se zanemaruje takav oblik disipacije.

Za mnoge praktične aplikacije zvukovoda uticaj viskoznosti i pojave disipacije na površini zidova cevi imaju samerljiv uticaj samo u veoma uskim cevima, gde značajan procenat vazdušne mase koja osciluje ušestvuje u viskoznim pojavama u graničnom sloju vazduha uz zid cevi. Takve su na primer kapilarne cevi. U svim drugim slučajevima zanemarivanje značajno olakšava analizu zvučnog talasa, a unosi zanemarljivu grešku sa aspekta praktičnih inženjerskih problema.

Promene zapremine fluida pri pojavi zvuka

Rastezanja i sabijanja u vazduhu pri pojavi zvuka simbolički je na slici 2.1 naznačeno promenama gustine linija talasnog fronta. Takve lokalne promene gustine vazduha praćene su lokalnim promenama veličine elementarnih zapremina u prostoru, poput one koja je označena na slici 2.1 i čija je dužina dx . Promena elementarne zapremine znači da se raspoloživa količina vazduha rasprostire u zapremini koja menja svoju veličinu, zavisno od faze talasa. Može se reći da su prostorne promene veličina elementarnih zapremina vazduha osnovna osobina zvučnog talasa. U primeru zvukovoda promene zapremine su jednodimenzionalne, pa se promene dešavaju samo duž x ose, ali se u opštem slučaju zvučnog polja one događaju duž sve tri koordinate.

Činjenica da postoje takve promene znači da se pojavi zvuk u vazduhu kao mediju javljaju unutrašnje sile koje pomeraju čestice gase i dovode do promene gustine. Ako se posmatra elementarna zapremina označenana slici 2.1 sile deluju na njene stranice sabijajući je i rastežući. Svaka takva sila posledica je pojave prostorne promene pritiska, odnosno pojave gradijenta pritiska koji se javlja usled nastalih deformacija. Taj gradijent nastaje usled različitih gustina susednih elementarnih zapremina vazduha.



Slika 2.2 - Šematski prikaz promene jednog elementa zapremine vazduha u cevi sa slike 2.1 pri pojavi zvuka (u jednodimenzionalnom ravnom talasu).

Posmatrani element zapremine sa slike 2.1 šematski je prikazan na slici 2.2. U mirovanju, što znači kada nema zvuka, njegova zapremina je V_0 i dužina dx . Pri pojavi zvuka dolazi do pomeranja ovog elementa i deformacije njegove veličine, što u ovom jednodimenzionalnom slučaju znači deformaciju dužine. Na slici je to predstavljeno kao rastezanje, ali to treba shvatiti algebarski jer se rastezanja i sabijanja smenjuju u vremenu. U segmentu vazduha sa slike moguće je uspostaviti relaciju između vrednosti pritiska u njemu i veličine deformacije. Za fiksnu masu gase m koja u mirovanju zauzima zapreminu V_0 važi relacija:

$$m = \rho_0 V_0 \quad (2.1)$$

Kada se u vazduhu javi zvuk, pri malim promenama elementarne zapremine dV u njoj se menja gustina za $d\rho$, pa relacija (2.1) postaje:

$$m = (\rho_0 + d\rho)(V_0 + dV) \quad (2.2)$$

Izjednačavajući desne strane izraza (2.1) i (2.2) dobija se da je relativna promena gustine:

$$\frac{d\rho}{\rho_0} = -\frac{dV}{V_0} \quad (2.3)$$

ili u obliku:

$$d\rho = -\rho_0 \frac{dV}{V_0} \quad (2.4)$$

Odnos dV/V_0 definiše lokalne promenu zapremine pri pojavi zvuka. Znak minus u izrazu (2.3) i (2.4) pokazuje da je smer promena zapremine i gustine suprotan, odnosno da povećavanje zapremine znači smanjenje gustine.

Ranije je pokazano da je u fluidima $p = f(\rho)$, što je određeno jednačinom stanja. Odatle proizilazi da promena gustine usled kompresije ili ekspanzije elementarne zapremine proizvodi i promenu lokalnog pritiska u njoj. Relacije (2.3) i (2.4) definišu elastična svojstva vazduha koja su osnov za pojavu zvuka. Veličina promene odnosa dV/V_0 , u slučaju sa slike 2.2 to je rastezanje, direktno određuje i promenu gustine, a time i pritiska. Prema jednačini stanja zavisnost sa negativnim predznakom postoji i između promene zapremine i promene pritiska.

Brzina oscilovanja

Druga veličina osim pritiska kojom se u vazduhu može opisivati stanje u zvučnom polju je brzina oscilovanja čestica. Primena Njutnovog zakona ($F = ma$) na procese u fluidima omogućava da se definiše odnos brzine oscilovanja čestica prema ostalim veličinama u zvučnom polju. Sila koja deluje na česticu i čini da se ona kreće posledica je postojanja gradijenta pritiska duž prostorne koordinate. Ubrzanje te čestice je izvod brzine po vremenu, pa Njutnov zakon primenjen na deformacije u vazduhu ima oblik:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.5)$$

Ova relacija se naziva Ojlerova jednačina i poznata je iz fizike fluida. Uvedeni su parcijalni izvodi jer su pritisak i brzina funkcije i prostorne koordinate i vremena. Upoređujući formu ove jednačine sa osnovnim izrazom Njutnovog zakona vidi se da postoji jasna analogija. Predznak minus znači da će pri pozitivnom gradijentu pritiska ubrzanje biti negativno, što znači da lokalno zgušnjavanje vazduha i povećanje pritiska povlači za sobom kočenje čestica u oscilovanju, to jest smanjenje brzine.

Osnovni značaj Ojlerove jednačine za akustiku je da se iz nje može odrediti brzina oscilovanja čestica koja prati postojeći zvučni pritisak:

$$v = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial x} dt \quad (2.6)$$

To znači da se stanje u zvučnom polju može kvantifikovati pritiskom ili brzinom. Pritisak je veličina koja se može meriti, a i matematička modelovanja koja se primenjuju u praksi imaju za cilj određivanje veličine pritiska. Ojlerova jednačina omogućava da se u takvim okolnostima izračuna i brzina oscilovanja molekula vazduha.

Izraz (2.5) je Ojlerova jednačina u jednodimenzionalnom prostoru. Ako se ona proširi na trodimenzionalni prostor postaje:

$$\text{grad } p = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.7)$$

Ovakva jednačina predstavlja opšti slučaj odnosa pritiska i brzine. U nekim jednostavnim formama zvučnog polja, koji će biti prikazani u nastavku, relacija između njih se pojednostavljuje.

Brzina prostiranja zvučnog talasa

Pitanje brzine prostiranja zvučne pojave, odnosno zvučnog talasa, kroz prostor predstavlja poseban aspekt inženjerske akustike zbog njene relativno male vrednosti. Konačnost brzine kretanja zvučnih talasa dostupna je ljudskim čulima. U tom smislu poznata je dečija zabava utvrđivanja vremenske razlike između trenutka stizanja bljeska groma i stizanja zvuka grmljavine.

U idealnim gasovima pri adijabatskim procesima brzina prostiranja zvuka je:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} \quad (2.8)$$

gde je γ odnos specifičnih toplota:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.9)$$

Gustina vazduha u stacionarnom stanju približno je $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$ (pri normalnom atmosferskom pritisku na nivou mora). Pošto se sa aspekta zvučnih pojava vazduh sa dovoljnom tačnošću može smatrati idealnim gasom, za brzinu zvuka u njemu može se primeniti gornji izraz. Za većinu gasova odnos p_0/ρ_0 je nezavistan od pritiska, pa se brzina ne menja sa uobičajenim promenama barometarskog pritiska (naravno, u granicama realnih promena pritiska u čovekovom okruženju).

Na 0°C i na normalnom atmosferskom pritisku brzina zvuka u vazduhu je $c_0 = 331,6 \text{ m/s}$. Zamenom iz jednačine stanja (1.1) u izraz (2.8) dobija se da je brzina prostiranja zvuka:

$$c = \sqrt{\gamma r T} \quad (2.10)$$

Dakle, brzina zvuka u vazduhu srazmerna je drugom korenu temperature. Zamenom se dobija:

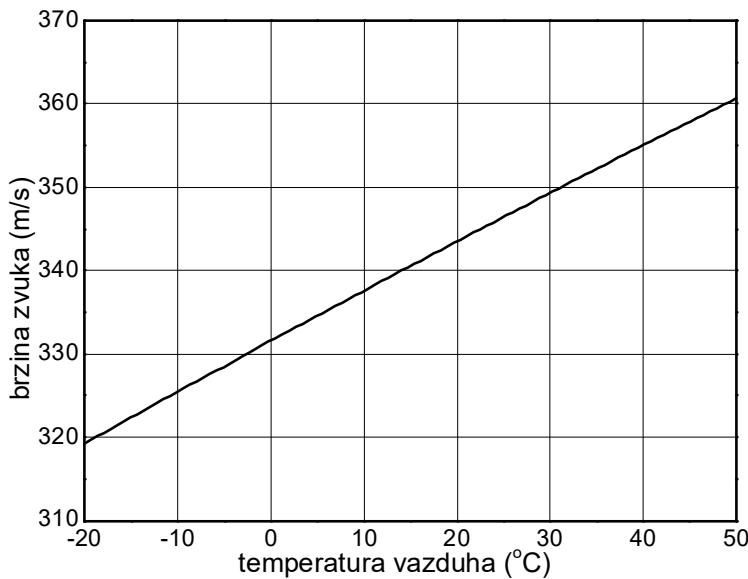
$$c = c_0 \sqrt{\frac{T}{273}} \quad (2.11)$$

Razvijanjem ovog izraza u Tejlorov red oko tačke $c = c_0$ i zanemarivanjem članova višeg reda dobija se jedan praktičan izraz za brzinu zvuka u vazduhu:

$$c = c_0 + 0,6\theta \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (2.12)$$

Ovaj izraz jasnije pokazuje u kojoj se meri brzina zvuka kvantitativno menja sa temperaturom. Svaki stepenom promene temperature vazduha brzina zvuka u njemu menja se za oko 0,6 m/s.

Na slici 2.3 grafički je prikazana promena brzine zvuka u vazduhu u opsegu promene temperature koji okvirno definiše životni ambijent čoveka (posmatrano od -20 do +50 C). Kriva je nacrtana na osnovu izraza (2.11). Vidi se da u ovakovom rasponu temperatura zakrivljenost kao posledica drugog korena nije uočljiva, već je zavisnost skoro linearna. To pokazuje da se dovoljno tačno može koristiti aproksimativni izraz (2.12). Sa dijagrama se takođe vidi da u opsegu normalnih sobnih temperatura brzina zvuka može imati vrednosti 340-350 m/s. U numeričkim problemima uobičajeno se vrši zaokruživanje usvajajući da je brzina zvuka 340 m/s. Greška koja se pri tome pravi dovoljno je mala da nema značaja u praksi.



*Slika 2.3 - Dijagram promene
brzine u vazduhu u opsegu
temperatura koje se mogu javljati
u životnoj sredini, nacrtan na
osnovu izraza (2.11)*

Konačnost brzine zvuka stvara određenu kategoriju praktičnih problema oko kojih su se zbog složenosti vremenom formirale neke od posebnih podoblasti akustike. Karakterističan primer su ozvučavanje i akustika prostorija, gde su čitave tehničke discipline zasnovane na problemu konačnog vremena putovanja zvuka od izvora do slušaoca. Kada bi se zvučni talas kretao velikom brzinom, poput elektromagnetskih talasa, karakteristični problemi ozvučavanja bi nestali, a takođe bi se promenila čitava filozofija akustičkog dizajna prostorija (na primer, sale za razne namene).

Talasne dužine zvuka u vazduhu

Opseg frekvencija zvuka koje su značajne za čoveka određen je mogućnostima percepcije čula sluha. Ovaj opseg je nominalno od 20 Hz do 20 kHz. To je veoma širok opseg, veličine tri dekade. Posledica toga je isto tako širok opseg talasnih dužina koje se javljaju u zvučnom polju koje u vazduhu okružuje čoveka. Talasna dužina je po definiciji:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.13)$$

gde je c brzina prostiranja talasa, a f frekvencija. Veličine talasnih dužina u vazduhu za neke karakteristične frekvencije prikazane su u tabeli 2.1. Tako veliki interval talasnih dužina koje se istovremeno javljaju u zvučnom polju, koji je u čujnom opsegu ljudskog uva u rasponu 1:1000, nema ni jedna druga inženjerska disciplina koja se bavi talasnim pojavama. Na primer, najširi frekvencijski opseg u radiotehnici je u srednjetalasnom području, a on je samo 1:3 (od 500 kHz do 1500 kHz). U ostalim oblastima taj interval je još uži. Ta činjenica je uzrok nekih specifičnosti akustike koje nisu svojstvene drugim oblastima elektrotehnike.

Tabela 2.1 - Talasne dužine zvuka u vazduhu

frekvencija	20 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz
talasna dužina	17 m	3,4 m	34 cm	3,4 cm	1,7 cm

Inrerakcija talasa sa preprekom zavisi, između ostalog, od odnosa talasne dužine i dimenzija te prepreke. Zbog toga je odnos veličine talasnih dužina zvuka i dimenzija realnih prepreka koje se javljaju u zvučnom polju od velikog značaja za fizičke procese pri prostiranju. Iz vrednosti pokazanih u tabeli 2.1 jasno je da će sredina zvučnih talasa koji kreću iz jednog izvora biti veoma različita na najnižim frekvencijama, gde su talasne dužine reda metara, i na najvišim frekvencijama, gde su talasne dužine reda centimetara.

2.2 Rešavanje zvučnog polja pomoću talasne jednačine

Matematički izraz koji povezuje prostorne i vremenske promene zvučnog polja naziva se talasna jednačina. Ona može imati razne forme u zavisnosti od prirode talasnog kretanja, tipa primenjenih koordinata i prirode medija. U akustici talasna jednačina za jednodimenzionalni slučaj ravanskog zvučnog talasa u vazduhu, poput onoga sa slike 2.1, ima formu:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (2.14)$$

Ona povezuje vremensku i prostornu promenu pritiska. U ovom izrazu c je konstanta proporcionalnosti, i to je brzina prostiranja zvuka. Primenjivost talasne jednačine ogleda se u tome da se njenim rešavanjem u nekim posmatranim okolnostima može odrediti

zvučni pritisak kao funkcija vremena i prostornih koordinata $p(x,t)$. Ako se jednodimenzionalna talasna jednačina, definisana izrazom (2.14), proširi na trodimenzionalni prostor, dobija se oblik:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p \quad (2.15)$$

Postupak rešavanja talasne jednačine u praksi podrazumeva utvrđivanje graničnih uslova koji važe u datim okolnostima za sve granične površine u zoni gde postoji zvučno polje. U realnim okolnostima problem nastaje zbog toga što je, po pravilu, u većini slučajeva te granične uslove nemoguće pouzdano i precizno odrediti. Zato samo u nekim veoma jednostavnim slučajevima postoji njen elegantno analitičko rešenje. Na tržištu postoje softverski paketi koji koji to rešavanje obavljaju numerički, na osnovu diskretizacije prostora u kome postoji zvučno polje. Takav postupak se naziva metoda konačnih elemenata. Međutim, problem određivanja graničnih uslova ostaje i u numeričkom pristupu, zbog čega on, uz veoma zahtevne numeričke procedure, ima vrlo ograničenu praktičnu primenu u rešavanju zvučnog polja.

Iako talasna jednačina nije direktno primenljiva u inženjerskoj praksi kao sredstvo za rešavanje zvučnog polja u opštem slučaju, njen značaj u akustici ogleda se u tome što se pomoću nje mogu jasno pokazati neke osnovne zakonitosti prostiranja zvučnih talasa. Postoje dva idealizovana slučaja, odnosno pojednostavljena oblika zvučnih talasa, za koje je moguće jednostavno analitički rešiti talasnu jednačinu. To su ravan i sferni talas.

Rešenje talasne jednačine za ravan talas

U ravanom talasu sve promene karakterističnih veličina dešavaju se samo duž jedne koordinate, kao što je to u slučaju prikazanom na slici 2.1. Zato rešenje jednodimenzionalne talasne jednačine, prikazane izrazom (2.14), definiše ravan talas. Njen opšte rešenje ima oblik:

$$p = p_o \varphi(t \pm \frac{x}{c}) \quad (2.16)$$

Ovde je p_o konstanta koja ima dimenziju pritiska, a φ je proizvoljna funkcija koja definiše promenu pritiska duž x ose. Argument ove funkcije pokazuje da se raspodela pritiska u funkciji prostorne koordinate pomera u vremenu. Negativan znak definiše kretanje talasa u pozitivnom smeru, a pozitivan znak u negativnom smeru x ose. U postupku rešavanja jednačine smatra se da nema dodatnih procesa koji bi uvodili gubitke (dissipaciju) i koji bi uticali da zvučni pritisak slabi duž koordinate x .

Poseban slučaj u rešavanju talasne jednačine je kada se prepostavi sinusoidalna promena pritiska, odnosno kada se spektralna funkcija zvuka svede na jednu diskretnu liniju. Opšte rešenje talasne jednačine tada ima oblik:

$$\underline{p}(x,t) = \underline{p}(x)e^{j\omega t} \quad (2.17)$$

Tada je:

$$\frac{d^2 \underline{p}(x)}{dx^2} + k^2 \underline{p}(x) = 0 \quad (2.18)$$

Ovde je k fazna konstanta (koristi se i termin fazni koeficijent) i ona je:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.19)$$

Rešenje jednačine (2.18) ima oblik:

$$\underline{p}(x) = \hat{p}_+ e^{-jkx} + \hat{p}_- e^{jkx} \quad (2.20)$$

Za sinusoidalnu promenu pritiska konačno rešenje talasne jednačine za ravanski talas je:

$$\underline{p}(x, t) = \hat{p}_+ e^{j(\omega t - kx)} + \hat{p}_- e^{j(\omega t + kx)} \quad (2.21)$$

Prvi član s desne strane predstavlja pozitivan, odnosno progresivan talas koji se kreće u smeru x ose, a drugi član je negativan, odnosno reflektovani talas koji se kreće u suprotnom smeru. Ako u polju postoji samo progresivan talas, kao što je to pretpostavljeno u cevi sa slike 2.1, desna strana izraza (2.21) se pojednostavljuje. Tada se rešenje talasne jednačine može prikazati u njenom osnovnom obliku:

$$p = \hat{p} \cos(\omega t - kx) \quad (2.22)$$

Ovaj izraz predstavlja vezu prostornih i vremenskih promena sinusoidalnog ravanskog talasa, poput onoga sa slike 2.1.

Brzina oscilovanja u ravanskom talasu

Kod ravanskog talasa moguće je relativno jednostavno odrediti brzinu oscilovanja čestica v . Iz Ojlerove jednačine rešenje po v za ravanski talas je:

$$\underline{v} = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial x} dt \quad (2.23)$$

Podazumevajući da je polje sinusno promenljivo, rešenjem gornjeg izraza dobija se da je:

$$\underline{v} = j \frac{1}{\rho \omega} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{k}{\rho \omega} \hat{p} e^{j(\omega t - kx)} = \frac{1}{\rho c} p \quad (2.24)$$

jer je $k = \omega/c$. Iz ovoga se vidi da su pritisak i brzina oscilovanja u slučaju ravnog talasa u fazi jer je njihov odnos realna konstanta:

$$\frac{p}{\underline{v}} = \rho c \quad (2.25)$$

S obzirom na poznate vrednosti ρ i c , u vazduhu ova konstanta na sobnoj temperaturi i pri normalnom pritisku ima približno vrednost 410 kg s/m^2 (sa razumnim zaokruživanjem). Zaključak je da u ravanskim talasima nije potrebno posmatrati parametre polja u kompleksnom obliku, čime se značajno pojednostavljuje analiza.

Rešenje talasne jednačine za ravan talas pokazuje da su u njemu pritisak i brzina u fazi. Upravo ta činjenica predstavlja osnovnu karakteristiku ravnog talasa, a ne geometrija njegovog talasnog fronta. Moguća su i odstupanja talasnog fronta od idealne ravni, pa da talas ima fizičke karakteristike ravnog talasa ako su u njemu pritisak i brzina u fazi. Iz odnosa pritiska i brzine još sledi da u tačkama gde je pritisak veći od statičkog vektor brzine ima smer koji se poklapa sa smerom prostiranja talasa.

Gustina energije

Postoje okolnosti kada je potrebno kvantitativno sagledati energetsko stanje u zvučnom polju, pa je zbog toga u akustici, osim zvučnog pritiska, neophodno imati i neki odgovarajući kvantifikator energije. Ukupna energija u zvučnom polju, to jest u prostoru pobjuđenom zvukom, uobičajeno se označava sa W . Međutim, podatak o ukupnoj energiji koja postoji u celokupnom zvučnom polju nije predmet interesovanja, pogotovo u okolnostima kada je taj prostor veliki. Zbog toga je uobičajeno da se energetsko stanje u polju posmatra preko gustine energije kao lokalnog pokazatelja energetskog stanja. Gustina zvučne energije u mediju, tj energija po jedinici zapremine, po definiciji je:

$$E = \frac{dW}{dV} \quad (2.26)$$

gde je W zvučna energija u prostoru polja a V zapremina tog prostora. Gustina energije je po pravilu funkcija prostornih koordinata, mada postoje i specifične, mada retke okolnosti kada ona u nekom posmatranom prostoru može biti približno konstantna.

Energija u zvučnom polju uvek ima dve svoje komponente: kinetičku energiju čestica fluida u kretanju i potencijalnu energiju lokalno komprimovanog fluida. Zbog toga gustina zvučne energije ima svoju kinetičku i potencijalnu komponentu:

$$E = E_{pot} + E_{kin} \quad (2.27)$$

U ravnom talasu potencijalna i kinetička energija međusobno su jednake. Bez izvođenja posebnog dokaza može se reći da je u ravanskom talasu gustina energije:

$$E = \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (2.28)$$

Intenzitet zvuka

Zvučna energija se nalazi u kretanju kroz medij, odnosno prenosi se zvučnim talasom kroz prostor. Za opisivanje takve pojave pogodno je uvesti neku meru koja bi imala

prirodu fluksa, i koja bi pokazivala protok energije po površini talasnog fronta. Ovakva veličina naziva se intenzitet zvuka i za njega se koristi oznaka J . To je, po definiciji, energija koju zvučni talas nosi u jedinici vremena kroz jediničnu površinu talasnog fronta:

$$J = Ec \quad (2.29)$$

Intenzitet je dimenziono [W/m^2].

Intenzitet zvuka je po svojoj prirodi vektorska veličina, jer postoje definisani pravac i smer prostiranja zvučne energije. Vektor intenziteta \vec{J} orijentisan je u pravcu prostiranja zvučnog talasa normalno na površinu talasnog fronta. Bez izvođenja posebnog dokaza intenzitet zvuka je:

$$\vec{J} = \overline{p\vec{v}} \quad (2.30)$$

Intenzitet zvuka je definisan kao vremenska srednja vrednost proizvoda pritiska i vektora brzine. Iz osnovne definicije intenziteta proizilazi da je zvučna snaga koju nosi talas na nekoj površini talasnog fronta vektorski proizvod intenziteta i vektora površine:

$$P_a = \vec{S} \vec{J} \quad (2.31)$$

Za slučaj ravanskih talasa pravac prostiranja talasa i pravac vektora brzine se poklapaju, a takođe pritisak i brzina su u fazi. Tada je intenzitet:

$$J = pv = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.32)$$

Iz elektrotehnike je poznato da kada napon i struja nisu u fazi definiše se aktivna i reaktivna komponenta snage. Analogno tome, kada u zvučnom polju pritisak i brzina nisu u fazi u kretanju zvučne energije može se definisati aktivna i reaktivna komponenta. Zbog toga i trenutni intenzitet zvuka, kao veličina koja pokazuje fluks zvučne snage, ima svoj aktivni i reaktivni deo. Kada pritisak i brzina u zvučnom polju nisu u fazi brzina se može razložiti na komponentu koja je u fazi sa pritiskom i komponentu koja je sa pritiskom u kvadraturi. Aktivna komponenta intenziteta je, shodno izrazu (2.30), funkcija komponente brzine koja je u fazi sa pritiskom. Njena srednja vrednost u vremenu je različita od nule i ona pokazuje lokalni transport energije talasom. Srednja vrednost u vremenu reaktivne komponente intenziteta je nula i pokazuje lokalni oscilatorni transport energije koja u procesu prostiranja zvuka ne ide dalje u prostor.

Rešenje talasne jednačine za sferni talas

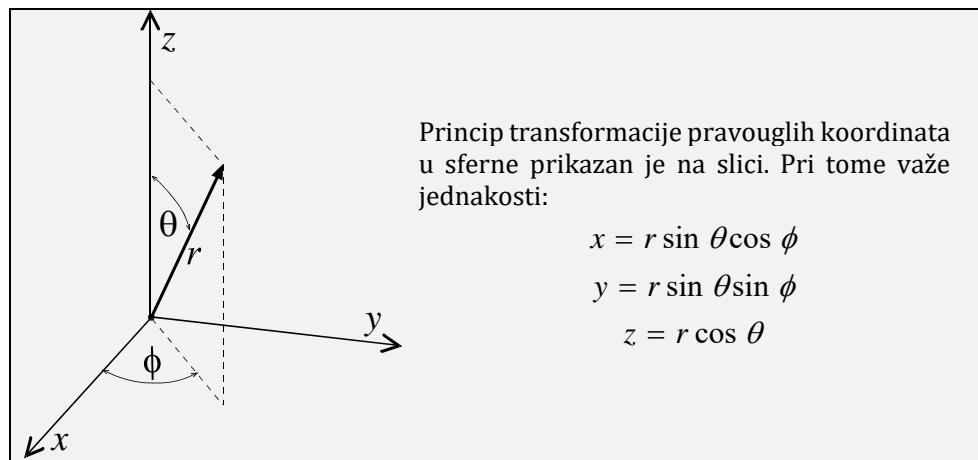
Sferni talas je, kao i ravanski, jedna idealizacija prostornog oblika zvučnog talasa. Sferni talas podrazumeva da se širenje akustičke pojave od izvora odvija sa talasnim frontom

koji ima oblik sfere, gde je u centru izvor zvuka. Ova idealizacija takođe podrazumeva neograničeni fluidni medij, što znači da u prostoru ne postoji reflektovani talas.

Za opisivanje sfernih talasa takođe se polazi od osnovne talasne jednačine definisane izrazom (2.15). Zbog sferne simetrije problema uvodi se transformacija pravouglih koordinata u sferne (ova transformacija je radi podsećanja prikazana u okviru). Zamenom i sređivanjem dobija se oblik talasne jednačine za sferne talase:

$$\frac{\partial^2(\underline{pr})}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2(\underline{pr})}{\partial r^2} \quad (2.33)$$

Vidi se da u formalnom smislu nema principijelne razlike između ove jednačine u sfernim koordinatama i jednačine za ravanski talas ako se proizvod pr shvati kao nova promenjiva.



Za slučaj sinusoidalnih promena bez refleksija rešenje jednačine (2.33) ima oblik:

$$\underline{pr} = \underline{A} e^{j(\omega t - kr)} \quad (2.34)$$

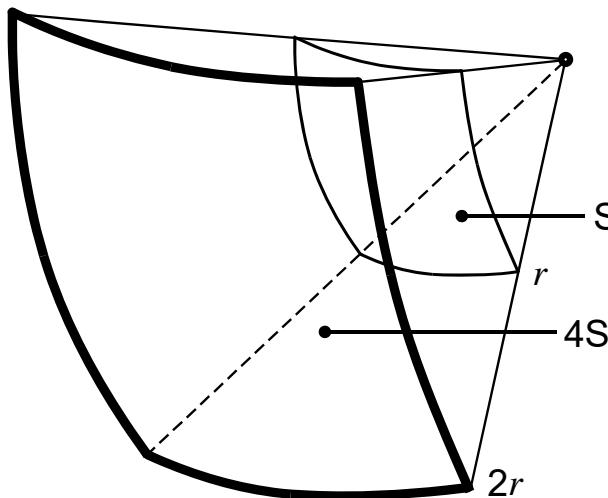
pa je pritisak:

$$\underline{p} = \frac{\underline{A}}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (2.35)$$

gde je A kompleksna amplituda.

Odavde proizilazi osnovna karakteristika sfernog talasa: proizvod pritiska i rastojanja je konstantan, pa zvučni pritisak u sfernem talasu opada sa povećanjem rastojanja. To je osnovni zakon koji definiše slabljenje pritiska u sfernem zvučnom talasu pri udaljavanju od izvora. Smanjenje pritiska sa rastojanjem posledica je činjenice da se udaljavanjem od izvora povećava površina talasnog fronta na kojoj se raspodeljuje izračena količina zvučne energije. Shodno izrazu (2.35) u sfernem talasu zvučni pritisak slabi linearno sa rastojanjem. Ovakva zakonitost slabljenja naziva se "zakon 6 dB", jer pri udvostručavanju rastojanja od izvora smanjenje pritiska dva puta odgovara umanjenju njegove vrednosti za 6 dB.

Povećavanje površine talasnog fronta sazmeno je kvadratu rastojanja od izvora. Ova činjenica je ilustrovana na slici 2.4. Pri takvoj zakonitosti promene udvostručavanje rastojanja od izvora podrazumeva četiri puta veću površinu talasnog fronta. Četiri puta veća površina podrazumeva četiri puta manju gustinu energije koju nosi talas.

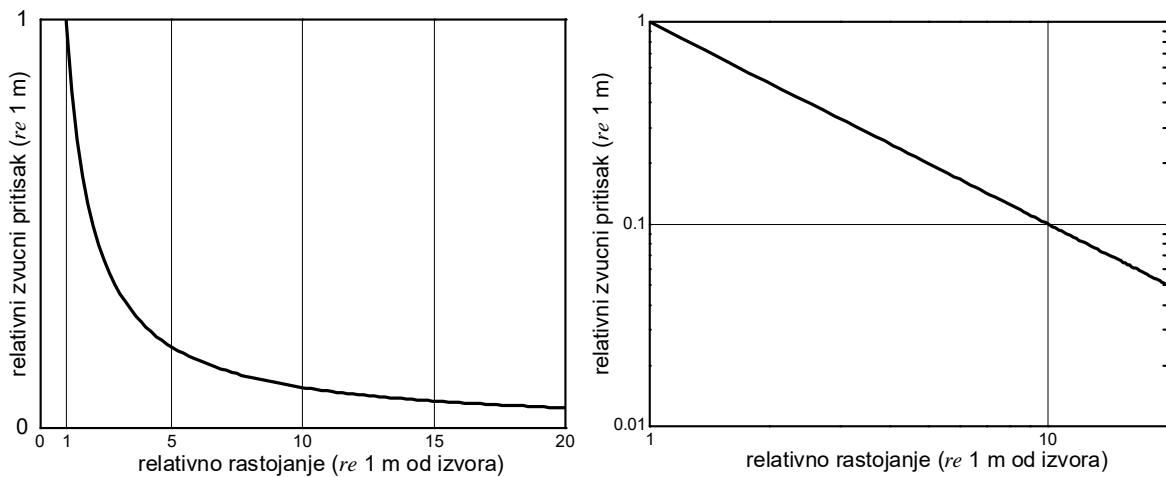


Slika 2.4 - Ilustracija povećanja površine talasnog fronta sa udaljavanjem talasa od izvora

Ovakva zakonitost širenja predstavlja važan zaključak, jer je zahvaljujući tome polje sfernog talasa potpuno definisano samo jednim podatkom o veličini zvučnog pritiska na nekom poznatom rastojanju od izvora. U mnogim slučajevima iskazuje se pritisak na jediničnom rastojanju od izvora. U bilo kojoj drugoj tački, odnosno na bilo kom rastojanju, moguće je jednostavno izračunati zvučni pritisak koji stvara izvor koristeći činjenicu da je $pr = \text{const}$. Ako je na rastojanju r_1 izmeren pritisak p_1 , onda će na rastojanju r_2 pritisak p_2 biti:

$$p_2 = \frac{r_1}{r_2} p_1 \quad (2.36)$$

Relativna promena zvučnog pritiska sa rastojanjem od izvora prikazana je i grafički na slici 2.5.



Slika 2.5 – Dijagram opadanja zvučnog pritiska sa rastojanjem prikazan u linearnej razmeri (levo) i sa obe ose u logaritamskoj razmeri (desno).

2.3 Koncept impedanse u akustici

Dinamičko ponašanje nekog složenog prenosnog sistema zavisi od osobina pojedinačnih elemenata od kojih je sistem sastavljen, ali i od procesa njihove međusobne interakcije. Pod pojmom interakcije dva susedna elementa podrazumeva se mehanizam kojim oni deluju jedan na drugi u procesu međusobne predaje energije. Ovaj problem najlakše je rezumeti na primeru električnih kola u kojima međusobno mogu biti povezani razni podsistemi. Na mestima njihovih spojeva dešavaju se pojave transmisije i refleksije energije, što zavisi od njihove međusobne prilagođenosti. U elektrotehnici se to opisuje impedansama.

Primeri iz bilijara

Proces predavanja energije između međusobno povezanih elemenata u jednom dinamičkom sistemu najslikovitije se može predstaviti dobro poznatim bilijarskim kuglama koje se kreću po stolu. U bilijaru sve su kugle identične, pa su i njihove mase jednake. Kada na bilijarskom stolu jedna kugla pogodi tačno u centar kuglu koja стоји, desiće se dobro poznati efekat da će kugla kojom je gađano ostati u mestu, a pogodena kugla će započeti kretanje. Takav događaj je indikator potpuno preciznog pogotka u centar. U takvom sudaru sva energija prve kugle prelazi u drugu kuglu, koja će se zbog toga kretati u istom pravcu i sa istom brzinom kao kugla kojom je pogodena. Ovakav događaj predstavlja primer potpune predaje mehaničke energije iz jednog elementa sistema u kretanju (prva kugla) u drugi element sistema (kugla koja je pogodena).

Za potpunu predaju energije između bilijarskih kugli potrebno je da budu ispunjeni neki preduslovi: da mase dve kugle budu potpuni identične i da pogodak bude tačno u centru. Samo tada će vektor brzine kugle koja se pokrenula biti identičan vektoru brzine kugle kojom je gađano. Govoreći jezikom elektrotehnike, kugle kao dva elementa jednog

dinamičkog sistema kojim se prenosi neka energija biće međusobno prilagođene, pa će i predaja energije između njih biti potpuna.

Kada makar jedan od ova dva uslova ne bi bio ispunjen (ako mase kugli nisu jednake ili ako iz nekih razloga nisu jednakvi vektora brzina) u predaji energije među njima ne može postojati potpuno prilagođenje. Tada nakon sudara deo energije ostaje u prvoj kugli. Na primer, ako bi masa dve kugle bila različita pogodena kugla bi se pokrenula, ali bi odnos njihovih masa odredio ishod. Ako bi kugla kojom se gađa bila mnogo manja od pogodene kugle, iskustveno je jasno da će se mala kugla odbiti vraćajući se nazad praktično istom brzinom, a velika pogodena kugla praktično će ostati na svom mestu. To je ekstremalni primer u kome nema predaje energije, već dolazi do refleksije. U suprotnom slučaju, ako bi kugla kojom se gađa bila veće mase, ona bi čak i nakon idealnog pogotka nastavila da se kreće u istom smeru zajedno sa pogodenom kuglom (verovatno pregazivši malu kuglu).

Neprilagođenost postoji i ako sudar dve identične kugle ne bi bio tačno u centru, već negde sa strane. Nakon pogotka vektori brzine dve kugle ne mogu biti jednakvi i obe kugle bi se posle pogotka kretale, ali u pravcima koji međusobno zaklapaju neki ugao. To znači da dva elementa dinamičkog sistema i u slučaju različitih brzina nisu međusobno sasvim prilagođena. Zbog činjenice da zbog vrste sudara vektori brzina ne mogu biti jednakvi, među njima nije moguća potpuna predaja energije.

Akustički medij kao dinamički sistem

Primer sa predajom energije između bilijarskih kugli može se primeniti i u akustici na procese u vazduhu kada se u njemu javi zvučni talas. Jednostavan primer sa slike 1.9 to pokazuje. Razlika je, naravno, u tome što se takvi događaji odigravaju na mikro planu i u jednom složenijem sistemu koji ima mnoštvo masa u kretanju, i sa međusobnim interakcijama koje su složenije od jednostavnog sudara bilijarskih kugli. U zvučnom polju događaju se procesi razmene energije između čestica koje osciluju. Njihovom međusobnom predajom energije odvija se kretanje zvučne energije kroz prostor. Potpuna predaja energije u mediju i kretanje energije talasa kroz prostor moguće zahvaljujući činjenici da sve čestice imaju istu masu, tačnije da je gustina medija u svim tačkama ista. U ravanskom talasu vektori brzina svih čestica su jednakvi i imaju isti pravac, što sasvim odgovara opisanom slučaju sa bilijarskim kuglama kada je ostvaren pogodak tačno u centar. Predaja energije između njih je tada potpuna, pa se talas kreće kroz prostor kao progresivan ravanski talas bez refleksija.

Ovakav idealan slučaj koji omogućava potpunu predaju energije, odnosno jednolično kretanje talasa kroz prostor, moguće je samo ako su ispunjeni uslovi koji se mogu označiti kao "prilagođenost". U slučaju zvuka to podrazumeva homogenost medija i identičnost vektora brzina, što je sve zadovoljeno u ravanskom talasu. Već u slučaju nepravilnog talasnog fronta vektori brzina susednih čestica između kojih se prenosi energija mogu se razlikovati po pravcima, što je preduslov da ne dolazi do potpune predaje energije između

njih. Tada nastaje neprilagođenosti koja dovodi do pojave refleksije, odnosno vraćanje dela zvučne energije nazad.

Za modelovanje pojava prenosa zvučne energije u akustici se, po analogiji sa elektrotehnikom, uvodi koncept impedansi. U elektrotehnici pojам impedanse predstavlja odnos pobude (napon) i odziva (struja). Isti princip se uvodi u akustici sa idejom da se opišu dinamički procesi u mediju. Tako se u svakoj tački zvučnog polja može definisati impedansa kao odnos pobude koja deluje na čestice medija da se one kreću i njihovog odziva na tu pobudu. U mediju pobuda je zvučni pritisak koji nastaje zgušnjavanjem ili razređivanjem vazduha pod uticajem neke sile i tako deluje na čestice, a odziv je brzina kojom će se čestice zbog toga pokrenuti.

Odnos pobude i odziva posmatra se kroz pojам impedanse ne samo u mediju kroz koji se prostire talas, već i u složenijim dinamičkim sistemima kao što su na primer elektroakustički pretvarači (zvučnici, mikrofoni). U njima su združene mehaničke i akustičke veličine, pa se impedansa primenjuje za opisivanje ponašanja mehaničkih, akustičkih i kombinovanih sistema. U toj oblasti se uvodi pojам mehaničke impedanse (u mehaničkom domenu ovaj pojам se nekada naziva "mobilnost"). Kada u elektroakustičkim pretvaračima zvučna energija nađe na prelaz između dva njegova elementa, pojava refleksije zavisi od dinamičkih karakteristika oba elementa kao i od ostalih elemenata koji su sa njima povezani. Ukratko, polazeći od definicije impedanse kao pojma koji univerzalno definiše odnos pobude i odziva uvedene su impedanse za karakterisanje pojava u akustici. Koncept impedanse u takvim okolnostima ima za cilj da objasni i da olakša analizu složenih sistema.

Specifična akustička impedansa sredine

Primenjujući princip impedanse na mikroplanu sredine u kojoj se javlja zvuk, definisana je impedansa kao odnos kompleksne amplitute pritiska u fluidu, što je pokazatelj lokalne pobude, i kompleksne amplitute brzine oscilovanja čestica koje su tim pritiskom pokrenute. U svakom mediju odnos pritiska i brzine je karakteristična veličina koja u akustičkom smislu opisuje njegova fizička svojstva i definiše reakciju medija na pojavu talasnog fronta. Ta veličina naziva se specifična akustička impedansa i ona je u opštem slučaju:

$$\underline{Z_s} = \frac{p}{\underline{v}} \quad (2.37)$$

U literaturi se javljaju različiti nazivi za ovu veličinu. Njena vrednost je u svakom mediju zavisna i od forme zvučnog talasa, pa se zbog toga naziva i "talasna impedansa". U opštem slučaju ova impedansa je kompleksna veličina, a samo za ravan talas je realna, što je i osnovna karakteristika ove jednostavne vrste talasa.

Izrazom (2.25) pokazano je da je za ravan talas:

$$Z_s = \rho c \quad (2.38)$$

Vrednost ove impedanse u vazduhu približno je 410 SI jedinica. Konstanta ρc zavisi samo od fizičkih svojstava medija, pa se za taj proizvod gustine i brzine prostiranja često koristi izraz "karakteristična impedansa". Vrednost ove impedanse za slučaj ravnog talas predstavlja osnovnu akustičku osobinu materijala. Svaki medij ima svoju karakterističnu vrednost, što znači i da će u svakom materijalu pri pojavi talasnog fronta mehanički odziv čestica biti drugačiji.

Specifična akustička impedansa sfernog talasa

Za sferni talas brzina se takođe može odrediti koristeći Ojlerovu jednačinu, pa je:

$$\underline{v} = \frac{1 + jkr}{j\omega\rho} \frac{A}{r^2} e^{j(\omega t - kr)} = \frac{1 + jkr}{j\omega\rho r} \underline{p} \quad (2.39)$$

Za razliku od ravanskog talasa gde je odnos pritiska i brzine realna konstanta, ovde je brzina zavisna od jednog kompleksnog člana koji se vidi sa desne strane gornjeg izraza. Odavde se može definisati impedansa, to jest odnos pritiska i brzine. U ovom slučaju i specifična impedansa talasa je kompleksna veličina. Iz izraza (2.39) proizilazi da je za sferni talas specifična impedansa:

$$\underline{Z}_s = \frac{\underline{p}}{\underline{v}} = \frac{j\rho c k r}{1 + jkr} \quad (2.40)$$

Specifična impedansa sfernog talasa može se prikazati i preko svog realnog i imaginarnog dela. Razvijajući izraz (2.40) dobija se:

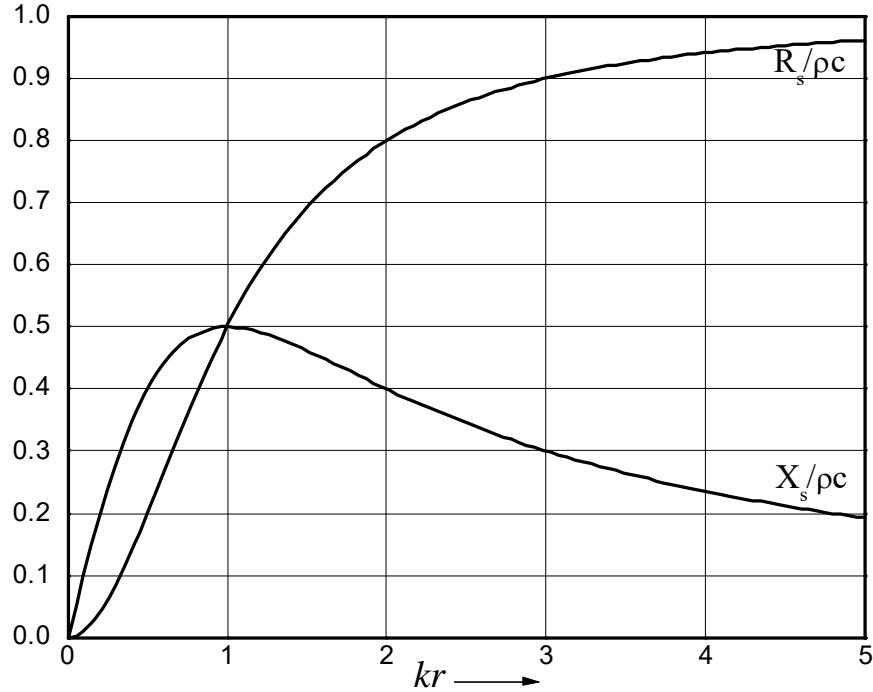
$$\underline{Z}_s = \frac{\rho c k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + j \frac{\rho c k r}{1 + k^2 r^2} = R_s + jX_s \quad (2.41)$$

Priroda specifične impedanse sfernog talasa zavisi od vrednosti proizvoda kr , što znači da je funkcija frekvencije i rastojanja od zvučnog izvora koji je generisao talas. Kada je $kr \ll 1$, impedansa je pretežno induktivna, a kada je $kr \gg 1$, impedansa postaje jednaka vrednosti za ravanski talas. Na slici 2.6 grafički je prikazana promena vrednost realnog i imaginarnog dela impedanse u funkciji rastojanja od izvora.

Sa dijagrama prikazanog na slici 2.6 može se videti da sferni talas pri udaljavanju od izvora postepeno doživljava transformaciju u ravan talas. S povećavanjem rastojanja reaktivni deo impedanse asimptotski teži nuli, dok njen realni deo teži vrednosti koju ima impedansa ravnog talasa. Prema tome, osnovni pokazatelj da li se neki talas može smatrati ravnim jeste njegova specifična impedansa. Pitanje je samo tolerancije s kojom se ocenjuje da li je realni deo impedanse dostigao vrednost ρc . Zbog uticaja fazne konstante k kao argumenta, na višim frekvencijama odnosno manjim talasnim dužinama približavanje toj vrednosti dešava se brže nego na niskim frekvencijama, odnosno na manjim rastojanjima od izvora. Proizvod kr se može napisati kao:

$$kr = \frac{2\pi}{\lambda} r = 2\pi \left(\frac{r}{\lambda} \right) \quad (2.42)$$

pa se vidi da je argument koji određuje impedansu odnos rastojanja i talasne dužine. To znači da pri praćenju transformacije sfernog talasa u ravan rastojanje od izvora treba posmatrati u talasnim dužinama kao jedinicama.



Slika 2.6 - Promena realnog i imaginarnog dela impedanse sfernog talasa sa rastojanjem.
Vrednosti su normalizovane u odnosu na impedansu ravnog talasa ρc .

Impedansa sfernog talasa se takođe može prikazati i preko modula i argumenta. Ako se uvede argument impedanse φ , onda je

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{kr} \quad (2.43)$$

Trigonometrijskom transformacijom gornji izraz se može transformisati u izraz:

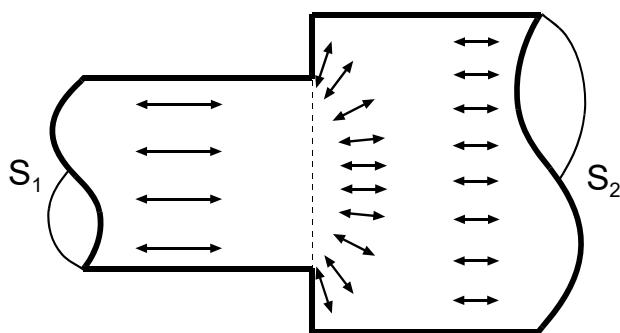
$$\cos \varphi = \frac{kr}{\sqrt{1+k^2 r^2}} \quad (2.44)$$

Specifična impedansa sfernog talasa predstavljena modulom i argumentom je:

$$\underline{Z}_s = \frac{\rho c k r}{\sqrt{1+k^2 r^2}} e^{j\varphi} = \rho c \cos \varphi e^{j\varphi} \quad (2.45)$$

Akustička impedansa

U složenijim akustičkim sistemima postoje mesta gde je ponašanje zvučnog talasa na mikro planu vrlo kompleksno, čak i ako se kroz sistem prostire ravan talas. Koristeći na primer zvukovod kao ilustraciju, taj problem nastaje na svim diskontinuitetima, kao što je to otvor na njegovom kraju, na spoju dva zvukovoda različitih preseka, i slično. Na takvim mestima zbog fizičkih uticaja okruženja struktura polja postaje kompleksna. U tim slučajevima problem prostiranja energije ne može se lako rešavati na osnovu specifične impedanse talasa, jer je određivanje vektora brzine u svim relevantnim tačkama talasnog fronta vrlo složeno.



Slika 2.7 - Cev promenljivog preseka u kojoj se za rešavanje zvučnog polja prelazi na akustičku impedansu.

Jedan karakterističan primer u kome se javlja takav diskontinuitet prikazan je na slici 2.7. To je cev kroz koju se prostire ravan zvučni talas, a koja na jednom mestu ima naglu promenu poprečnog preseka. Može se smatrati da je to zvukovod promenljivog preseka. Ravan talas koji bi se prostirao kroz takav zvukovod ne može zadržati svoju idealnu formu na mestu promene preseka, što znači da na tom mestu mora doći do odstupanja od ravne strukture talasnog fronta. Na slici je strelicama simbolički predstavljena struktura oscilovanja čestica u polju da bi se sagledala priroda diskontinuiteta nastalog na mestu promene preseka. U zoni prelaza talasa iz jednog preseka u drugi doći će do lokalnih promena pravca brzina oscilovanja. Imajući u vidu prethodno objašnjenje o mogućim uzrocima neprilagođenja u predaji energije između pojedinih elemenata sistema, jasno je da će disperzija pravaca oscilovanja koja nastaje na mestu promene preseka kao posledicu stvoriti pojavu lokalnog neprilagođenja u interakciji između susednih oscilujućih čestica medija.

Za analizu kretanja zvučne energije kroz zvukovod promenljivog preseka pogodno je na neki način uoptrebiti koncept impedanse. Međutim, posmatranje pojave na lokalnom nivou pomoću specifične impedanse sredine, koja opisuje događanja na mikroplanu medija, predstavljalо bi relativno složen matematički problem. Sa druge strane, posmatranje kretanja energije kroz zvukovod podrazumeva da postoji zainteresovanost samo za makroskopske efekte pojave, to jest za energiju koja prođe kroz diskontinuitet zvukovoda, ili energiju koja se na tom mestu reflektuje usled neprilagođenja i vraća nazad. U takvom slučaju mnogo je jednostavnije da se proces na neki način modeluje

globalno kroz prostiranje energije duž zvukovoda, što zahteva uvođenje nove vrste impedanse koja bi, sada na jednom globalnom nivou, pokazivala odnos pobude i odziva.

U slučaju zvukovoda kao pobuda se može posmatrati srednji zvučni pritisak u cevi (koji je u zvukovodima praktično jednak po njegovom poprečnom preseku). Globalni odziv u njemu je veličina koja se naziva akustički protok q , i koji je podeljeno definiciji:

$$q = vS \quad (2.46)$$

Vidi se da akustički protok ima dimenziju (m^3/s). Zbog toga se on naziva još i zapreminska brzina u mediju.

U ovom slučaju se kao makroskopski pokazatelj koji definiše prenos energije uvodi veličina koja se naziva akustička impedansa. Ona predstavlja karakteristiku talasa u cevi u celini, i po definiciji je:

$$Z_a = \frac{p}{q} \quad (2.47)$$

Praktična korist od uvođenja akustičke impedanse je u tome što se na raznim diskontinuitetima ne mora rešavati talasna jednačina, već se posmatraju spojeni elementi kao celine. Proces prenosa energije iz jednog dela cevi u drugi opisuje se odnosom njihovih akustičkih impedansi.

Upoređujući izraze za specifičnu impedansu i akustičku impedansu vidi se da je njihov odnos:

$$Z_a = \frac{Z_s}{S} \quad (2.48)$$

Ako je u cevi vazduh, onda je akustička impedansa zvukovoda kroz koji se prostire ravan talas:

$$Z_a = \frac{\rho c}{S} \quad (2.49)$$

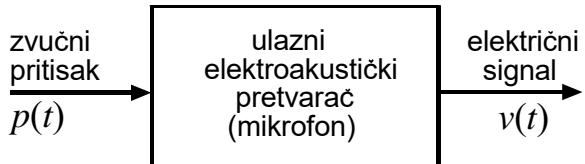
3. ZVUČNI PRITISAK KAO SIGNAL

Zvučno polje u fluidima karakterisano je zvučnim pritiskom u funkciji vremena i prostornih koordinata. Kada se polje prati u jednoj fiksnoj tački prostora, što je uvek slučaj u praksi jer je takva tačka definisana položajem senzora kojim se registruje stanje u polju, zvučni pritisak se svodi samo na vremensku funkciju $p(t)$. Za tipične zvukove ova vremenska funkcija je veoma kompleksna. Složenost talasnih oblika povlači za sobom i složen spektralni sadržaj.

Informacioni aspekt zvučnih pojava objašnjen u prvom poglavlju nameće potrebu da se zvučni pritisak posmatra kao signala. Pokazano je da u inženjerskoj praksi za to postoje tri moguća razloga. Prvo, postoje okolnosti kada se zvučni izvori koriste za namerno, smisljeno kodovanje informacija zvukom koji tako postaje sredstvo komuniciranja. Karakteristični, su govor i muzika. Drugo, zvučni pritisak kao signal sadrži u себи informacije o izvoru koji ga je generisao. Ako se ustanove korelacije između fizičkih i drugih osobina izvora i informacionog sadržaja pritiska kao signala moguće je pomoći zvuka pratiti fizičko stanje izvora. Treće, zvučni talas na svom putu od izvora do tačke posmatranja trpi razne promene koje su posledica fizičkih uticaja sistema prenosa u procesu prostiranja talasa. Poznavajući zakonitosti po kojima nastaju te promene moguće je iz registrovanog zvučnog pritiska dobiti informacije o prenosnom putu kroz koji je talas prošao.

Posmatranje zvučnog pritiska kao signala u praksi podrazumeva njegovo pretvaranje u električni signal, pa se praćenje stanja u zvučnom polju vrši posredno, analizom dobijenog električnog signala. Transformacija zvučnog pritiska u električni signal vrši se spravama koje se nazivaju ulazni elektroakustički pretvarači. Njihova funkcija je šematski prikazana na slici 3.1. Pretvarač napravljen da zvučni pritisak u vazduhu pretvara u električni signal naziva se mikrofon. Jasno je da se i on mora posmatrati kao poseban sistem prenosa sa nekom svojom karakteristikom. Dobijeni električni signal određen je ne samo pritiskom koji deluje na mikrofon, već i funkcijom prenosa primjenjenog pretvarača.

Elektroakustički pretvarač generiše signal srazmeran pritisku, koji je po svojoj prirodi skalarna veličina. Zbog toga u analizi zvučnog polja na osnovu dobijenog električnog signala nedostaje informacija o pravcu nailaska talasa koji je stvorio registrovani pritisak. Čulo sluha čoveka ima sposobnost određivanja pravca nailaska zvuka, pa su zbog toga prostorne informacije o polju često bitne. Prostorna dimenzija zvučnog polja mora se analizirati na neki drugi, kompleksniji način.



Slika 3.1 - Šematski prikaz rada mikrofona kao elektroakustičkog pretvarača.

3.1 Efektivna vrednost zvučnog pritiska

U okolnostima kada je vremenski oblik zvučnog signala kompleksan, jedini način da se prati stanje u zvučnom polju je preko neke njegove srednje vrednosti. Srednja vrednost zvučnog pritiska je uvek jednaka nuli, jer je to promenljiva komponenta pritiska vazduha. Mikrofon kao pretvarač nije osetljiv na jednosmernu komponentu atmosferskog pritiska (kao i ljudsko uvo). Zbog toga svaka ideja o nekom usrednjavanju zvučnog pritiska vodi ka srednjoj kvadratnoj vrednosti $\overline{p^2(t)}$. Po definiciji, srednja kvadratna vrednost zvučnog pritiska je:

$$\overline{p^2(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} p^2(t) dt \quad (3.1)$$

Ova veličina je po svojoj prirodi srazmerna energiji zvuka. Iz nje se dalje izvodi efektivna vrednost pritiska koja je po definiciji:

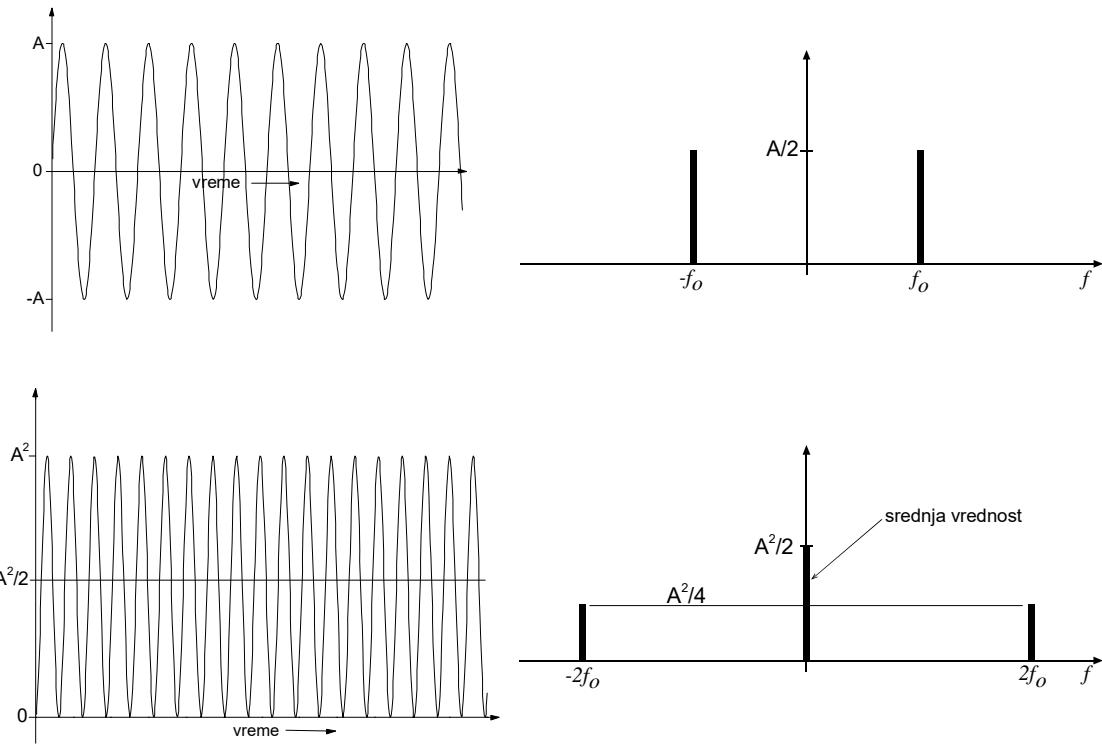
$$p_{eff} = \sqrt{\overline{p^2(t)}} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} p^2(t) dt} \quad (3.2)$$

Vidi se da je efektivna vrednost zvučnog pritiska rezultat vremenskog usrednjavanja kvadrata trenutne amplitude. Ovako definisana efektivna vrednost se u anglosaksonskoj literaturi označava *rms*.

Interval usrednjavanja pri utvrđivanju efektivne vrednosti svakog signala, pa i zvučnog pritiska, teorijski teži beskonačnosti kao što je naznačeno u izrazu (3.2). Međutim, kod praćenja realnih zvučnih pojava period usrednjavanja iz sasvim praktičnih razloga ne može biti beskonačan. Zbog toga se pri merenju efektivna vrednost signala uvek definiše na osnovu nekog konačnog vremenskog intervala T , pa je efektivna vrednost umesto izrazom (3.2) definisana kao:

$$p_{eff}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t p^2(\tau) d\tau} \quad (3.3)$$

Ovako definisana efektivna vrednost signala predstavlja novu vremenski promenljivu veličinu $p_{eff}(t)$, to jest novi signal, samo s veoma redukovanim frekvencijskim opsegom. Ta redukovanost je posledica procesa usrednjavanja.



Slika 3.2 – Talasni oblik stacionarnog sinusnog signala i njegov spektar (gore); isti signal kvadriran i njegov spektar (dole).

Pošto je zvučni pritisak nestacionaran signal, odabrana veličina intervala integracije T direktno utiče na izračunatu efektivnu vrednost. Zbog toga pri merenju u zvučnom polju izbor perioda integracije mora biti predmet posebne pažnje. Interval T je premet izbora koji zavisi od okolnosti. Činjenica da postoji prostorna zavisnost zvučnog pritiska podrazumeva da je efektivna vrednosti takođe funkcija prostornih koordinata. Prema tome, informacija o efektivnoj vrednosti pritiska u zvučnom polju mora biti praćena podacima o primjenjenom periodu usrednjavanja i o položaju mikrofona.

Vremenska promenljivost amplitude zvučnog pritiska može se razumeti kao amplitudska modulacija zvuka nekim signalom vrlo niskih frekvencija. Kvadriranjem signala zvučnog pritiska u spektru dolazi do izdvajanja komponente srednje vrednosti energije na poziciji jednosmerne komponente i istovremenog udaljavanja osnovnih komponenti signala zbog udvostručavanja njihovih frekvencija. Promene koje nastaju kvadriranjem signala prikazane su na slici 3.2.

Usrednjavanje kao konvolucija

Ako se kvadrirani signal pritiska shvati kao jedan novi signal

$$y(t) = p^2(t) \quad (3.4)$$

onda se usrednjavanje ovog signala u intervalu T može definisati izrazom:

$$\bar{y}(t) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} y(\tau) g(t - \tau) d\tau \quad (3.5)$$

gde je uvedena vremenska prozorska funkcija $g(\tau)$ definisana na sledeći način:

$$\begin{aligned} g(\tau) &= 1 && \text{za } 0 < \tau < T \\ g(\tau) &= 0 && \text{van gornjeg intervala} \end{aligned}$$

Vidi se da je period u kome se vrši usrednjavanje predstavljen kao pravougaona vremenska funkcija jedinične vrednosti u intervalu usrednjavanja i sa vrednošću 0 van tog intervala. Može se reći da usrednjavanje znači posmatranje signala kroz zadati pravougaoni vremenski prozor.

Izraz (3.5) pokazuje da usrednjavanje predstavlja konvoluciju oblika:

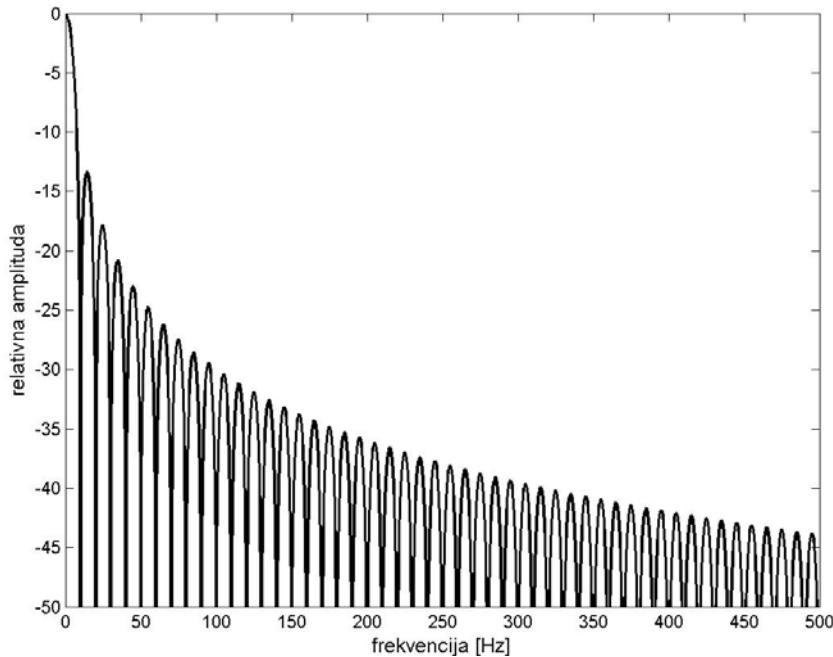
$$\bar{y}(t) = y(t) \otimes g(t) \quad (3.6)$$

Konvolucija u vremenskom domenu odgovara množenju odgovarajućih furijeovih transformacija koje predstavljaju funkcije $f(t)$ i $g(t)$ u frekvencijskom domenu. Amplitudski spektar pravougaone funkcije ima formu $|\sin x/x|$ sa nulama na celobrojnim umnošcima $1/T$. Otuda proces usrednjavanje signala u frekvencijskom domenu predstavlja njegovo filtriranje niskopropusnim filtrom čija je granična frekvencija (-3 dB):

$$f_{gr} = \frac{1}{2T} \quad (3.7)$$

Ovde je T period usrednjavanja. Strmina u nepropusnom delu ovog filtra je 20 db/dekadi (6 dB/oktavi). Kao ilustracija, na slici 3.3 prikazana je amplitidska karakteristika procesa usrednjavanja kada je $T = 100$ ms. Na osnovu izraza (3.7) može se izračunati da je gornja granična frekvencija ovog filtra 5 Hz. Oblik karakteristike pokazuje koliko će u efektivnoj vrednosti biti potisnute komponente osnovnog signala sa slike 3.2, koje su na dvostruko višim frekvencijama od frekvencija na kojima su u originalnom signalu.

Proces usrednjavanja nakon kvadriranja ima funkciju niskopropusnog filtra kojim se izdvajaju niskofrekvenske komponente signala, i koji vrši to razdvajanje. Ako je period usrednjavanja kratak, slabljenje u nepropusnom opsegu filtra može biti nedovoljno, pa se u signalu efektivne vrednosti mogu javiti i oslabljene komponente osnovnog signala (komponente na dvostrukoj frekvenciji sa slike 3.4).



Slika 3.3 - Amplitudska karakteristika procesa usrednjavanja za $T = 100 \text{ ms}$

Eksponencijalno usrednjavanje

Postupak usrednjavanja može se realizovati sa različitim oblicima vremenskih prozora $g(\tau)$. Usrednjavanje u digitalnom domenu uobičajeno se vrši u skladu sa definicijom efektivne vrednosti iz izraza (3.3), što znači da se koristi pravougaoni vremenski prozor. U analognoj tehnologiji nije moguće realizovati neponderisano memorisanje signala, pa se usrednjavanje u mernim procedurama vrši RC kolom integratora. To podrazumeva da se pri usrednjavanju signala primenjuje vremenski prozor eksponencijalnog oblika koji predstavlja težinsku funkciju s kojom se signal množi.

Uticaj RC kola, odnosno oblik vremenskog prozora definiše njegova vremenska konstanta:

$$\tau = RC \quad (3.8)$$

Poredeći pravougaoni i eksponencijalni prozor može se zaključiti da će oni imati istu graničnu frekvenciju ako važi relacija:

$$T = 2\tau = 2RC \quad (3.9)$$

Otuda se može izvesti zaključak da se može uvesti pojam ekvivalentnog perioda usrednjavanja eksponencijalnog vremenskog prozora koji je $2RC$.

Vreme integracije pri merenju efektivne vrednosti zvučnog pritiska

Izbor vremenske konstante T pri merenju efektivne vrednosti zvučnog pritiska u praksi je relativno složen. U tom pogledu ne postoji jedinstveno rešenje, već izbor zavisi od ciljeva zbog kojih se vrši merenje i od prirode zvučne pojave koja se posmatra. Globalno postoje dva moguća trenda: da T bude dovoljno veliko kako bi se izmerena efektivna vrednost što više približila teorijskoj vrednosti, ili da bude dovoljno kratko kako bi se omogućio uvid u vremenske fluktuacije zvučnog polja, odnosno obvojnice talasnog oblika.

U procedurama merenja buke koriste se dve vrednosti konstante usrednjavanja:

- kratka, kada je $T = 125 \text{ ms}$ i
- duga, kada je $T = 1 \text{ s}$.

Kraća vremenska konstanta uobičajeno se označava sa "*fast*", a duža konstanta sa "*slow*". Standardi koji bliže definišu postupke merenja upućuju na primenu jedne od ove dve navedene vrednosti u zavisnosti od prirode zvučne pojave koja se meri. Merenje dužom vremenskom konstantom maskiraće kratkotrajne impulsne pojave u zvuku, ali će olakšati očitavanje podatka o srednjoj veličini efektivne vrednosti koja se menja u vremenu. Merenje kraćom vremenskom konstantom omogućava praćenje kratkotrajnih impulsnih zvučnih pojava, ali te fluktuacije istovremeno otežavaju određivanje efektivne vrednosti za čitav signal.

U procedurama merenja buke u životnoj sredini primenjuju se i mnogo duži periodi integracije da bi se obuhvatili svi relevantni zvučni događaji. Takav je slučaj, na primer, sa merenjem saobraćajne buke na gradskim ulicama gde dovoljno dugačak interval integracije čini da izmerena efektivna vrednost ne zavisi od eventualnih sporadičnih zvučnih ekscesa koji se mogu javiti u toku perioda merenja (na primer prolazak jednog vozila sa pokvarenim izduvnim sistemom). Norme za buku u životnoj sredini najčešće definišu usrednjavanje signala u intervalu od 15 minuta. Postoje okolnosti kada se merenja vrše sa usrednjavanjem koje može trajati i do 24 sata.

Merenja efektivne vrednosti govora i muzike koriste vremenske konstante usrednjavanja koje su znatno kraće od navedenih. U nekim okolnostima koristi se veoma kratka konstanta usrednjavanja, čak oko 10 ms. Instrument koji radi sa tako kratkim periodom usrednjavanja naziva se merač vršnih vrednosti. Praćenje audio signala u sistemima za ozvučavanje vrši se mernim instrumentom čija je vremenska konstanta usrednjavanja oko 200 ms.

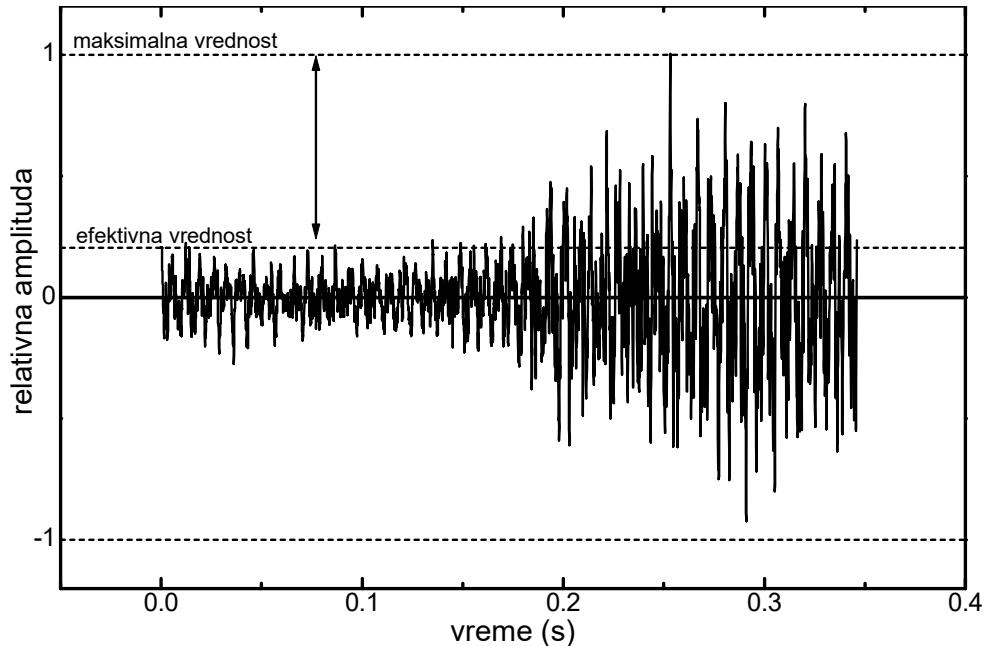
Krest faktor

Što su fluktacije u talasnom obliku zvučnog pritiska veće, to je veća i razlika između njegove efektivne vrednosti, bez obzira na veličinu perioda usrednjavanja, i trenutnih vrednosti koje se u takvom signalu javljaju. Pokazatelj te razlike naziva se „krest faktor“.

To je, po definiciji, odnos maksimalne trenutne vrednost signala i efektivne vrednosti definisane izrazom (3.3):

$$C = \frac{P_{\max}}{P_{\text{eff}}} \quad (3.10)$$

Na slici 3.4 prikazana je ilustracija pojma krest faktora na primeru jednog segmenta muzičkog signala trajanja oko 0,3 s. Označene su efektivne vrednost, izračunata na čitavom trajanju signala, i maksimalna vrednost. Njihov odnos definiše krest faktor u pokazanom primeru. Vrednosti krest faktora zavisi od prirode zvuka, odnosno zvučnog izvora koji ga stvara. Najjednostavniji signal čiji je talasni oblik čista sinusoida ima krest faktor 1,4 (za toliko se razlikuju efektivna vrednost i maksimalna vrednost sinusoide). U primeru sa slike 3.4 krest faktor je oko 5.



Slika 3.4 – Ilustracija krest faktora na primeru jednog realnog zvučnog signala.

Zbog prirode zvučnih pojava i njihove povezanosti sa čulom sluha uvedena je ekvivalentna logaritamska veličina koja se naziva nivo krest faktora. On je definisan izrazom:

$$L_c = 20 \log C \quad (3.11)$$

i izražava se u decibelima. Kod sinusoidalnog signala nivo krest faktora je 3 dB. To je i najmanja vrednost kod realnih talasnih oblika; za ostale vrste zvukova ona je uvek veća. Za kompleksne zvukove kao što je šum nivo krest faktora može biti i do 20 dB.

Podatak o krest faktoru, odnosno nivou krest faktora nekog signala, veoma je značajan u okolnostima kada se u realnom vremenu prati stanje zvučnog polja. U tumačenju

rezultata merenja treba uzimati u obzir da uvek postoje trenutna premašenja očitane vrednosti sa instrumenta, i da ta premašenja mogu biti do veličine krest faktora.

3.2 Nivo zvuka

Činjenica da se u akustici često pojavljuje čovekovo čulo sluha kao prijemnik nameće potrebu da se način prikazivanja stanja u zvučnom polju prilagodi specifičnostima ovog čula. U inženjerskom smislu svakako najznačajnija osobina je logaritamska priroda njegove osjetljivosti. Takva osobina je svojstvena svim čulima i definisana je poznatim Veber-Fehnerovim zakonom. Najjednostavnije iskazano, ovaj zakon utvrđuje da je subjektivni doživljaj promene nadražaja ljudskog čula funkcija procentualne promene intentiteta pobude. Primijenjeno na zvuk i čulo sluha to znači da je pri bilo kojoj vrednosti zvučnog pritiska potreban uvek približno isti procenat promene stanja da bi se ta promena subjektivno primetila. To vodi zaključku da osjetljivost čula sluha na skali intenziteta ima logaritamsku karakteristiku.

Zbog toga je za iskazivanje stanja u zvučnom polju prikladno koristiti neku logaritamsku skalu umesto skale zvučnog pritiska. Logaritamska veličina koja se široko primenjuje u inženjerskim disciplinama je decibel. To je po svojoj definiciji relativna mera koja pokazuje odnos dve vrednosti iste fizičke veličine. Primijenjeno na zvučni pritisak, u decibelima bi se mogao iskazati odnos neke dve vrednosti p_1 i p_2 koristeći definicioni izraz:

$$20 \log \frac{p_1}{p_2} = 10 \log \frac{p_1^2}{p_2^2} [dB] \quad (3.12)$$

Prema tome, decibel jeste po definiciji logaritamska mera, ali je to pokazatelj relativnog odnosa dve vrednosti, a ne apsolutna mera.

Nivo zvučnog pritiska

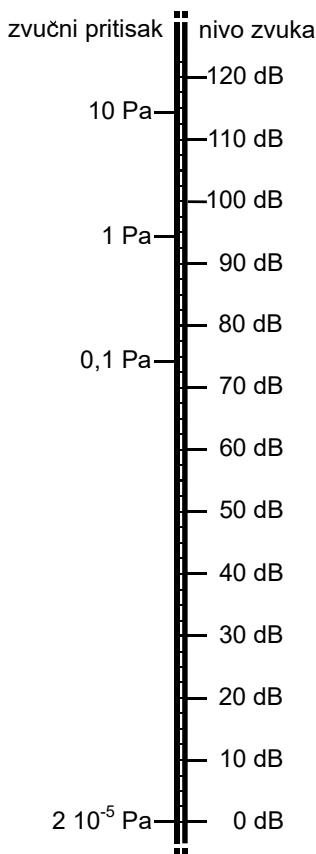
Pravljenje apsolutne skale u decibelima za neku fizičku veličinu moguće je ako se jedna od dve vrednosti iz izraza (3.12) učini konstantom i ta vrednost unapred definiše kao referenca. To postaje nula na skali u decibelima i svaka moguća vrednost se poredi sa izabranom referencom. Upravo na tom principu je u akustici uvedena nova veličina koja se naziva nivo zvučnog pritiska, ili kratko nivo zvuka (u anglosaksonskoj literaturi: *sound pressure level* ili skraćeno SPL). Skala nivoa zvuka definisana je tako što je u izrazu (3.12) usvojeno da p_2 bude konstanta čija je vrednost utvrđena konvencijom. Vrednost te konstante je $p_o = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Tako je nivo zvučnog pritiska, po definiciji:

$$L = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_o^2} [dB] \quad (3.13)$$

Referentna vrednost $2 \cdot 10^{-5}$ Pa izabrana je zbog toga što je u vreme njenog uvođenja smatrano da odgovara granici čujnosti, to jest najtišem zvuku koji ljudsko uvo može čuti

na 1000 Hz. Činilo se logičnim da taj prag bude nula na novoj skali za kvantifikovanje zvučnog polja. Interesantno je da je podatak o vrednosti granice čujnosti vremenom korigovan, a pokazalo se i da sam pojam granice čujnosti nije jednoznačan i zavisi od uslova slušanja. Ipak, svojevremeno usvojena referentna vrednost p_0 nije više menjana.

Na slici 3.5 uporedno su prikazane skala nivoa zvuka i skala zvučnog pritiska u vazduhu. Vidi se da je opseg vrednosti zvučnog pritiska koji se značajan za čoveka preslikan na opseg nivoa zvuka u intervalu od oko 0 dB do oko 120 dB. Na toj skali je karakteristično da zvučnom pritisku od 1 Pa odgovara nivo zvuka 94 dB. Odatle se dalje lako preračunavaju ostale karakteristične vrednosti, jer povećanje pritiska deset puta odgovara povećanju nivoa zvuka za 20 dB (na primer: 0,1 Pa odgovara nivou 74 dB, 10 Pa odgovara nivou 114 dB, itd.).



Slika 3.5 – Uporedna skala zvučnog pritiska i nivoa zvuka

U definiciji nivoa zvuka dатој изразом (3.13) nalazi se efektivna vrednost zvučnog pritiska. Ranije je objašnjena činjenica da efektivna vrednost zbog konačnog intervala usrednjavanja predstavlja funkciju vremena. Na taj način i nivo zvuka kao izvedena veličina predstavlja takođe funkciju vremena. Uz to, u svakoj iskazanoj vrednosti nivoa zvuka konstatovanoj u nekom zvučnom polju primenjena konstanta usrednjavanja je faktor koji utiče na nju. Zbog toga njenu vrednost treba poznavati da bi se pravilno tumačili rezultati.

Skala nivoa zvuka prilagođena je mehanizmu subjektivnog doživljavanja zvučne pobude, zbog čega ista promena nivoa zvuka u decibelima stvara približno isti subjektivni doživljaj promene jačine bez obzira da li se dešava u oblasti tihih ili jakih zvukova. Zahvaljujući tome nivo zvuka kao veličina potisnuo je zvučni pritisak u inženjerskoj praksi za predstavljanje stanja u zvučnom polju. Svi raspoloživi instrumenti za akustička merenja baždareni su isključivo u decibelima.

Najtiši zvukovi u čovekovom okruženju su reda veličine 20 dB, što je realna donja granica nivoa zvuka u svakodnevnom životu. Niži nivoi ostvarljivi su samo uz posebne mere zvučne zaštite, što se i preduzima pri izgradnji studijskih prostora i koncertnih sala. Nivo 30 dB se smatra dovoljnom „tišinom“ za ambijent spavaće sobe u stanovima, pa je ta vrednost specificirana u zakonu kao maksimalno dozvoljena u sobama stanova noću. Veoma jaki zvukovi imaju nivo reda veličine 80 dB i više. Maksimalno dozvoljeni nivo buke u ambijentu gde se boravi 8 sati je 85 dB. To je granična vrednost za radne uslove. Smatra se da izlaganje višim nivoima zvuka u tom vremenskom intervalu svakog dana može stvoriti trajna oštećenja. Nivo zvuka na koncertima sa ozvučenjem je reda 90 dB, pa i više, a maksimalne vrednosti nivoa zvuka u bioskopima s dobro podešenim sistemima reprodukcije zvuka su do 115 dB.

Nivo intenziteta zvuka

Kao što je to bio slučaj sa skalom zvučnog pritiska, tako je u praksi pogodno da se i skala intenziteta zvuka zameni sa odgovarajućom logaritamskom veličinom. Tako je definisana veličina koja se naziva nivo intenziteta zvuka, koji je po definiciji:

$$L = 10 \log \frac{J}{J_0} \quad (3.14)$$

Za referentnu vrednost u ovom slučaju usvojen je intenzitet $J_0 = 10^{-12} W/m^2$, to jest $1 \text{ pW}/m^2$. Za ravanski talas ovako definisan nivo intenziteta zvuka je numerički jednak nivou zvučnog pritiska, pa se u praksi može govoriti o jedinstvenom pojmu nivoa zvuka u decibelima, bez obzira da li je definisan preko zvučnog pritiska ili preko intenziteta.

3.3 Karakteristike zvučnog pritiska u frekvencijskom domenu

Kao što je ranije pokazano, vremenska funkcija $p(t)$ je u opštem slučaju veoma složena. Ona može biti suma diskretnih harmonijskih komponenti, pa je:

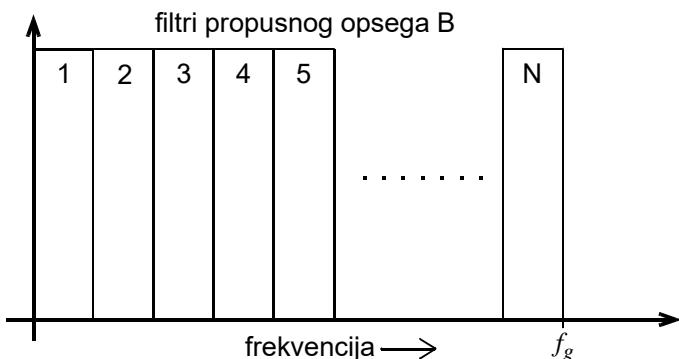
$$p(t) = \sum_n p_n(t) \quad (3.15)$$

gde je $p_n(t)$ komponenta zvučnog pritiska na diskretnim frekvencijama f_n , ili kontinualna funkcija frekvencije, pa važi:

$$p(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W(f) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (3.16)$$

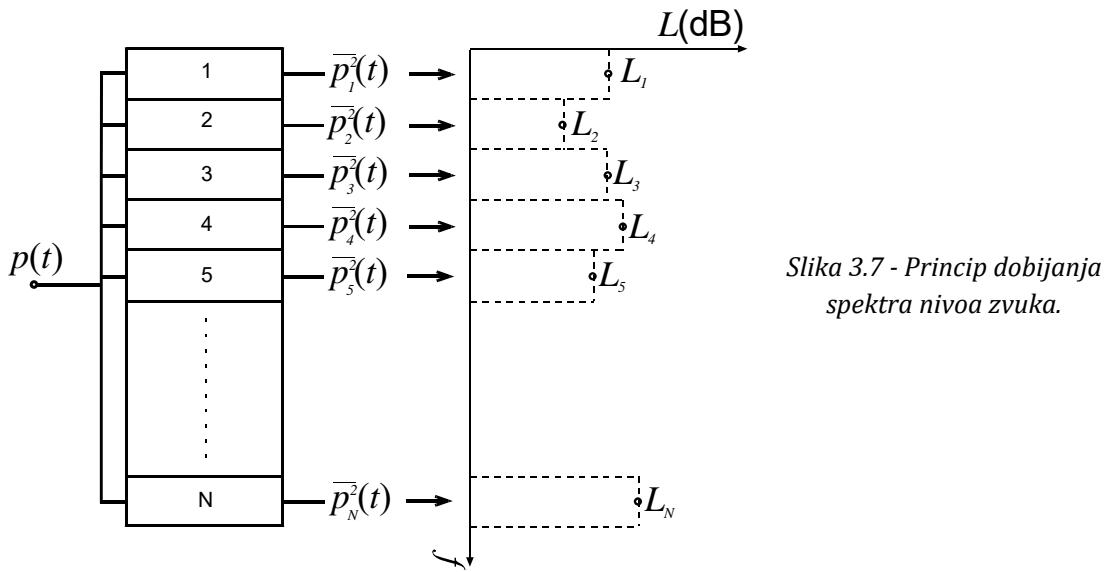
Ovde je $W(f)$ spektralna funkcija pritiska. Ovakvo predstavljanje zvučnog pritiska dalje znači da se njegova trenutna vrednosti $p(t)$, kao i njegova efektivna vrednost $p_{eff}(t)$ mogu definisati za signal na jednoj frekvenciji, za signal u nekom zadatom opsegu frekvencija ili za ukupan, širokopojasni signal.

Osnov spektralne analize zvuka je podela frekvencijskog opsega u kome se posmatra spektralni sadržaj signala na izvestan broj užih podopsega. Taj princip je ilustrovan na slici 3.6. U proceduralnom smislu podrazumeva se da je širina podopsega B unapred usvojena. Ukupan broj podopsega funkcija je širine frekvencijskog opsega u kome se nalazi spektralni sadržaj signala i usvojene širine B . Od veličine B zavisi rezolucija spektralne analize, odnosno preciznost dobijenog spektra.



Slika 3.6 - Šematski prikaz podele frekvencijske skale na podopsegove pri spektralnoj analizi

Princip dobijanja spektra nekog signala $p(t)$ šematski je prikazan na slici 3.7. Na izlazu iz svakog pojedinačnog filtra određuje se srednja kvadratna vrednost, odnosno efektivna vrednost signala koji se javlja, a na osnovu toga može se izračunati nivo zvuka. Tako dobijene vrednosti predstavljaju tačke u spektru signala. Dobijeni spektar zavisi od primenjene širine opsega filtra B i konstante usrednjavanja T koja je korišćena pri određivanju efektivnih vrednosti na izlazu svakog filtra.



Slika 3.7 - Princip dobijanja spektra nivoa zvuka.

Sabiranje spektralnih komponenti

Spektralna analiza po svojoj prirodi daje vektor vrednosti sa podacima dobijenim sa izlaza svih filtara. Sabiranje spektralnih komponenti u jedan zbirni signal, ako se za to ukaže potreba, može se vršiti samo energetski. To na slici 3.7 znači na nivou srednjih kvadratnih vrednosti, to jest energije. Sabiranje numeričkih vrednosti nivoa zvuka izraženih u decibelima nema svoju fizičku osnovu i nije dopušteno.

Ispravnost ovakvog pristupa može se pokazati na najjednostavnijem slučaju. Ako su u dva frekvencijska podopsega spektra pritisci p_1 i p_2 , ukupni zvučni pritisak je

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) \quad (3.17)$$

a srednja kvadratna vrednost pritiska u oba opsega:

$$\bar{p}^2 = \bar{p}_1^2 + \bar{p}_2^2 + 2(\bar{p}_1 \bar{p}_2) \quad (3.18)$$

Ako pritisci p_1 i p_2 ne sadrže komponente na istim frekvencijama, što je tačno ako je razdvajanje signala filtrima dovoljno dobro, onda je srednja vrednost njihovog proizvoda jednak nuli. Zbog toga važi relacija:

$$\bar{p}^2 = \bar{p}_1^2 + \bar{p}_2^2 \quad (3.19)$$

Ovaj princip se može proširiti na proizvoljan broj podopsega spektralne analize, pa važi princip da je:

$$\bar{p}^2(t) = \sum_{i=1}^N \bar{p}_i^2 \quad (3.20)$$

gde je N broj filtara kojim je podeljen frekvencijski opseg od interesa, odnosno broj tačaka kojim je predstavljen frekvencijski sadržaj zvuka, a p_i pritisak u i -tom opsegu spektra.

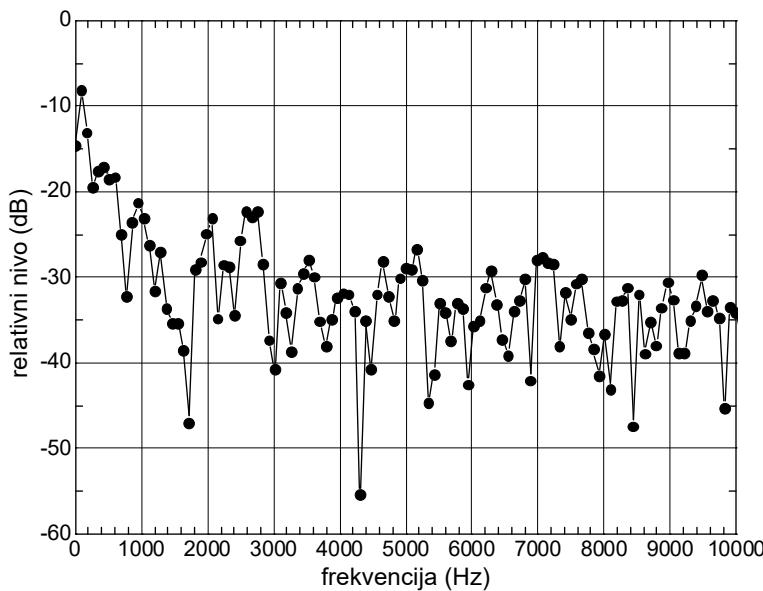
Ovaj izraz pokazuje da je energija signala jednaka sumi energija signala koji se pojavljuju na izlazima elementarnih filtara u spektralnoj analizi.

Spektralna analiza sa konstantnim filtrima

Uobičajeni način deljenja frekvencijske skale pri spektralnoj analizi podrazumeva podelu na uže opsege konstantne širine B . Širina B je tada određena brojem filtara kojim se vrši analiza:

$$B = \frac{f_g}{N} \quad (3.21)$$

gde je f_g gornja granična frekvencija zvuka koji se analizira. Broj filtara N određuje rezoluciju spektra, odnosno broj tačaka kojim će on biti predstavljen. Spektralna analiza sa konstantnim filtrima u praksi se uobičajeno vrši FFT algoritmom. Poznato je da je broj filtara N , odnosno broj tačaka u spektru, tada određen brojem tačaka signala sa kojim se ulazi u FFT algoritam (N je polovina broja tačaka uzetog signala).



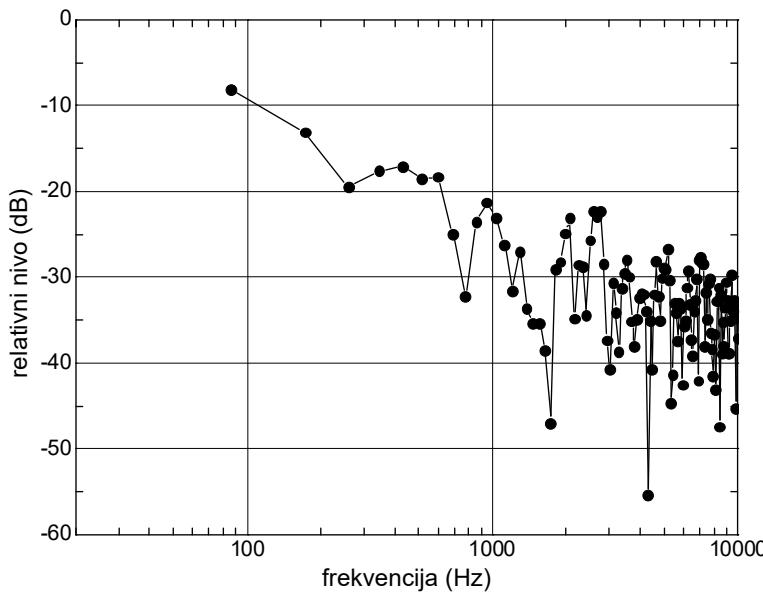
Slika 3.8 - Primer spektra jednog šuma određenog primenom konstantnih filtara. Svaka tačka je dobijena jednim filtrom. Širina opsega filtra u prikazanom spektru bila je $B \approx 86$ Hz.

Na slici 3.8 prikazan je rezultat spektralne analize sa konstantnim filtrima uzorka nekog šuma. Svaki filter je u spektru dao jednu spektralnu tačku. U primjenjenoj analizi približna širina filtra je bila $B \approx 86$ Hz. Na slici se vidi ekvidistantnost tačaka u spektru kada je frekvencijska osa predstavljena u linearnej razmeri, što predstavlja osnovnu karakteristiku analize sa konstantnim filtrima.

Spektralna analiza sa proporcionalnim filtrima

Logaritamska karakteristika čula sluha nameće potrebu da se rezultati spektralne analize predstavljaju na dijagramima gde je frekvencijska osa crtana u logaritamskoj razmeri. U takvoj prezentaciji spektralna analiza sa konstantnim filtrima daje nejednaku gustinu

tačaka na dijagramu spektra. Da bi se ilustrovala ova pojava, na slici 3.9 prikazan je spektar sa slike 3.8, sada nacrtan u logaritamskoj razmeri duž frekvencijske ose.



Slika 3.9 - Spektar sa slike 3.8 nacrtan u logaritamskoj razmeri po frekvencijskoj osi ($B \approx 86$ Hz). Vidi se nesrazmerna u rezoluciji na niskim i visokim frekvencijama.

Slike se vidi da u logaritamskom prikazu spektra dobijenog konstantnim filtrima postoji zgušnjanje tačaka ka višim frekvencijama. Na visokim frekvencijama gusto tačaka je, po pravilu, nepotrebno velika za bilo koju analizu, a istovremeno na niskim frekvencijama ta gustoza za neke potrebe može biti nedovoljna. Da bi se u ovakvoj prezentaciji na najnižim frekvencijama dobila prihvatljiva rezolucija potrebno je odrediti spektar sa veoma velikom rezolucijom, odnosno malom širinom B , što usložnjava proceduru analize i nepotrebno uvećava broj podataka.

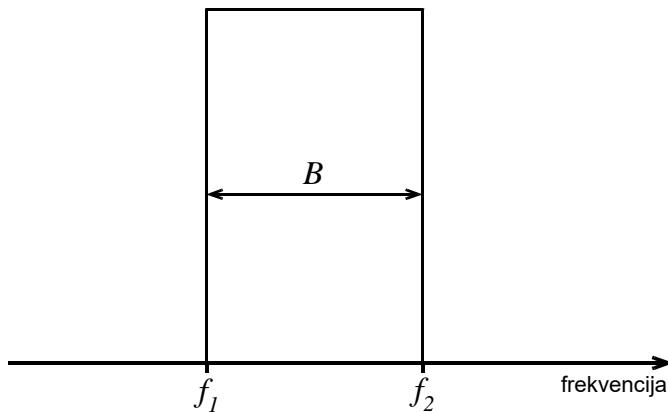
Zbog potrebe da se problem rezolucije razreši u skladu sa prirodom čula sluha, za potrebe spektralne analize u akustici uveden je pojam proporcionalnog frekvencijskog opsega. Sve karakteristične dimenzije prikazane su na slici 3.10. Širina frekvencijskog opsega je:

$$B = f_2 - f_1 \quad (3.22)$$

pri čemu je u slučaju proporcionalnog filtra, po definiciji:

$$\frac{f_2}{f_1} = \text{const} \quad (3.23)$$

Vidi se da je kod proporcionalnih frekvencijskih opsega umesto zadate širine B u Hercima definisana vrednost konstante koja pokazuje odnos gornje i donje granične frekvencije u izrazu (3.23). Zbog toga širina opsega u Hercima zavisi od frekvencije i za neku usvojenu vrednost konstante njegova veličina se menja duž frekvencijske ose. Na nižim frekvencijama širina opsega proporcionalnog filtra je relativno mala, izraženo u Hercima, i raste sa frekvencijom.



Slika 3.10 - Ilustracija uz definiciju proporcionalnog frekvencijskog opsega

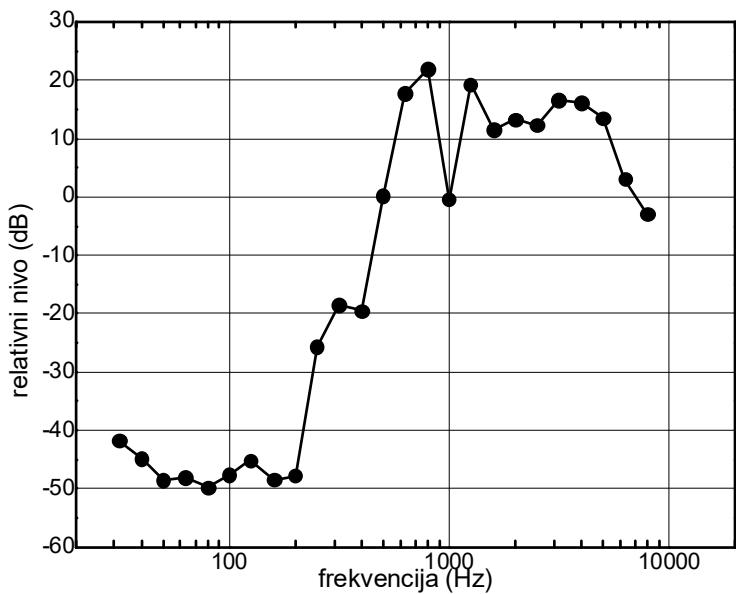
Proporcionalni filtri se, u principu, mogu definisati za razne vrednosti konstante iz izraza (3.23). U akustici se proporcionalni filtri uvek definišu konstantom koja za osnovu ima 2, tako da važi relacija:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^n \quad (3.24)$$

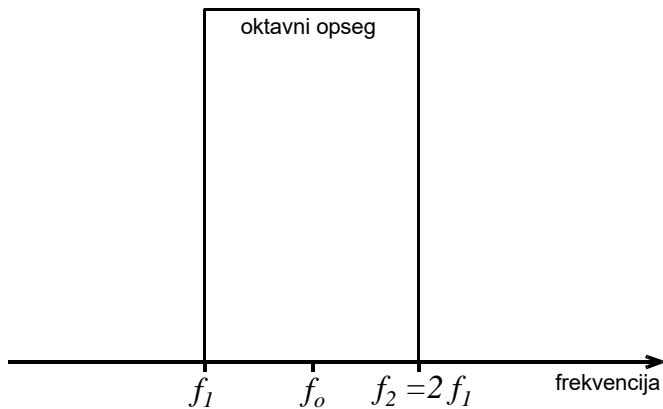
Konstanta n naziva se red proporcionalnog filtra. Kada je $n = 1$, gornji izraz definiše filtre širine oktave (takozvani oktavni filtri). Za njih je karakteristično da je odnos gornje i donje granične frekvencije 2. Naziv oktava proizilazi iz muzičke terminologije, jer muzički interval oktave predstavlja odnos dva tona čiji su frekvencije u odnosu 2:1. Kada je $n = 1/3$ izraz (3.24) definiše filtre širine 1/3 oktave koji se u žargonu nazvaju "tercni" filtri. Oktavni i 1/3 oktavni filtri uobičajeno se koriste u akustičkim analizama. Mnogo ređe se koriste filtri kod kojih je $n = 1/2$ (poluoktavni filtri) ili $n = 1/6$.

Bez obzira na red proporcionalnih filtara, za sve njih je karakteristično da imaju jednaku širinu na dijagramu sa logaritamski nacrtanom frekvencijskom osom. Otuda su i spektri dobijeni analizom pomoću takvih filtara predstavljeni tačkama koje su ekvidistantne kada je frekvencijska osa nacrtana u logaritamskoj razmeri. Na slici 3.11 prikazan je jedan primer 1/3 oktavnog spektra. Upoređujući ovaj spekter sa spektrom sa slike 3.9 jasno se vidi razlika u rezoluciji na niskim frekvencijama. Zbog toga je spektralna analiza proporcionalnim filtrima postala standardni postupak u akustici.

S obzirom da je odnos gornje i donje granične frekvencije kod svih proporcionalnih filtara precizno definisan, kod njih se može pojednostaviti označavanje uvodeći pojam centralne frekvencije opsega. Na slici 3.12 šematski je označen odnos centralne frekvencije i graničnih frekvencija jednog oktavnog opsega. Centralna frekvencija se nalazi na sredini opsega kada je frekvencijska osa predstavljena u logaritamskoj razmeri.



Slika 3.11 - Trećinsko oktavni (tercni) spektar jednog zvuka



Slika 3.12 – Karakteristične frekvencije oktavnog opsega

Centralna frekvencija proporcionalnog opsega je, po definiciji:

$$f_o = \sqrt{f_1 f_2} \quad (3.25)$$

Ako je poznata centralna frekvencija oktavnog opsega, onda je njegova donja granična frekvencija:

$$f_1 = \frac{f_o}{\sqrt{2}} \quad (3.26)$$

a gornja granična frekvencija

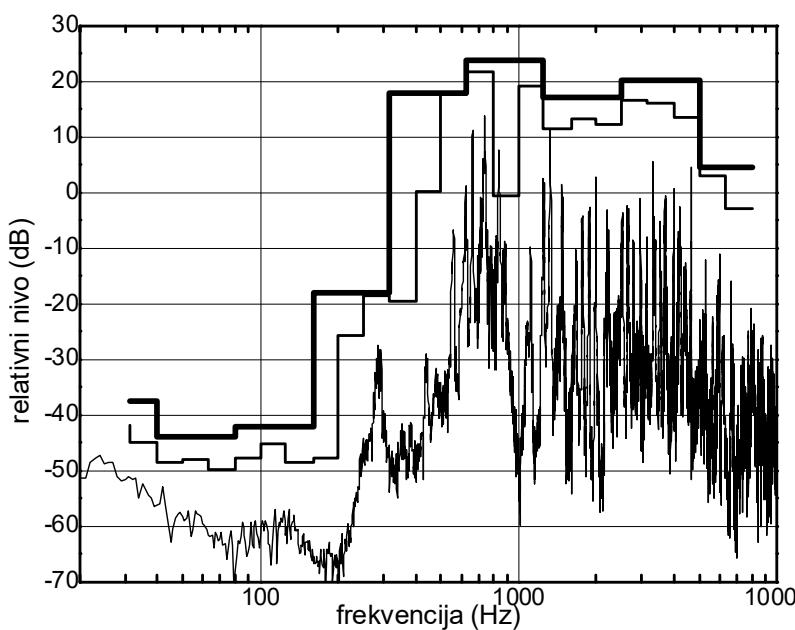
$$f_2 = f_o \sqrt{2} \quad (3.27)$$

Prema tome, centralna frekvencija u potpunosti određuje propusni opseg oktavnog filtra. Na istom principu može se definisati i centralna frekvencija 1/3 oktavnog opsega.

Da bi se u akustičkoj analizi omogućilo poređenje raznih spektara dobijenih proporcionalnim filtima bilo je neophodno da se njihove centralne frekvencije standardizuju. Time su automatski utvrđene i centralne frekvencije svih užih proporcionalnih opsega. U postupku definisanja standardnih frekvencija polazna tačka bila je frekvencija 1 kHz, koja je usvojena da bude centralna frekvencija jednog oktavnog opsega. Ostale vrednosti su određivane po oktavama naviše i naniže od nje. U tabeli 3.1 prikazane su standardne centralne frekvencije oktavnih i tercnih opsega proporcionalnih filtera koji se koriste u akustici.

Tabela 3.1 - Standardne centralne frekvencije proporcionalnih opsega

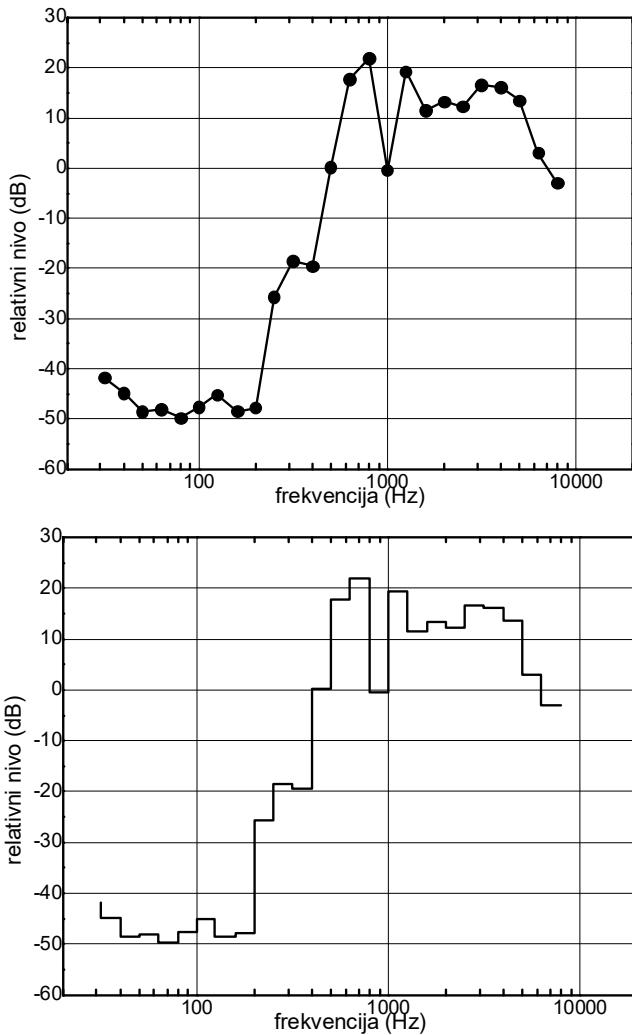
oktava	1/3 oktave	oktava	1/3 oktave
31,5 Hz	25 Hz	1000 Hz	800 Hz
	31,5 Hz		1000 Hz
	40 Hz		1250 Hz
63 Hz	50 Hz	2000 Hz	1600 Hz
	63 Hz		2000 Hz
	80 Hz		2500 Hz
125 Hz	100 Hz	4000 Hz	3150 Hz
	125 Hz		4000 Hz
	160 Hz		5000 Hz
250 Hz	200 Hz	8000 Hz	6300 Hz
	250 Hz		8000 Hz
	315 Hz		10000 Hz
500 Hz	400 Hz	16000 Hz	12500 Hz
	500 Hz		16000 Hz
	630 Hz		20000 Hz



*Slika 3.13 - Uporedni prikaz oktavnog (deblja linija), 1/3 oktavnog (tanja linija) i linearног spektra jednog zvuka dobijenog ширином опсега
B = 1 Hz (најнижа крива)*

Da bi se ilustrovala razlika koja se javlja između spektara istog zvučnog signala dobijenih na različite načine, na slici 3.13 za isti uzorak signala pokazan je oktavni spektar, $1/3$ oktavni spektar i spektar po Hercu (širina opsega $B = 1$ Hz).

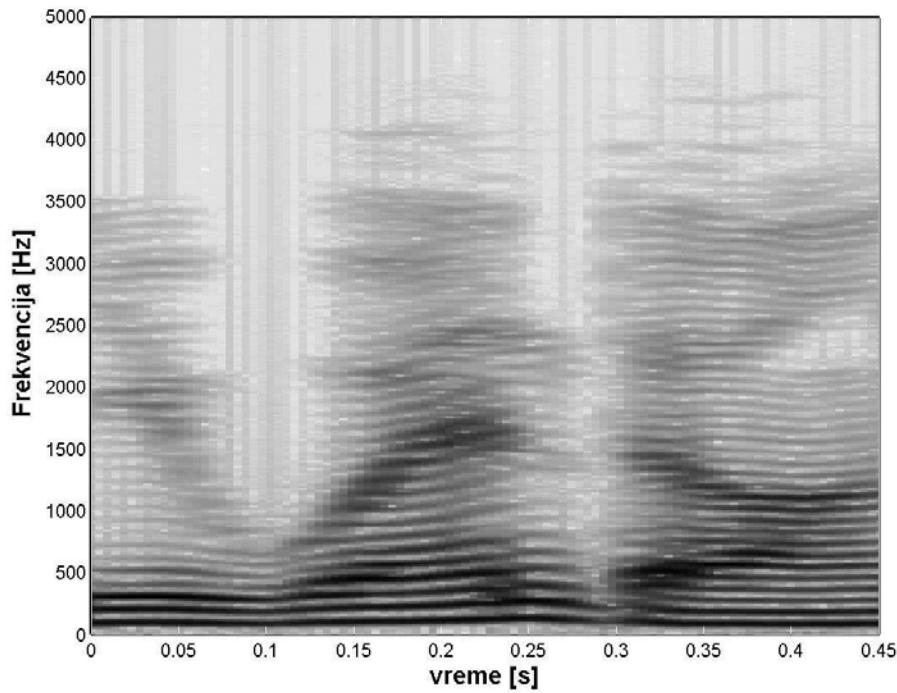
Proporcionalni spektri mogu se crtati na dva načina ilustrovana na slikama. Spektar se može crtati spajajući spektralne tačke (gornja slika), pri čemu su one pozicionirane na centralnim frekvencijama opsega, ili se umesto tačaka crtaju horizontalne linije u širini propusnog opsega svakog filtra (donja slika).



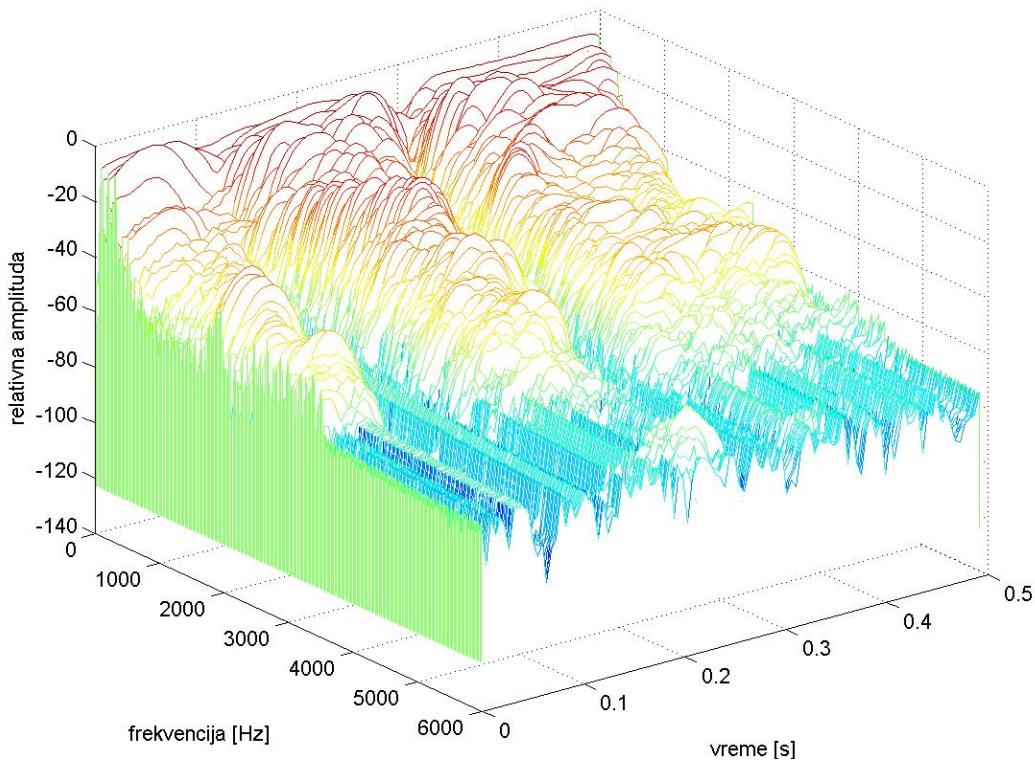
Trodimenzionalni prikazi spektralnog sadržaja signala

Za prikazivanje vremenske promene spektralnog sadržaja signala u polju čije su dimenzijske vreme, frekvencija i intenzitet koriste se posebni oblici grafičkih prezentacija: spektrogram i slap. Na slici 3.14 prikazan je primer spektrograma jednog zvučnog segmenta trajanja 0,45 s. Na apscisnoj osi je prikazano vreme, na ordinatnoj osi je frekvencija, a intenzitet je kodovan skalom različitih boja ili skalom zacrnjenja, kao na slici 3.14. Veće zacrnjenje označava veći intenzitet signala. Spektrogrami su uobičajeni

način predstavljanja spektralnog sadržaja pri analizi nestacionarnih signala kakav je, na primer, govor. Sve analize govora počinju sa spektrogramima, jer se samo na njima mogu uočiti neke karakteristične odlike ovog specifičnog signala.



Slika 3.14 - Primer jednog spektrograma koji prikazuje segment govora. Vide se harmonijske komponente glasa (horizontalne linije) i promene spektralnog sadržaja u vremenu.



Slika 3.15 - Primer jednog slapa. Prikazan je isti signal kao na slici 3.14.

Još jedna mogućnost trodimenzionalnog prikazivanja promene frekvencijskog sadržaja zvuka u vremenu naziva se slap (*waterfall*). To je grafički prikazi promene spektra u vremenu, nacrtan u nekom obliku perspektive. U horizontalnoj ravni se nalaze vremenska i frekvencijska osa, a osa nivoa signala je vertikalna. Jedan primer slapa prikazan je na slici 3.15. Prikazan je isti govorni signal kao na spektrogramu sa slike 3.14.

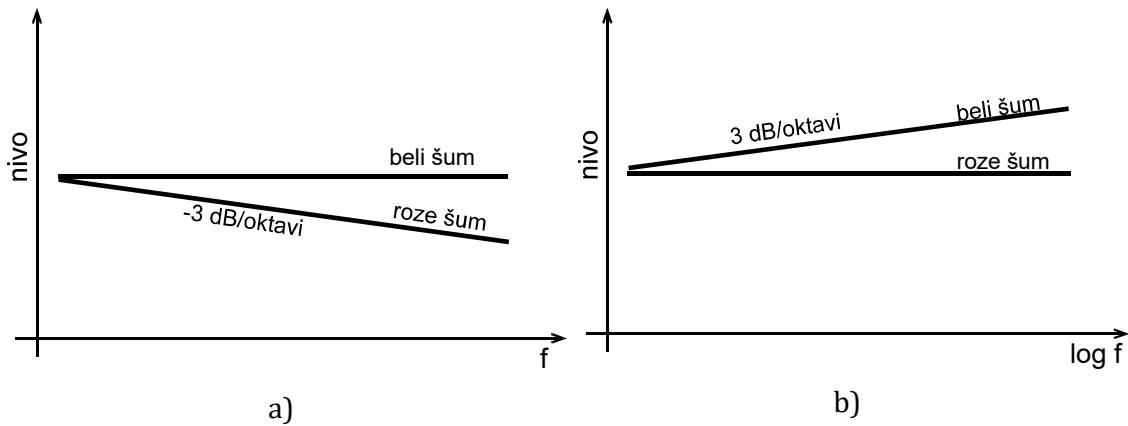
Prikazivanje vremenske sadržine signala u obliku slapa u opštem slučaju ima problem grafičke čitljivosti. Samo u nekim slučajevima, kao što je ona na slici 3.15, slika ima oblik koji je pregledan. U većini drugih okolnosti slika sastavljena od serije krivih postaje nedovoljno jasna.

Karakteristični spektralni oblici akustičkog signala

Za testiranje akustičkih prenosnih sistema potrebni su specifični signali koje karakteriše odgovarajući zadati oblik frekvencijskog spektra. U tom smislu u praksi nekad postoji potreba da se generiše zvučni pritisak, odnosno signal, koji ima potpuno ravan spektor. Međutim, zbog činjenice da proces određivanja spektara u akustici može biti različit, pojam ravnog spektra u akustici nije jednoznačno određen, već zavisi od primenjene metode spektralne analize. To je zahtevalo definisanje različitih akustičkih signala sa spektralnim sadržajem koji će biti prilagođeni procedurama određivanja spektra konstantnim ili proporcionalnim filtima.

Poznato je da beli šum, koji nastaje u termičkim procesima unutar provodnika, karakteriše ravan spektor po Hercu. To implicitno podrazumeva spektralnu analizu sa konstantnim opsezima. Naime, pošto po svojoj definiciji beli šum ima konstantnu spektralnu gustinu izraženu u W/Hz, jasno je da takav signal ima ravan spektor ako je on dobijen analizom sa konstantnim opsezima. Međutim, kada se spektralna analiza belog šuma vrši s proporcionalnim filtima dobijeni spektor nije ravan, već monotono raste sa frekvencijom. Ako se posmatraju oktavni filtri svaki sledeći viši oktavni filter na frekvencijskoj osi ima dvostruko širi frekvencijski opseg u Hercima od prethodnog. To dalje znači i da je u slučaju spektralne analize belog šuma oktavnim filtima energija na izlazu iz svakog filtra dvostruko veća od energije na izlazu prvog susednog nižeg filtra. Ovo udvostručavanje energije po filtima sa udvostručnjem frekvencije kao rezultat daje nagib linije izračunatog spektra sa početkom 3 dB/oktavi. Ova dva slučaja spektralne analize belog šuma prikazani su na slici 3.16.

Da bi se za potrebe raznih merenja omogućio signal čiji će spektor biti ravan kada se određuje proporcionalnim filtima, definisana je posebna vrsta signala koja se naziva roze šum. Naziv proističe iz analogije sa svetlošću, jer opšta forma frekvencijskog spektra ove vrste šuma ima sličnosti sa formom spektra svetlosti roze boje. Međutim, ni jedan prirodni proces ne generiše takav oblik signala, pa se roze šum u praksi dobija iz belog šuma propuštajući ga kroz takozvani "roze filter". Ovaj filter ima konstantnu opadajuću frekvencijsku karakteristiku nagiba 3 dB/oktavi.



Slika 3.16 - Spektri belog i roze šuma: levo - spektri sa konstantnim opsezima, desno - spektri sa proporcionalnim opsezima (na frekvencijskoj osi je primenjena logaritamska razmera).

Analizirajući spektralni sadržaj roze šuma primenom spektralne analize sa konstantnim osezima dobija se spektar koji monotono opada po frekvencijama sa nagibom 3 dB/oktavi, kao što je prikazano na slici 3.16.a. Međutim, u analizi sa proporcionalnim filtrima ovaj spektar je ravan, kao što se vidi na slici 3.16.b. U postupcima analize akustičkih prenosnih sistema koristi se beli ili roze šum u zavisnosti od toga koja se metoda spektralne analize koristi. Može se reći da u akustičkoj praksi dominira upotreba proporcionalnih filtera, pa roze šum predstavlja standardni signal za pobudu pri merenjima akustičkih sistema prenosa.

4. PRINCIPI RADA ZVUČNIH IZVORA

Zvučni izvor je ona tačka u zvučnom polju u kojoj deluje spoljašnja sila koja vrši mehanički poremećaj elastične sredine i predaje energiju delićima okolnog medija. U opštem slučaju pojam zvučnog izvora može biti veoma širok i teško je pobrojati sve njegove pojavnne oblike. Neki zvučni izvori su namenski konstruisani da bi se pomoću njih kontrolisano stvarao zvuk. U takve spadaju muzički instrumenti, zvučnici, sirene i mnogi drugi. Takođe postoje izvori koji zvuk stvaraju kao nusproizvod nekog svog procesa rada, ili čak kao slučajnu pojavu. Takvi su, na primer, razni mehanički uređaji i sklopovi, motori, vozila i slične sprave koji pri svom normalnom radu stvaraju zvuk. Zvuk može nastati i potpuno spontano u prirodi, bez ikakvog uticaja čoveka ili uređaja koje je on stvorio. Takvi izvori su grom, vетар, proticanje vode i slično. Najzad, i sam čovek može stvarati zvuk svojim vokalnim traktom, kojim se koristi u komunikaciji sa okolinom. Otvor usta tada funkcioniše kao tačka u prostoru koja predstavlja zvučni izvor.

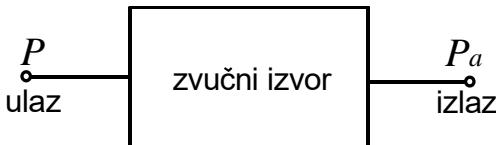
Kao definicija zvučnog izvora moglo bi se reći da je to uređaj ili proces koji generiše zvučnu energiju. Navodi se "uređaj ili proces" zbog toga što zvučna energija može nastajati delovanjem nekog uređaja, to jest "hardvera", ali može nastajati i kao uzgredna pojava u mediju usled dejstva izvesnih fizičkih procesa, što znači bez učešća čvrstih tela. Ova prva vrsta, kada je zvučni izvor neki uređaj, predstavlja deo svačijeg životnog iskustva. U tu kategoriju spadaju zvučnici, muzički instrumenti, razne mašine koje u svom radu stvaraju zvuk i slično. Primer druge vrste, kada neki proces ima ulogu izvora zvuka, može biti električni luk, odnosno električna varnica, gde zvučna energija nastaje tokom proticanja elektriciteta kroz vazduh, ili plamen u kome nastaje prepoznatljiv zvuk koji stvara vatru.

4.1 Osnovni principi rada zvučnog izvora

Svaki izvor stvara zvučnu energiju na račun nekog drugog oblika energije koju dobija iz domena van zvučnog polja. U izvoru se odvija lokalno pretvaranje dovedene energije u mehaničku energiju oscilovanja medija koji okružuje izvor. Zbog toga se svaki zvučni izvor može posmatrati kao jedan pretvarač. Postoji kategorija zvučnih izvora koji se namenski izrađuju da budu pretvarači, odnosno generatori zvuka i kod njih se teži da proces pretvaranja zadovolji neke unapred zadate performanse. Ako se napajaju energijom iz električnog domena nazivaju se elektroakustički pretvarači. Oni su posebna tema koja će biti obrađena kasnije. Najvažniji predstavnici te kategorije izvora su zvučnici i slušalice. Od elektroakustičkog pretvarača može se zahtevati da svojom konstrukcijom

bude što efikasniji, što linearniji, ili da zadovolji neki drugi zahtev koji proizilazi iz planirane primene.

Rad zvučnog izvora kao pretvarača energije, odnosno snage, može se opisati jednostavnom predstavom kao na slici 4.1. Ulagana snaga P , čija vrsta zavisi od prirode izvora, pretvara se u zvučnu snagu P_a u delovima medija koji neposredno okružuju izvor. U nekim zvučnim izvorima proces pretvaranja ulazne energije u zvučnu energiju može biti višestepen. Najbolji primer za to je opet zvučnik u kome se prvo električna energija pretvara u mehaničku energiju kretanja njegove membrane, a zatim se ta energija u membrani, odnosno kretnom sistemu zvučnika pretvara u zvučnu energiju u vazduhu.



Slika 4.1 - Zvučni izvor kao pretvarač

Posmatrajući zvučni izvor kao pretvarač snage sa slike 4.1 može se uvesti pojam koeficijenta korisnog dejstva. On je, po definiciji:

$$\mu = \frac{P_a}{P} \quad (4.1)$$

Karakteristično za zvučne izvore koji rade u vazduhu je veoma mala vrednost koeficijenta korisnog dejstva. Na primer, kod zvučnika njegova vrednost ne prelazi nekoliko procenata. Uzroci takvog stanja posledica su neprilagođenosti izvora i medija u predaji energije, što je kao pojava objašnjeno u drugom poglavljju, i zbog čega je uveden pojam akustičke impedanse.

Fizički mehanizmi generisanja zvuka u vazduhu

Fizički mehanizmi generisanja zvuka u izvoru mogu biti različiti. Postoje četiri osnovna fizička oblika stvaranja zvučne energije:

- vibracije površina krutih tela,
- prinudna pulsiranja vazdušne struje,
- turbulencije u fluidima i
- brza termička dejstva.

U realnim zvučnim izvorima koji se mogu naći u čovekovom okruženju česte su kombinacije dva ili čak tri mehanizma stvaranja zvuka koji deluju istovremeno.

Proces generisanja zvuka vibracijama površine čvrstih tela najbolje se može opisati klipom kojim je ranije opisan nastanak zvuka u vazduhu (slika 1.10). Mehanički poremećaji nastaju sabijanjem i razređivanjem medija dovoljno brzim kretanjem neke tvrde površine. Karakterističan primer ove vrste zvučnih izvora je zvučnik. U istu kategoriju spadaju svi žičani muzički instrumenti sa svojim rezonatorom, zatim udaraljke

i slično. Kada neka mašina zrači zvuk u okolini, on nastaje, između ostalog, vibracijama njenog kućišta. Kada u susednom stanu radi neki izvor zvuka, na primer zvučnik koji reprodukuje glasnu muziku, taj zvuk dospeva u sobu gde se nalazi neki nevoljni slušalac tako što energija iz vazduha susednog stana prelazi u materijal zida, a zatim u vazdušni prostor sobe tog slušaoca. Sa aspekta tog nevoljnog slušaoca kao zvučni izvor funkcioniše površina pregradnog zida koja odvaja prostorije i koja svojim vibracijama stvara zvuk u vazduhu.

Činjenica je da se vibracije raznih tela koje zrače zvuk u čovekovom okruženju samo u nekim okolnostima mogu primetiti ljudskim čulima zbog vrlo malih amplituda. One su primetne samo na najnižim frekvencijama, kao u slučaju kretanja membrane zvučnika koji emituje niske frekvencije, ili vibracije najdebljih žica na žičanim instrumentima koje emituju duboke tonove. U svim drugim okolnostima vibracije koje stvaraju zvukove uobičajenih intenziteta nisu vidljive. Na primer, kretanje membrane zvučnika koji emituje visoke frekvencije (takozvani „visokotonac“) ili vibracije zida iza koga je komšija koji se čuje ne mogu se primetiti ni okom, a ni čulom dodira.

Proces generisanja zvuka prinudnim pulsiranjem vazdušne struje u realizaciji se odvija u dva stepena, odnosno u dva podprocesa. Prvi je stvaranje struje vazduha koji se nalazi u jednolikom kretanju, a drugi je rad nekog mehaničkog sistema koji dovoljno velikom brzinom fizički preseca tu vazdušnu struju. Zbog ovakvog mehanizma rada zvukove koji nastaju karakteriše prepoznatljiva diskretna struktura spektra u kome se prepoznae osnovna frekvencija i mnoštvo viših harmonika. Osnovnu frekvenciju određuje broj presecanja struje vazduha u sekundi. Najznačajniji predstavnik ovakvih izvora zvuka je ljudski glas kada izgovara vokale. Vazdušnu struju stvaraju pluća, a njeno presecanje vrše glasnice otvaranjem i zatvaranjem prolaza tom vazduhu. Takvim radom generiše se talasni oblik pritiska koji ima testerastu formu, zbog čega spektar tog zvuka sadrži pravilan harmonijski niz diskretnih komponenti.

Na istom principu funkcionišu i sirene kao izvori zvuka. U njima se na neki pogodan način stvara struja vazduha, obično nekim ventilatorom, a mehaničko presecanje toka vazduha u najjednostavnijim sirenama realizuje se pomoću dve perforirane ploče, od kojih je jedna nepomična a druga se obrće. Geometrija rasporeda otvora na ove dve ploče podešava se tako da se pri svakom obrtaju rupe na obrtnoj i nepomičnoj ploči određeni broj puta poklope i na trenutak propuste struju vazduha. Talasni oblik tako nastalog zvučnog pritiska blizak je četvrtki, zbog čega karakterističan zvuk sirenne ima samo neparne harmonike. Osnovna frekvencija zavisi od broja obrtaja ploče i broja poklapanja otvora u njima pri svakom okretu.

Turbulencije u fluidu kao način generisanja zvuka mogu nastati fizičkim uticajem prepreka na koje fluid u svom kretanju nailazi. Kada fluid u svom pravolinjskom kretanju naiđe na čvrstu prepreku deo energije tog njegovog kretanja na lokalnom nivou se transformiše u turbulentno kretanje. Svako takvo odstupanje od ravnomernosti proticanja predstavlja mehanički poremećaj i ima oscilatornu prirodu, pa predstavlja zvuk koji se od mesta nastanka dalje širi kroz fluid. U opštem slučaju turbulencije imaju

stohastičku prirodu, pa zvuk koji nastaje ima odlike šuma. Samo u posebim okolnostima, kada je poprečni presek prepreke mali kao na primer žice ili šipke, spektralni sadržaj nastalog zvuka zbog prirode takvih turbulentnih procesa ima diskretnu strukturu, što se onda subjektivno manifestuje kao zviždanje. Takvo zviždanje se po nekada javlja kada vetar nailazi na prepreke u obliku šipki.

Kao i u slučaju prinudnog pulsiranja vazdušne struje, karakterističan predstavnik ove kategorije stvaranja zvuka je ljudski glas. U njemu postoje takozvani "bezvučni" glasovi (na primer "s", "š"), koji nastaju turbulencijama pri nailasku struje vazduha na prepreke na mestu suženja koje se formira zubima i jezikom. Šapat kao posebna vrsta govora u celini nastaje ovakvim načinom generisanja zvuka. Tada zvučna energija nastaje na stegnutim glasnicama koje, umesto da osciluju i time presecaju tok vazduha, postaju prepreka i na njima se javljaju trubulencije. Poznati su primjeri generisanja zvuka na ovaj način i u drugim fluidima osim vazduha. To je, na primer, šuštanje u slavini pri puštanju vode kroz slavinu, isticanje gasova kroz male otvore i slično.

Svi opisani načini generisanja zvuka stvaraju poremećaj u fluidu lokalnim menjanjem njegove gustine. Međutim, ranije je pokazano da zvuk može nastati i lokalnim promenama temperature medija ako se ta promena izvodi dovoljno brzo. Ovu mogućnost definiše jednačina stanja data izrazom (1.1). Karakteristični primjeri zvuka nastalog brzim termičkim dejstvima su tutnjava koja nastaje pri radu gorionika u raznim kotlovim, pucketanje sveće kad gori, prasak električne varnice i slično. Postoje posebno konstruisani izvori zvuka koji rade na principu kontrolisanog zagrevanja vazduha električnim provodnikom kroz koji protiče struja promenljivog intenziteta (takozvani "termofon"). Oni u funkcionalnom smislu rade kao zvučnik, a promena lokalne temperature ostvaruje se strujom kroz provodnik kao signalom. Njihova efikasnost stvaranja zvuka je vrlo mala, ali su korišćeni u laboratorijskim uslovima za neka merenja.

Zvučna snaga izvora

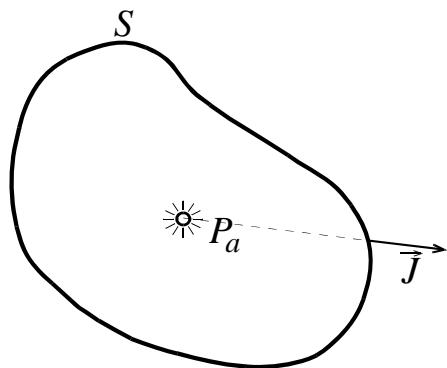
Osnovni kvantifikator rada zvučnog izvora je njegova zvučna snaga. To je snaga P_a sa slike 4.1. Snaga zvučnog izvora definiše brzinu predavanja energije okolnom mediju. Osnovna specifičnost zvučne snage, ako se ona poredi sa definicijom snage u elektrotehnici, je u tome da ne postoji način kojim bi se ona direktno merila ili na drugi način neposredno pratila. Zvučna snaga nekog izvora može se kvantifikovati samo preko posledica koje nastaju u zvučnom polju, i određena je ukupnim efektom u okolnom mediju.

Zvučna snaga se može definisati preko izračene zvučne energije koju bi pri merenju trebalo na neki pogodan način "uhvati". To je teorijski moguće postavljanjem neke zatvorene površine oko izvora i registrovanjem prolaska energije kroz nju pre nego što ode u prostor. Ovakav pristup u određivanju snage zvučnog izvora ilustrovan je na slici 4.2. Na postavljenoj proizvoljnoj zatvorenoj površini oko izvora može se odrediti intenzitet zvučnog talasa. Pošto je po svojoj definiciji intenzitet zvuka fluks snage po jedinici površine talasnog fronta, podatak o snazi izvora moguće je dobiti integrišući

intenzitet po postavljenoj zatvorenoj površini. Ukupna snaga koju emituje zvučni izvor sa slike 1.2, po definiciji je:

$$P_a = \oint_S \vec{J} d\vec{S} \quad (4.2)$$

Izvesnu zabunu ovde mogu izazvati podaci o snazi zvučnika kao zvučnog izvora, kod koga se uvek navodi samo vrednost njegove električne snage koju može da primi. Električna snaga koju zvučnik dobija iz pojačavača dostupna je merenjima i zbog toga se zvučnik kao pretvarač deklariše takvim podatkom. Međutim, treba praviti razliku između te snage i zvučne snage koju on razvija u okolnom mediju. Zbog malog koeficijenta korisnog dejstva zvučnika njegova zvučna snaga je samo par procenata od dovedene električne snage. Ova činjenica često izaziva konfuziju, jer se podatku o električnoj snazi ponekad greškom pripisuje smisao zvučne snage.



Slika 4.2 – Ilustracija uz definiciju zvučne snage: zvučni izvor sa zatvorenom površinom oko njega.

Radi jednostavnosti postavljena zatvorena površina može biti sfera sa izvorom zvuka u njenom centru. Za izvore koji zrače potpuno jednakom na sve strane, takozvane neusmerene izvore, na svim tačkama površine tako postavljene sfere intenzitet zvuka će biti jednak, pa se izraz (4.2) može pojednostaviti. Za slučaj sfere postavljene oko izvora zvuk, i sa jednakim intenzitetom po njenoj površini snaga izvora je:

$$P_a = 4\pi r^2 J \quad (4.3)$$

Ovaj izraz je veoma koristan u praksi jer se može primeniti u mnogim slučajevima, posebno za proceduru merenja zvučne snage realnih izvora. Kasnije će biti pokazana njegova modifikacija ako zračenje zvučnog izvora nije jednakom u svim pravcima.

Nivo zvučne snage

Iz istih razloga zbog kojih je uveden nivo zvuka kao mera stanja u zvučnom polju, i za zvučnu snagu postoji potreba da postoji jedna paralelna logaritamska skala. Tako je definisana veličina koja se naziva nivo zvučne snage koji je po definiciji:

$$L_w = 10 \log \frac{P_a}{P_{a0}} \quad (4.4)$$

U ovom slučaju referentna vrednost P_{a0} je 10^{-12} W to jest 1 pW. Očigledno je da zvučnoj snazi 1 W odgovara nivo zvučne snage 120 dB.

Zvučna snaga realnih izvora u čovekovom okruženju kreće se u veoma širokim granicama. Ono što je karakteristično je da normalni zvučni izvori koji postoje u svakodnevnom čovekovom okruženju imaju relativno male zvučne snage. Tako je snaga reda veličine 1 W veoma velika vrednost i zvučni izvori koji stvaraju takvu snagu proizvode zvukove u svojoj blizini koje čovek subjektivno doživljava kao veoma jake. Istovremeno, zvučni izvori čija je snaga 10^{-6} W i manje proizvode zvukove koji su dovoljno čujni u njihovoj neposrednoj okolini. Ovi podaci pokazuju da su snage koje se sreću u akustici značajno manje od uobičajenih snaga, na primer u električnim kolima ili u mehaničkim uređajima.

Tabela 4.1 - Podaci o zvučnim snagama i nivoima snage nekih realnih izvora zvuka.

zvučna snaga (W)	nivo snage (dB)	primer izvora
100.000.000	200	motor najvećih raket nosača
.....	
10.000	160	motori mlaznih aviona
1.000	150	
100	140	
10	130	simfonijski orkestar
1	120	
0,1	110	
0,01	100	automobil na ravnom putu
0,001	90	
0,0001	80	neki usisivači
0,00001	70	veoma jak ljudski glas
0,000001	60	
0,0000001	50	
0,00000001	40	šapat
0,000000001	30	
0,0000000001	20	najtiši šapat

Da bi se sagledali okviri u kojima se kreće red veličine zvučne snage raznih realnih zvučnih izvora u Tabeli 4.1 su prikazani podaci za neke karakteristične zvučne izvore. Uporedo su prikazani podaci o snazi u W i o nivou snage u dB. Vidi se da čak i zvučni izvori snage reda veličine 10^{-6} W generišu zvukove koji su čujni (šapat). S druge strane, najmoćniji uzvori kontinualnog zvuka koje je čovek stvorio su motori velikih raket nosača.

Impedansa zračenja

Koncept impedanse u akustici, koji je ranije opisan, može se primeniti i za modelovanje procesa zračenja zvučnog izvora i njegovu predaju energije okolnom mediju. Na površini izvora odvija se proces nastanka deformacije u mediju i prelazak energije na okolne

čestice. Ta pojava se može posmatrati na uopšten način kao odnos generatora energije i potrošača u jednom dinamičkom sistemu. Primena koncepta impedansi može pomoći u modelovanju tog procesa. Efikasnost procesa predavanja energije mediju zavisi od međusobnog odnosa ta dva elementa, odnosno njihove međusobne prilagođenosti.

Unutrašnja sila u izvoru zvuka vrši rad, odnosno generiše pomeraj okolnih čestica i tako mediju predaje energiju. Posmatrajući sliku 4.2 rezultat tog procesa ocenjuje se na osnovu zvučne snage koja bi se dobila integraljenjem intenziteta po zatvorenoj površini postavljenoj negde u prostoru oko izvora, i to predstavlja sliku efekta rada izvora koji stvara zvučno polje u prostoru. Kada se posmatra zvučni izvor kao generator energije što odlazi u prostor intenzitet koji se registruje na zatvorenoj površini sa slike 4.2 pokazuje potrošenu energiju jer to stvara efekat u zvučnom polju.

Talasni front koji nastaje neposredno na površini izvora odmah počinje da se širi, odnosno rasteže. Intenzitet rastezanja talasnog fronta obrnuto je сразмеран rastojanju od površine izvora. Pojava rastezanja površine talasnog fronta podrazumeva da postoji komponenta brzine čestica koja je normalna na pravac udaljavanja talasa. Njeno postojanje indicira da postoji neka sila koja vrši "rastezanje" nastalog talasnog fronta, i na tu silu odlazi deo energije izvora. Ukratko, deo izražene energije ne udaljava se od izvora, već deluje normalno na pravac prostiranja talasnog fronta. Što je to rastezanje intenzivnije, to je veći procenat izražene energije angažovan u tom procesu. Preostali deo energije odlazi u prostor i utiče na formiranje zvučnog polja koje se može konstatovati na nekom rastojanju.

Deo energije od koje potiče sila rastezanja ne utiče na zvučno polje koje će izvor stvarati u prostoru, to jest ne učestvuje u stvaranju intenziteta na površini sa slike 4.2 i ne vidi se u izraženoj snazi izvora. Izvor stvara brzinu oscilovanja molekula koja ima dve ortogonalne komponente. Jedna je kolinearna sa pravcem širenja talasnog fronta i određuje pritisak, a druga je normalna na nju (u kvadraturi) i predstavlja brzinu širenja talasa, odnosno "razmicanje" energije pri širenju. Ako je širenje talasa na površini izvora veoma naglo, velika brzina oscilovanja površine izvora je potrebna da se stvari relativno mali pritisak u prostoru oko izvora. Na osnovu ovoga može se zaključiti da se u energiji koju izvor predaje okolnom mediju prepoznaju dve komponentne od kojih samo jedna određuje zvučno polje. Na osnovu toga se rad izvora mora modelovati tako da on bude opterećen "potrošačem" čija impedansa ima realni i imaginarni deo.

Zračenje izvora zvuka je jedan od onih slučajeva gde je pogodnije posmatrati proces globalno, preko ukupne energije izvora odnosno njegovog akustičkog protoka, nego lokalno preko specifične impedanse po površini koja zrači. Ova pogodnost akustičke impedanse ranije je objašnjena za slučaj zvukovoda promenljivog preseka sa slike 2.7. U slučaju realnih zvučnih izvora zbivanja na njegovoj površini mogu se menjati od tačke do tačke, pa bi posmatranje pojave preko specifične impedanse talasa na površini izvora bilo relativno složeno i vodilo ka integraciji procesa po čitavoj površini, koja može biti i nepravilna i sa različitim stanjima. Zbog toga je prirodno da se modelovanje zračenja izvora bazira na konceptu akustičke impedanse.

Sa takvim pretpostavkama uvodi se pojam impedanse zračenja zvučnog izvora:

$$\underline{Z}_{az} = \frac{\underline{P}}{\underline{q}} \quad (4.5)$$

gde je \underline{P} zvučni pritisak na površini izvora, a \underline{q} protok koji on stvara. Ova impedansa je kompleksna, pa se može pisati da je:

$$\underline{Z}_{az} = R_{az} + jX_{az} \quad (4.6)$$

Realna komponenta te impedanse naziva se otpornost zračenja i njome se modeluje "trošenje" energije od koje nastaje zvučno polje u prostoru, odnosno stvara zvučni pritisak u okruženju. U proceduri merenja po zatvorenoj površini oko izvora taj deo energije daje merljivu zvučnu snagu izvora. Snaga zračenja definiše se kao:

$$P_a = q^2 R_{az} \quad (4.7)$$

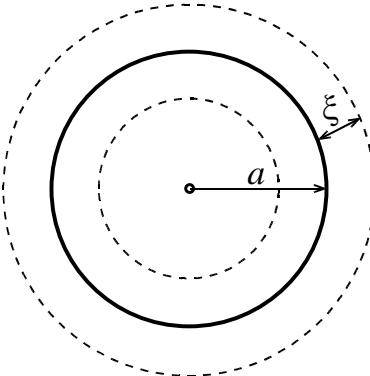
Vidi se da postoji formalna analogija ovog izraza sa snagom u električnim kolima ($R i^2$), pri čemu je protok q na mestu struje, a otpornost zračenja je na mestu termogene otpornosti u električnom kolu.

4.2 Tačkasti izvor zvuka (tačkasti monopol)

Najjednostavniji izvor zvuka koji se može zamisliti bila bi jedna zona veoma malih dimenzija u kojoj nastaje zapreminski pomeraj fluida. Ovakav izvor beskonačno malih prostornih dimenzija poznat je u teoriji kao tačkasti izvor zvuka, a naziva se još i tačkasti monopol, ili samo kratko monopol. To je po svojoj suštini jedan idealizovan teorijski model, ali ta jednostavnost omogućava da se njegov rad opiše prostim matematičkim relacijama. U realnosti rad realnih izvora zvuka konačnih dimenzija pod izvesnim uslovima može se aproksimirati takvim idealnim tačkastim izvorom, pa se u tome ogleda njegov značaj.

Zbog zanemarljivih dimenzija tačkastog izvora zvučno polje koje oko njega nastaje sferno je simetrično, sa izvorom u centru te sfere. U beskonačnom homogenom mediju tačkasti izvor stvara sferne talase koji su definisani ranije rešenjem talasne jednačine. U slučaju da medij nije beskonačan i da se u okruženju izvora pojavi neka refleksija, onda zvučno polje na površini izvora postaje složenije i ne zavisi samo od rada izvora, već i od okruženja koje je generisalo tu refleksiju.

Kao jedan hipotetički model tačkastog izvora može se posmatrati pulsirajuća sfera proizvoljnog poluprečnika, pri čemu se u analizi pretpostavlja da njen poluprečnik teži nuli. Šematska ilustracija pulsirajuće sfere prikazana je na slici 4.3. Pulsirajuća sfera generiše zvuk tako što njen poluprečnik pulsira u ritmu signala kojim se izvor pobuđuje. Pulsiranje se opisuje pomerajem ξ . Pretpostavlja se da je pomeraj mnogo manji od poluprečnika sfere a , čime je stvorena pretpostavka linearnosti procesa generisanja zvuka.



Slika 4.3 - Pulsirajuća sfera poluprečnika a sa pobudom pomeraja ξ

Izlazna veličina zvučnog izvora je brzina kretanja površine sfere v i ona u potpunosti definiše njegov rad. Pri svakom modelovanju rada izvora ta brzina predstavlja zadatu veličinu. Akustički protok koga stvara pulsirajuća sfera je:

$$q = S v = 4\pi a^2 v \quad (4.8)$$

Analitički izraz zvučnog talasa koga stvara pulsirajuća sfera mora imati oblik koji odgovara rešenju talasne jednačine za sferni talas. Pri uvedenoj pretpostavci da je medij u koji se širi generisani zvučni talas beskonačan, onda u njemu postoji samo progresivan talas i nema reflektovanih komponenti. Pretpostavljajući harmonijsku pobudu kompleksna amplituda pritiska je:

$$\hat{p} = \frac{A}{r} e^{-jkr} \quad (4.9)$$

Polazeći od ovako definisanog zvučnog polja moguće je utvrditi uslove koji postoje na samoj površini sfere. Stavljajući u izrazu (4.9) da je $r = a$, dobija se opšti izraz koji definiše kompleksnu amplitudu pritiska na površini sfere:

$$\hat{p} = \frac{A}{a} e^{-jka} \quad (4.10)$$

Impedansa talasa na površini pulsirajuće sfere

Ranije je pokazano da je specifična impedansa sfernog talasa u opštem slučaju:

$$\underline{Z}_s = R_s + jX_s = \frac{\rho ck^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + j \frac{\rho ckr}{1 + k^2 r^2} \quad (4.11)$$

Vrednost specifične impedanse na samoj površini pulsirajuće sfere može se dobiti zamenom u gornjem izrazu $r = a$, pa je:

$$\underline{Z}_s(r = a) = \frac{\rho ck^2 a^2}{1 + k^2 a^2} + j \frac{\rho cka}{1 + k^2 a^2} \quad (4.12)$$

Talasna impedansa sfernih talasa za $r = a$ predstavlja ono što "vidi" pulsirajuća sfera na svojoj površini kao opterećenje na svakoj tački svoje površine. Odnos između izvora i

okoline određen je ukupnim efektom talasa čija je impedansa definisana izrazom (4.12). Odnos specifične impedanse talasa i akustičke impedanse ranije je definisan izrazom (2.48), pa je akustička impedansa zračenja koja opterećuje pulsirajuću sferu kao izvor u celini:

$$\underline{Z}_{az} = \frac{1}{S} \underline{Z}_s(r=a) \quad (4.13)$$

Prema tome, impedansa zračenja pulsirajuće sfere je, u opštem slučaju:

$$\underline{Z}_{az} = \frac{\rho ck^2}{2\pi(1+k^2a^2)} + j \frac{\rho ck}{2\pi a(1+k^2a^2)} \quad (4.14)$$

Smatrajući pulsirajuću sferu kao jedan opšti model zvučnog izvora i proširujući zaključak dobijen na njenom primeru vidi se da impedansa kojom je opterećen neki zvučni izvor u opštem slučaju zavisi od karakteristika medija, što je definisano proizvodom ρc , od veličine izvora ovde predstavljene poluprečnikom a , i od frekvencije koja je sadržana u talasnom broju $k = \omega / c$.

Snaga zračenja tačkastog izvora

Ako se prepostavi da su dimenzije zvučnog izvora mnogo manje od talasne dužine, onda važi relacija $ka \ll 1$. Ova relacija se može transformisati u uslov:

$$\frac{2a}{\lambda} \ll 1 \quad (4.15)$$

odnosno:

$$2a \ll \lambda \quad (4.16)$$

U slučaju realnih zvučnih izvora uslov definisan izrazom (4.16) zadovoljen je na dovoljno niskim frekvencijama. Može se reći da svaki zvučni izvor ima neku oblast dovoljno niskih frekvencija u kojoj je takav uslov ispunjen.

Za slučaj kada važi da je $2a \ll \lambda$, odnosno kada je izvor dovoljno mali u odnosu na talasnu dužinu, vrednost otpornosti zračenja se pojednostavljuje u odnosu na izraz (4.14) i postaje:

$$R_{az} = \frac{\rho c k^2}{4\pi} \quad (4.17)$$

Snaga zračenja je definisana kao proizvod kvadrata akustičkog protoka i termogenog dela akustičke impedanse zračenja, to jest:

$$P_a = q_o^2 R_{az} \quad (4.18)$$

Zamenom se dobija da je snaga zračenja izvora:

$$P_a = q_o^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi(1+k^2 a^2)} \quad (4.19)$$

Za slučaj tačkastog izvora snaga je:

$$P_a = q_o^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi} \quad (4.20)$$

Vidi se da za izvor dovoljno malih dimenzija u odnosu na talasnu dužinu snaga zračenja zavisi samo od protoka q , a ne i od njegovih dimenzija.

Zamenom izraza (4.8) za akustički protok u izraz (4.20) dobija se

$$P_a = q_o^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi} = \frac{\omega^2 S_o^2 v_o^2 \rho}{4\pi c} \quad (4.21)$$

U gornjem izrazu v_o je brzina na površini izvora, a S_o je površina izvora. Ako se pretpostavi da izvor emituje čist sinusni zvuk, onda gornji izraz postaje:

$$P_a = \frac{\omega^4 S_o^2 \xi^2 \rho}{4\pi c} \quad (4.22)$$

Ovde ξ označava amplitudu pomeraja površine izvora.

Na osnovu izraza (4.22) može se detaljnije objasniti od čega sve zavisi snaga koju razvija zvučni izvor. Vidi se da je ona funkcija frekvencije, površine i pomeraja. Odatle se mogu izvesti važni zaključci o radu realnih izvora, što je u praksi pre svega značajno za razumevanje rada zvučnika kao najrasprostranjenijeg zvučnog izvora u telekomunikacijama i audio sistemima. Ako je brzina oscilovanja površine izvora koju generiše neka njegova unutrašnja sila zadata veličina, onda važi sledeće:

- ista snaga koju razvija zvučni izvor može se ostvariti pravljenjem većih pomeraja sa manjim dimenzijama izvora, to jest manjom površinom, ili obrnuto;
- pri višim frekvencijama za istu snagu potreban je manji pomeraj površine izvora, odnosno manja površina.

Ako se ovi zaključci izvedeni iz izraza (4.22) primene na zvučnike, jasno je da zvučnici zadate snage koji emituju niže frekvencije moraju imati veće površine membrane u odnosu na one koji emituju visoke frekvencije. To takođe znači i da će neku zadatu snagu zvučnik koji emituje niske frekvencije ostvarivati pri većim pomerajima membrane od zvučnika koji emituje visoke frekvencije. Sve su to iskustveno poznate činjenice koje se lako konstatuju posmatranjem zvučnika i njihovog rada. Pokazano izvođenje samo egzaktno objašnjava te činjenice.

Shodno definiciji zvučne snage intenzitet zvuka koga stvara tačkasti izvor zvuka na nekom rastojanju r je:

$$J = \frac{P_a}{4\pi r^2} \quad (4.23)$$

Odavde se, pomoću izraza (2.32), dobija da je pritisak na dovoljno velikom rastojanju od izvora r :

$$p = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{P_a \rho c}{4\pi}} \quad (4.24)$$

Ova dva izraza dobijeni su za slučaj tačkastog izvora modelovanog pulsirajućom sferom, ali se u mnogim praktičnim okolnostima mogu dovoljno tačno primeniti i na realne zvučne izvore konačnih dimenzija.

4.3 Izvori sa usmerenim zračenjem

Zvučni izvori koji potpuno jednako zrače u svim pravcima predstavljaju u izvesnom smislu izuzetak. Realni izvori samo pod određenim uslovima ili u ograničenom frekvencijskom opsegu mogu imati takvo zračenje, dok u opštem slučaju zrače različito u različitim pravcima. Pojava nejednakog zračenja po pravcima naziva se usmerenost zvučnog izvora. Posledica usmerenosti je pojava da pri istoj udaljenosti od izvora na površini talasnog fronta zvučni pritisak neće biti jednak u svim pravcima. Te razlike su posledica načina zračenja samog izvora i predstavljaju njegovu karakteristiku. Može se načelno reći da usmerenost zračenja nastaje usled prirode fizičkih procesa na površini izvora i uticaja konačnosti njegovih dimenzija.

Kod mnogih usmerenih izvora postoji jedan pravac u kome je njihovo zračenje dominantno, odnosno u kome je zvučni pritisak koga stvaraju najveći. Taj pravac se naziva osa zvučnog izvora. Ova osa se najčešće poklapa sa nekim fizički prepoznatljivim pravcem koji je uočljiv u obliku ili konstrukciji izvora. Na primer, osa zvučnika u kome je zračenje najjače poklapa se sa simetralom njegove membrane. Postoje takođe izvori kod se kojih maksimum zračenja menja po frekvencijama. Najzad, mnogi prirodni izvori zvuka u čovekovom okruženju nemaju izražen dominantan pravac zračenja, već se promene intenziteta zračenja po pravcima formiraju na složene načine.

Faktor smera

Osnovna veličina kojom se definiše usmerenost zvučnog izvora naziva se faktora smera. Po definiciji, faktor smera je:

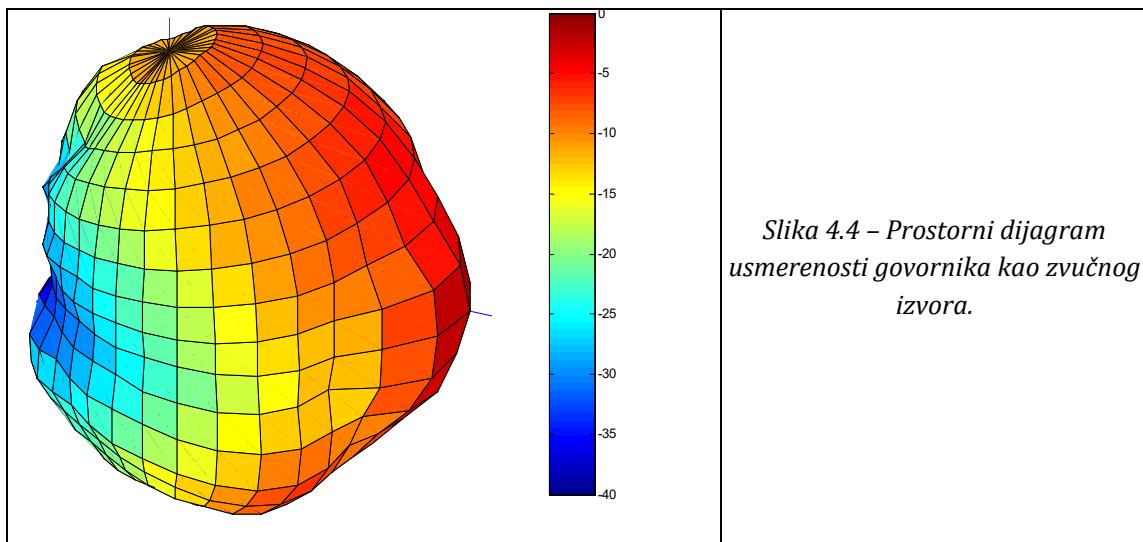
$$\Gamma = \frac{p(\theta)}{p(\theta = 0)} \quad (4.25)$$

gde je $p(\theta)$ pritisak koga izvor stvara pod nekim uglom θ u odnosu na osu. Vidi se da faktor smera pokazuje promenu zvučnog pritiska po pravcima, relativno u odnosu na pritisak koji postoji u osi izvora ($\theta = 0$). Dijagram faktora smera naziva se karakteristika usmerenosti. Pošto se u praksi sva merenja u zvučnom polju zasnivaju na nivou zvuka a ne na pritisku, iz praktičnih razloga je uobičajeno da se usmerenosti zvučnih izvora predstavlja u logaritamskoj razmeri. To znači da se crta dijagram $20 \log \Gamma$.

Usmerenost zvučnog izvora kao fizička pojava po svojoj prirodi je trodimenzionalna. To znači da se promena intenziteta zračenja dešava u prostornim koordinatama, pa se i usmerenost izvora mora sagledavati u prostoru. Međutim, činjenica je da prikazivanje trodimenzionale usmerenosti u ravni slike predstavlja relativno delikatan zadatak. Jedan primer je prikazan na slici 4.4. Ovakva vrsta predstavljanja usmerenosti ne daje dovoljno informacija o detaljima, čak i kada je varijacija usmerenosti relativno jednostavna, kao u prikazanom slučaju. Zbog toga se prikazivanje vrši dijagramima koji se dobijaju kao krive u ravni dobijene presekom prostorne usmerenosti sa vertikalnom i horizontalnom ravninom, a po potrebi i u drugim karakterističnim ravninama postavljenim kroz izvor.

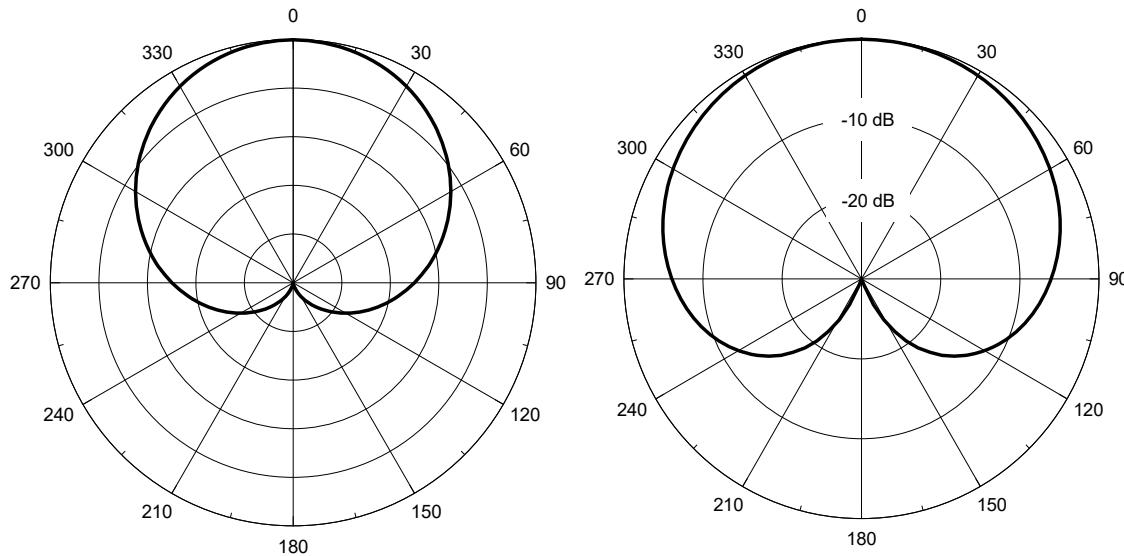
Ovakav prikaz usmerenost u linearnoj i logaritamskoj razmeri pokazan je na slici 4.5. U linearnoj razmeri opseg u kome se predstavlja faktor smera uvek je isti: od 0 do 1. Međutim, kada se isti dijagram predstavlja u logaritamskoj razmeri, opseg u kome se crta dijagram nije fiksani već se u svakom konkretnom slučaju bira. Taj izbor utiče na oblik nacrtane krive (videti tekst u okviru).

Snaga zračenja uzmerenog izvora može se, po definiciji, ustanoviti postavljanjem zatvorene površine oko izvora, pa je:



$$P_a = \oint_S J dS = J_0 \oint_S \frac{J_\theta}{J_0} dS = J_0 \oint_S \Gamma^2 dS \quad (4.26)$$

Ovde je J_θ intenzitet u pravcu određenom uglom θ , a J_0 u pravcu ose izvora. Prema tome, za definisanje rada usmerenog izvora potrebno je poznavati njegov učinak u pravcu ose i karakteristiku usmerenosti.



Slika 4.5 - Dijagram usmerenosti jednog izvora prikazan kao crtež faktora smera (levo) i u logaritamskoj razmeri (desno). Prikazani tip faktora smera naziva se kardiodidna usmerenost.

Izražavanje usmerenosti jednim brojem

U mnogim okolnostima kada se rešavaju neki praktični problemi nije potrebno detaljno poznavanje usmerenosti zvučnog izvora, već je dovoljno imati neke redukovane podatake o efektima koje ta usmerenost ostvaruje. Karakterističan primer za to je kada je u radu izvora relevantno samo šta on ostvaruje u uskoj zoni prostora oko pravca ose, kao što je to na primer kod zvučnika. U takvim slučajevima postoji potreba da se usmerenost zvučnih izvora izrazi na neki pojednostavljen način, po mogućnosti jednobrojnom veličinom. U tom cilju definisano je nekoliki takvih jednobrojnih parametara.

Ako se kao površina oko izvora u izrazu (4.9) postavi sfera poluprečnika r , onda je:

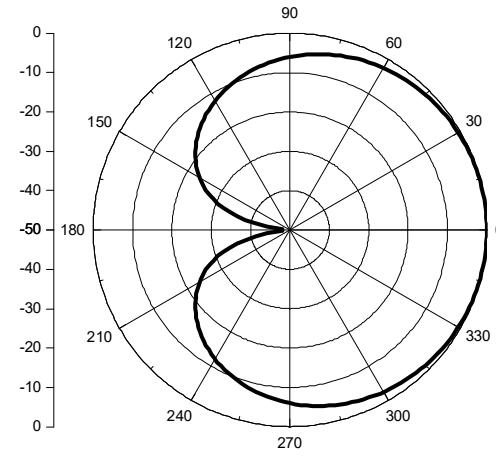
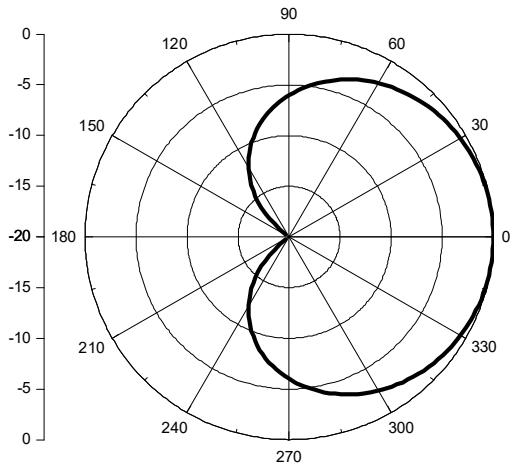
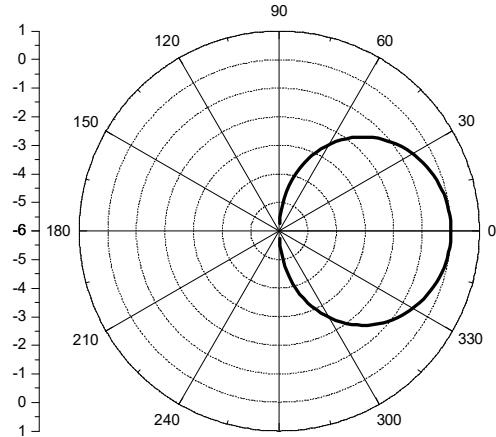
$$P_a = r^2 J_0 \int_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega \quad (4.27)$$

Izraz ispod integrala je jednobrojna veličina koja se naziva efektivni prostorni ugao zračenja usmerenog izvora:

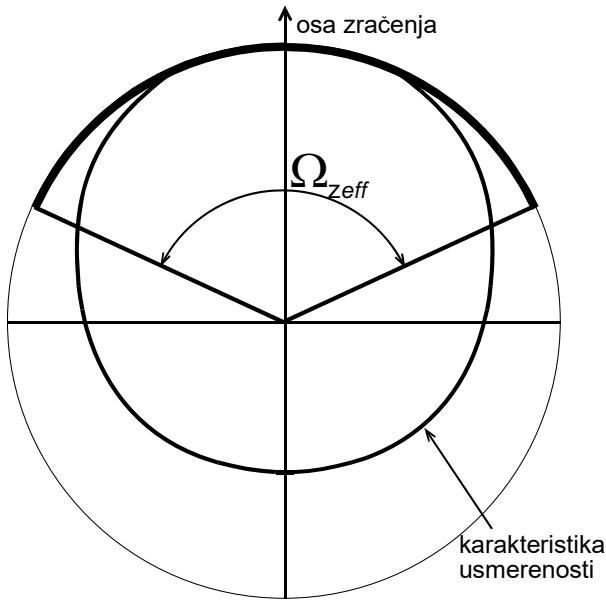
$$\Omega_{Zeff} = \int_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega \quad (4.28)$$

Kod prikazivanja dijagrama usmerenosti u logaritamskoj razmjeri, kada se usmerenost izražava u decibelima, oblik dijagrama se može menjati u zavisnosti od toga kako se odabere razmjeru duž polarne ose. Kao ilustracija ovoga prikazan je jedan isti dijagram (to je kriva sa slike 4.5) nacrtan u tri različine razmere:

- od 0 dB do -6 dB
- od 0 dB do -20 dB i
- od 0 dB do -50 dB.



Fizički smisao efektivnog prostornog ugla zračenja objašnjen je na slici 4.6, gde je ucrtana neka prepostavljena karakteristika usmerenosti zvučnog izvora. Efektivni prostorni ugao je onaj ugao u kome bi se snagom koju emituje izvor moglo ostvariti konstantno zračenje jednako onom koje on ima u pravcu ose, pod prepostavkom da se izvrši "skupljanje" zračenja i koncentracija energije koja se sbog usmerenosti zrači nejednakost širi na sve strane (ovaj crtež je u ravni, ali se sužavanje zračenja dešava u prostoru, pa tako treba razumeti prikazanu ilustraciju). Kod neusmerenih izvora njegova vrednost je 4π steradijana, to jest nikakva koncentracija energije nije moguća jer je zračenje konstantno po svim pravcima. Što je izvor usmereniji, efektivni prostorni ugao zračenja je manji.



Slika 4.6 - Dijagram kao ilustracija definicije efektivnog prostornog ugla zračenja.

Efektivni prostorni ugao zračenja je veličina koja se izražava u steradijanim, pa iz njegove vrednosti nije neposredno očigledno kolika je usmerenost nekog izvora. Zbog toga je uvedena jedna izvedena veličina koja se naziva faktor usmerenosti. Njegova vrednost je, po definiciji:

$$\gamma = \frac{4\pi}{\Omega_{z\text{eff}}} \quad (4.29)$$

Vidi se da vrednost faktora usmerenosti predstavlja rezultat poređenja efektivnog prostornog ugla posmatranog zvučnog izvora sa neusmerenim izvorom, kod koga je vrednost prostornog ugla zračenja 4π . Jasno je da je za neusmereni izvor $\gamma = 1$. Što je izvor usmereniji, to je vrednost faktora usmerenosti veća. Faktor usmerenosti ima svoj logaritamski ekvivalent koji se naziva indeks usmerenosti. Njegova vrednost je, po definiciji:

$$G = 10 \log \gamma \quad (4.30)$$

Jasno je da je indeks usmerenosti neusmerenog izvora 0 dB. Indeks usmerenosti se često koristi za izražavanje usmerenosti zvučnika i zvučničkih sistemima.

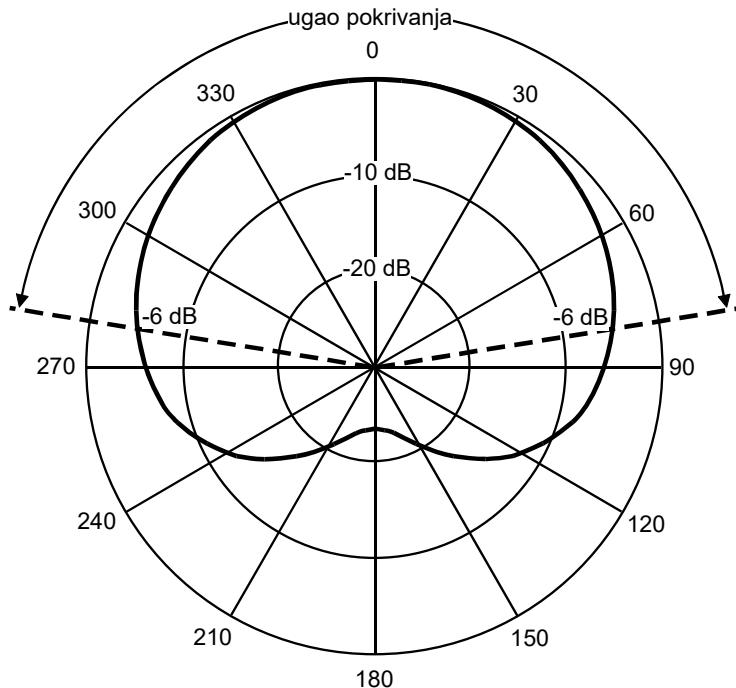
Intenzitet koga na rastojanju r stvara usmereni zvučni izvor u pravcu ose proizilazi iz ranije pokazane relacije za snagu usmerenog izvora:

$$J_0 = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2} \quad (4.31)$$

Kada se ovaj izraz prevede u logaritamski oblik, dobija se praktičan izraz:

$$L_0 = L_w + G - 20 \log r - 11 dB \quad (4.32)$$

gde je L_0 nivo zvuka koga izvor stvara na rastojanju r , L_0 je njegov nivo snage, a konstanta na kraju desne strane izraza potiče od člana $10 \log(4\pi)$. Iz ovih izraza je očigledna razlika između efekta koji bi stvarali jedan usmereni i jedan neusmereni zvučni izvor koji imaju istu zvučnu snagu. Usmereni izvor će zadatom snagom stvarati viši nivo zvuka u pravcu ose na račun smanjenog zračenja u ostalim pravcima, dok neusmereni izvor "rasipa" svoju snagu na sve strane. Ovakav odnos čini da se, na primer, u ozvučavanju dominantno koriste sistemi zvučnika koji imaju izvesnu usmerenost, a kojom će se minimizirati zračenje u pravcima u kojima nema slušalaca.



Slika 4.7 - Dijagram koji ilustruje definiciju ugla pokrivanja izvora (u pokazanom primeru to je oko 160°).

Za opisivanje usmerenosti zračenja zvučničkih sistema koji su namenjeni ozvučavanju uveden je parametar koji se naziva ugao pokrivanja ili ugao zračenja. To je onaj ugao oko ose zračenja, levo i desno, u kome nivo zvuka opadne za 6 dB u odnosu na zračenje u pravcu ose (gde je ono kod zvučnika po definiciji maksimalno). Ilustracija ugla pokrivanja prikazana je na slici 4.7 na primeru neke pretpostavljene krive usmerenosti. Granica smanjenja nivoa zračenja od 6 dB u odnosu na maksimum koji se ostvaruje u pravcu ose usvojena je zbog toga što to dalje znači da je zračenje zvučnika u okviru definisanog ugla pokrivanja u opsegu ± 3 dB. To su uobičajene granice tolerancije odstupanja pri definisanju, na primer, frekvencijskog opsega prenosnih sistema u elektrotehnici.

5. SLOŽENI ZVUČNI IZVORI

Svi realni zvučni izvori koji se nalaze u čovekovom okruženju razlikuju se u manjoj ili većoj meri od idealizovanog modela tačkastog izvora prikazanog u prethodnom poglavlju. U većem delu opsega čujnih frekvencija realni izvori imaju konačne fizičke dimenzije u poređenju sa talasnom dužinom. Talasni front na površini takvih izvora nema idealni oblik sfere i ne može se opisati jednostavnim rešenjem talasne jednačine za sferni talas kao u pokazanom slučaju pulsirajuće sfere. Posledica konačnosti veličine realnih izvora je usmerenost. Tek sa dovoljnim udaljavanjem od takvih izvora njihov talas poprima jednostavnije forme, da bi na dovoljno velikom rastojanju dobio osobine ravnog talasa.

Ipak, pokazani jednostavni model tačkastog izvora, odnosno rezultati izvedeni za primer pulsirajuće sfere, mogu poslužiti i za modelovanje rada realnih izvora. Naime, složeni zvučni izvori mogu se za potrebe analize dekomponovati u skup tačkastih izvora postavljenih na međusobno bliskim rastojanjima, i koji pri tome zrače koherentne signale. Tako se zvučno polje koje nastaje oko nekog realnog izvora može predstaviti kao rezultat superponiranja polja koje pojedinačno stvara skup tačkastih izvora postavljenih po zračećoj površini .

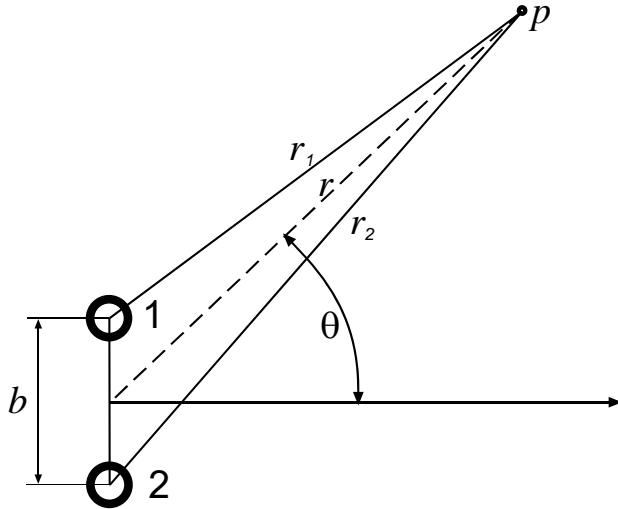
5.1 Grupe tačkastih zvučnih izvora

Kada se dva ili više tačkastih zvučnih izvora grupišu na međusobno malim rastojanjima tako da rade zajedno, kao rezultat se dobija složen izvor čije se ukupno zračenje razlikuje od zračenja jednog tačkastog izvora. Osnovna pojava koja se javlja pri tome je usmeravanje zračenja. Usmerenost takvih složenih izvora nastaje zbog toga što u prostoru oko njih dolazi do superponiranja onoga što pojedini izvori zrače. U nekim jednostavnim slučajevima moguće je analitički pokazati kako izgleda zvučno polje u njihovoј okolini.

Zračenje grupe od dva tačkasta izvora

Najjednostavniji slučaj složenog zvučnog izvora sastoji se od samo dva tačkasta izvora postavljena na nekom međusobnom rastojanju b . Takva grupa šematski je prikazana na slici 5.1. Pretpostavlja se da ova dva izvor rade u fazi. Zvučno polje ovakvog složenog izvora posmatra se samo u takozvanom dalekom polju, što znači da je u svim tačkama posmatranja zadovoljen uslov $r \gg b$. Za ovaku grupu od dva izvora definiše se osa koja

prolazi kroz sredinu njihovih rastojanja, kao što je ucrtano na slici. Pravac u odnosu na usvojenu osu izvora definiše se uglom θ .



Slika 5.1 – Grupa dva tačkasta izvora

U slučaju dalekog polja, to jest za velike vrednosti r važi relacija:

$$\underline{r}_1 = \underline{r}_2 = \underline{r} \quad (5.1)$$

Ranije je pokazano da je u sfernom talasu pritisak na rastojanju r od izvora definisan izrazom:

$$\underline{p} = \frac{\underline{A}}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (5.2)$$

što se za potrebe dalje analize može pojednostaviti kao:

$$\underline{p} = \underline{C} e^{-jkr} \quad (5.3)$$

Zbog jednostavnosti izraza ovde je u okviru kompleksne konstante \underline{C} uključeno sve što se nalazi ispred eksponencijalnog člana zavisnog od vremena. Pritisci koje stvaraju dva izvora u posmatranoj tački prostora su:

$$\begin{aligned} \underline{p}_1 &= \underline{C} e^{-j(kr - \frac{kb}{2} \sin \theta)} \\ \underline{p}_2 &= \underline{C} e^{-j(kr + \frac{kb}{2} \sin \theta)} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Ukupni pritisak u tački posmatranja je fazorski zbir:

$$\underline{p} = \underline{p}_1 + \underline{p}_2 \quad (5.5)$$

odnosno:

$$\underline{p} = 2\underline{C} e^{-jkr} \cos\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right) \quad (5.6)$$

U ovom izrazu mogu se razlikovati dva člana. Prvi član $\underline{p} = 2\underline{C} e^{-jkr}$ je dvostruka vrednost pritiska koga stvara samo jedan izvor. Drugi član, unutar kosinusa, funkcija je ugla u odnosu na usvojenu osu izvora i predstavlja faktor smera Γ ovog složenog izvora. Prema tome, zvučno polje oko grupe koju čine dva izvora definisano je izrazom:

$$\underline{p} = 2\underline{p}_1 \Gamma(\theta) \quad (5.7)$$

Vidi se da grupa od samo dva tačkasta izvora zrači usmereno, iako su oba izvora, svaki za sebe, neusmereni. Iz izraza (5.6) se vidi da je izračunati faktor smera funkcija odnosa b/λ . Na frekvencijama na kojima je razmak između izvora b mali u odnosu na talasnu dužinu zračenje grupe je neusmereno, a sa porastom frekvencije pojavljuje se usmeravanj zračenja.

Akustički dipol

Akustički dipol je sistem koji se sastoji od dva tačkasta izvora poput onih sa slike 5.1, ali koji imaju međusobno protivfazno zračenje. Za njihove protoke važi:

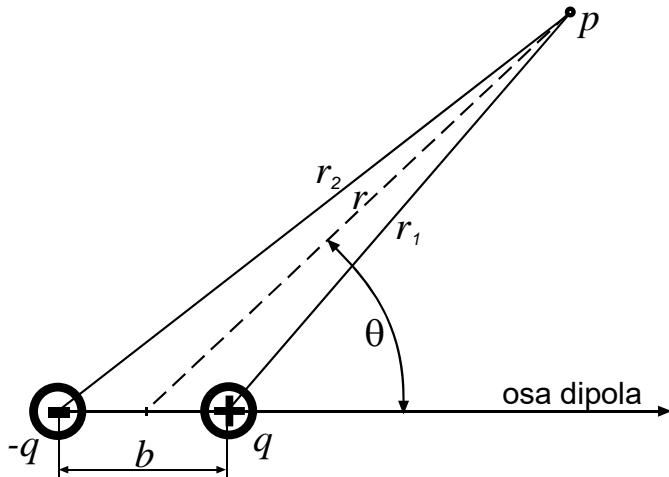
$$q_2 = -q_1 \quad (5.8)$$

Akustički dipol je prikazan na slici 5.2. Radi jednostavnosti osa dipola je definisana tako da se njen pravac poklapa sa linijom na kojoj se nalaze izvori, kao što je prikazano na slici. I u slučaju dipola u dalekom polju, to jest pri dovoljno velikom rastojanju r , amplitude pritisaka p_1 i p_2 približno su jednake, pa su varijacije rezultantnog pritiska posledica samo razlike u fazama, odnosno usled putne razlike. Sa slike se vidi da je ta putna razlika funkcija ugla θ .

Primenjujući postupak analize kao u prethodnom slučaju grupe od dva izvora može se pokazati da je faktor smera akustičkog dipola:

$$\Gamma = \cos \theta \quad (5.9)$$

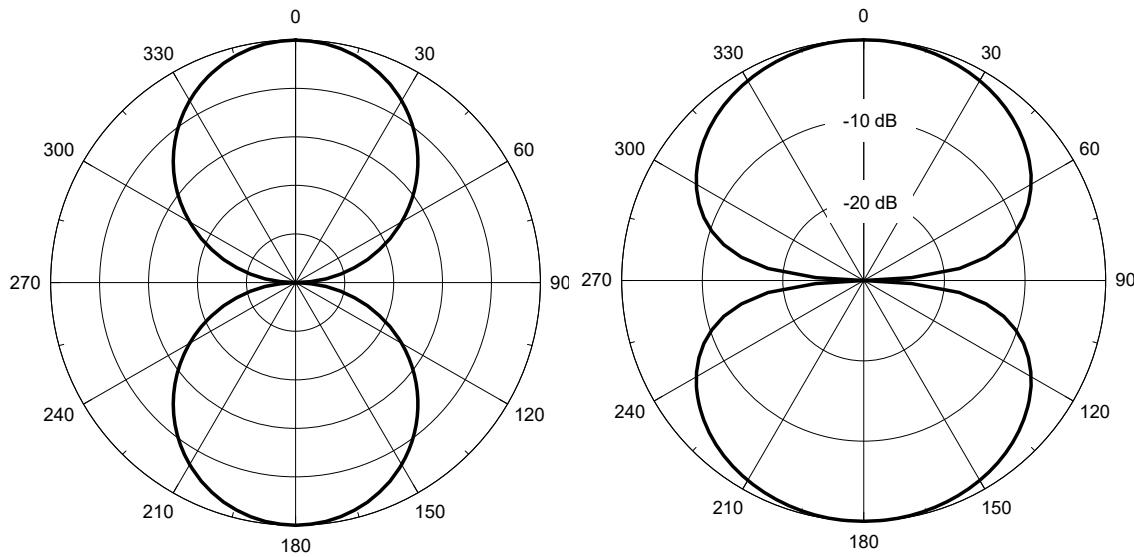
Ovaj oblik faktora smera je osnovna osobina dipola zbog koje on predstavlja jednu karakterističnu pojavu u akustici. Izgled njegove usmerenosti, definisane izrazom (5.9), prikazan je na slici 5.3. Radi poređenja, isti dijagram nacrtan je u linearnej i u logaritamskoj razmeri. I ovde se vidi razlika u obliku koja nastaje samo promenama načina crtanja (smer ose na dijogramima je okrenut u ravni za 90° u odnosu na smer sa slike 5.2).



Slika 5.2 - Akustički dipol

Značaj dipola kao jednog teorijskog modela je u tome što se usamljeni kruti klip, ranije prikazan u prvom poglavlju uz objašnjenje nastanka zvuka u vazduhu, u realnosti ponaša upravo kao dipol sa slike 5.2. Pri oscilovanju svaka njegova strana predstavlja zvučni izvor. Površine i brzine oscilovanja sa obe strane klipa su jednakе, pa on generiše dva jednakaka akustička protoka, svaki sa po jedne svoje strane. Po prirodu stvari ta dva protoka su u protivfazi, jer kada se sa jedne njegove strane vrši zgušnjavanje vazduha, sa druge se istovremeno dešava razređivanje, i obrnuto. Dalji praktičan značaj dipola kao modela je u tome što je taj usamljeni klip, koji radi kao dipol, dovoljno dobra predstava rada zvučnika na niskim frekvencijama kada on nije ugrađen u kutiju, odnosno kada slobodno stoji u prostoru. Membrana svakog zvučnika sa dve svoje strane generiše protivfazno zračenje, pa se u zračenju zvučnika koji slobodno stoji u prostoru zapaža efekat dipola.

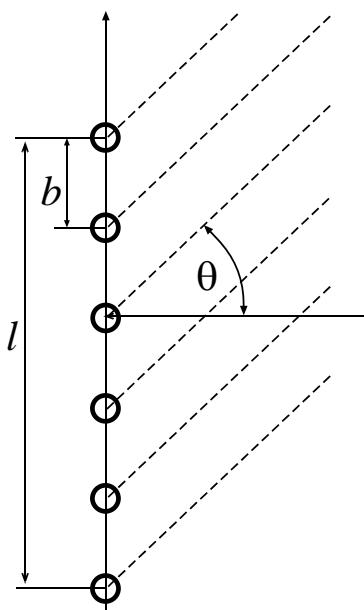
Upravo zbog takve osobine koju membrana ima kada generiše zvuk zvučnici se ugrađuju u kutije. Cilj toga je da se protivfazno zračenje membrane sa njene zadnje strane izoluje i izračena energija eliminiše. Time zvučnik postaje monopol čiji akustički protok čini samo ono što nastaje sa prednje strane njegove membrane. Energija koja se zrači u unutrašnjost kutije disipirase se, to jest pretvara u toplotu nekim dodatnim intervencijama (zbog toga se u unutrašnjost kutije stavlja odgovarajući materijal koji ima ulogu potrošača energije). Jasno je da bi se isti efekat dobio i ugradnjom zvučnika u dovoljno veliki zid. I takva jedna mera razdvaja dva protivfazna zračenja membrane. Naravno, ugradnja u zid onemogućava prenos zvučnika sa mesta na mesto, ali postoje aplikacije u kojima se takvo ograničenje može prihvatiti (na primer pri ugradnji zvučnika u spuštene plafone i slično).



Slika 5.3 - Usmerenost dipola nacrtana u linearnoj razmeri (levo) i u logaritamskoj razmeri (desno).

Grupa više tačkaskih izvora

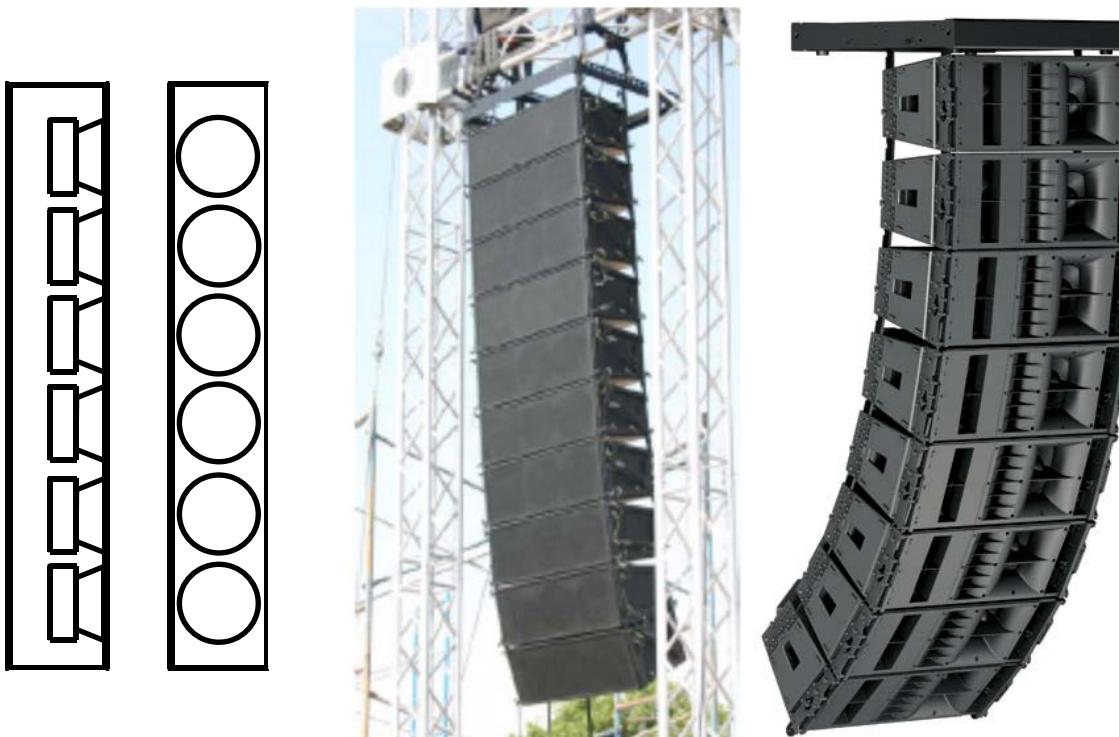
Prethodni primjeri su najjednostavniji mogući slučajevi složenog zvučnog izvora, jer se grupa sastoji od samo dva tačkasta izvora. Međutim, istim analitičkim postupkom može se analitirati polje koje stvara grupa sastavljena od proizvoljnog broja tačkastih izvora. Radi ilustracije, jedan takav primer prikazan je na slici 5.4 gde je više tačkastih izvora postavljeno ekvidistantno duž jedne prave. Oni formiraju složeni zvučni izvor ukupne dužine l . Ne upuštajući se u detaljnije opisivanje analize ovakvog složenog izvora, može se samo reći da pojava usmeravanja, koja pri tome nastaje, ima sličnu prirodu kao i za dva izvora, samo što je usmerenost izraženija.



Slika 5.4 – Primer grupe tačkastih izvora

Na principima grupe tačkastih izvora može se doći i do analitičkih izraza za zračenje realnih izvora koji imaju proizvoljnu formu. U postupku analize potrebno je njihovu zračeću površinu zameniti adekvatnom grupom, bolje rečeno mrežom tačkastih izvora. U rešenju koje se tako dobija stavljanjem da njihov međusobni razmak b teži nuli može se dobiti konačno rešenje zvučnog polja za kontinualnu zračeću površinu.

Teorija rada grupe tačkastih zvučnih izvora omogućila je da se razviju posebne forme zvučničkih sistema koji imaju kontrolisane oblike usmerenog zračenja u prostoru. Osnovni oblik takvih zvučničkih sistema su takozvani "zvučnički stubovi". To je sistem koji se sastoji od više jednakih zvučnika poređanih duž jedne linije, što je šematski prikazano na levoj strani slike 5.5. Ukupna usmerenost sistema funkcija je dužine stuba i frekvencije.



Slika 5.5 – Šematski prikaz zvučničkog stuba (prednji izgled i presek) i dva konkretna primera "line array" zvučničkih sistema za ozvučavanje

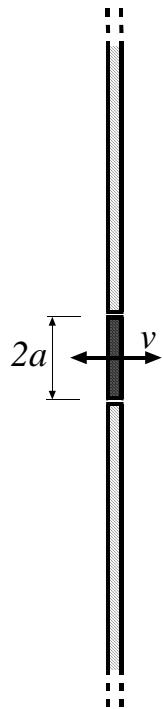
Složenije forme zvučničkih sistema formiraju se postavljajući pojedinačne zvučnike u nizu, ali duž jedne zakrivljene linije. Taj oblik se u literaturi naziva "line array" i danas predstavlja standardni oblik zvučničkih sistema za ozvučavanje većih površina. Na slici 5.5 prikazana su dva primera ovakvih zvučničkih sistema. Njihovi prostorni oblici usmerenosti mogu se podešavati formom zakrivljenosti linije duž koje se postavljaju pojedinačni zvučnici. Dodatna mogućnost kontrole usmerenosti može se uvesti ako se na neki način omogući podešavanje relativnog faznog odnosa signala koji se šalju u pojedinačne zvučnike u okviru grupe. Za to se koriste posebni procesori kojim se u izvesnim granicama mogu kontrolisati oblici usmerenosti sistema bez fizičkih intervencija na njemu.

5.2 Neki karakteristični oblici složenih zvučnih izvora

Na osnovu modela zasnovanog na grupi tačkastih zvučnih izvora moguće je analizirati bilo koji realni izvor zvuka. Među njima poseban praktičan značaj imaju takozvana klipna membrana, koja se još naziva i kruti klip, i beskonačni linijski izvor.

Klipna membrana u beskonačnom krutom zidu

Ranije pomenuti kruti klip kada se postavi u otvor u jednom beskonačnom krutom zidu postaje specifična vrsta zvučnog izvora. On je prikazan na slici 5.6. Postavljanje klipa u beskonačni zid uvodi odvajanje protivfaznih zračenja, pa se razmatra samo efekat koji se postiže sa jedne strane, odnosno zrači u poluprostor. Podrazumeva se da je identična situacija i sa suprotne strane zida, ali posmatrano sa aspekta nekog prijemnika jasno je da je relevantno samo stanje sa jedne strane. I ovde se pretpostavlja da je rastojanje od klipa na kome se posmatra zvučno polje mnogo veće od njegovog poluprečnika, odnosno važi $r \gg a$. Model klipne membrane dovoljno je jednostavan da se njen rad može analitički analizirati. Na osnovu toga mogu se definisati neki opšti zaključci, što je značajno jer klipna membrana u beskonačnom zidu kao model dovoljno tačno opisuje mnoge realne izvore zvuka, pre svega zvučnik.



Slika 5.6 - Klipna membrana poluprečnika a u beskonačnom zidu.

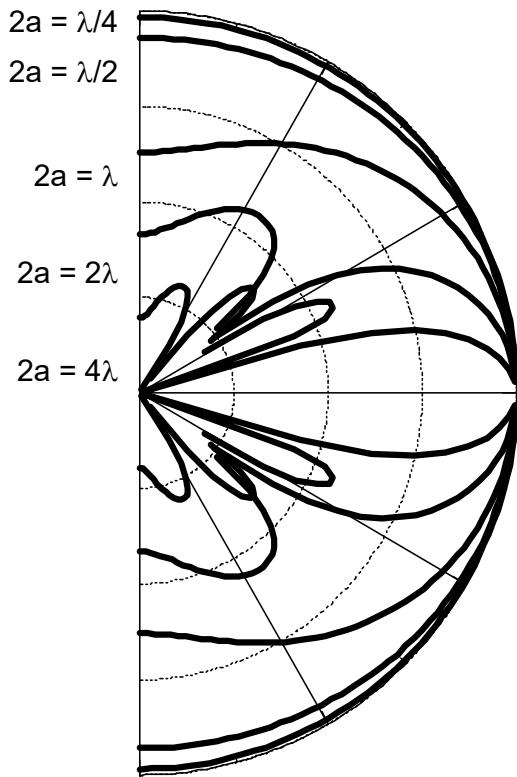
Kada klipna membrana osciluje brzinom v , može se smatrati da je svaka elementarna tačka na njenoj površini jedan tačkasti izvor, i da svi ti izvori rade u fazi. Zvučni pritisak u nekoj tački prostora ispred membrane rezultat je superponiranja onoga što izrači svaki od tih tačkastih izvora na površini klipa. Zbog toga se pritisak u prostoru ispred ovakvog izvora dobija integraljenjem pritisaka koji stvaraju svi elementi površine membrane po čitavoj njenoj površini. Ne upuštajući se u detalje ovakvog izvođenja, analitički postupak

vodi ka izrazu za zvučni pritisak u kome se može prepoznati faktor smera klipne membrane. On je oblika:

$$\Gamma = \frac{2J(k a \sin \theta)}{k a \sin \theta} \quad (5.10)$$

U ovom izrazu J je Beselova funkcija prvog reda.

Na slici 5.7 prikazani su oblici usmerenosti okrugle klipne membrane za nekoliko karakterističnih vrednosti odnosa njenog prečnika i talasne dužine (od $2a = \lambda/4$ do $2a = 4\lambda$). Posmatrano u prostoru, usmerenost membrane je osno simetrična, pa se prostorna forma usmerenosti dobija kada se krive sa slike 5.7 rotiraju oko najvećeg potega koji je u pravcu ose. Sa dijagrama se vidi da postoji konstantna pojava sve većeg usmeravanja zračenja s porastom frekvencije. Može se reći da već za frekvencije za koje je talasna dužina dvostruko manja od prečnika klipa usmerenost njegovog zračenja postaje značajna.



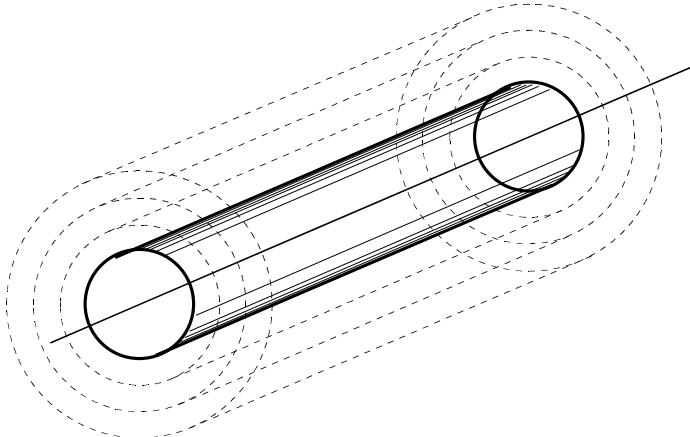
Slika 5.7 - Oblici usmerenosti klipne membrane za različite odnose veličine membrane i talasne dužine

U praksi postoje razni realni izvori zvuka čiji se rad dovoljno tačno može opisati ovakvim izvorom. Tipičan slučaj takvog izvora je membrana zvučnika koja se pravi da funkcioniše kao kruti klip. Iz prikazanih rezultata proizilazi zaključak da membrana svakog zvučnika ispoljava povećavanje usmerenosti s porastom frekvencije.

Drugi karakterističan primer realnog izvora čiji se rad može opisivati modelom klipne membrane je otvor usta pri govoru ili pevanju. Sloj vazduha koji osciluje u ravni otvora usta može se dovoljno tačno modelovati klipom. Zbog toga i zračenje zvuka kroz čovekova usta ima sve osobine zračenja klipa sa slike 5.6. Razlika je samo u tome što su usta, umesto u beskonačnoj ravni, smeštena u loptastu formu glave, zbog čega je prostorni ugao zračenja drugačiji. Uticaj glave kao prepreke na zračenje biće objašnjen u narednim poglavljima.

Beskonačni linijski izvor

Postoje okolnosti kada zvučni izvor ima formu linije. Takav jedan primer prikazan je na slici 5.8. Ako je pri tome dovoljno velike dužine, naziva se beskonačni linijski izvor. Jasno je da se linijski izvor može formirati i nizanjem više tačkastih izvora duž jedne linije. U čovekovom okruženju takav linijski izvor je, na primer, autoput sa dovoljno gustim saobraćajem. Pravac puta se ponaša kao jedinstven zvučni izvor velike dužine. Drugi oblik linijskog izvora koji se može javiti je fazni provodnik dalekovoda koji u nekom okolnostima (pri pojavi korone) zrači zvuk.



Slika 5.8 – Beskonačni linijski izvor i njegov talasni front

Kod beskonačno dugačkog linijskog zvučnog izvora podatak o ukupnoj zvučnoj snazi nema nikakvog smisla, jer u teorijskom slučaju izvora čija dućina teži beskonačnosti i ukupna zvučna snaga bi težila beskonačnosti (na primer, ukupna zvučna snaga koja se generiše čitavom dužinom autoputa). Zbog toga se rad ovakvog izvora karakteriše podužnom zvučnom snagom P_a' , a ne ukupnom snagom. Podužna snaga P_a' je dimenziono W/m.

Osnovna karakteristika beskonačnog linijskog izvora je u činjenici da njegov talasni front ima formu valjka kao što je označeno na slici 5.8, a ne sfere kao kod tačkastog izvora. Kao posledica ovakvog oblika širenja talasa nivo zvuka sa udaljavanjem opada obrnuto srazmerno korenu rastojanja, što daje smanjenje nivoa zvuka za 3 dB sa udvostručavanjem rastojanja od izvora. U poređenju sa ostalim izvorima, kod kojih se opadanje nivoa odvija sa smanjenjem 6 dB sa udvostručavanjem rastojanja, nivo zvuka linijskih izvora opada sporije sa udaljavanjem. To je jedan od razloga zbog koga izvori

zvuka kao što je prometan autoput predstavljaju značajan ekološki problem jer se zvuk koji proizvode može čuti daleko.

Ograničavanje prostornog ugla zračenja refleksionim ravnima

U svim dosadašnjim analizama rada zvučnih izvora podrazumevalo se da se izvor nalazi u beskonačnom mediju i da se talasni front oko njega širi na sve strane. Pri tome, energija koju izvor emituje može se širiti uniformno ili neuniformno po pravcima, što zavisi od usmerenosti, odnosno od prirode izvora, ali u svakom od posmatranih slučajeva izvor je zračio u čitav prostor od 4π steradijana.

Jedna mogućnost usložnjavanja rada zvučnih izvora javlja se u okolnostima kada se na neki način fizički ograničava prostor u koji oni emitiji energiju. Tada se izvor i ono što mu prostorno ograničava zračenje moraju posmatrati kao jedinstven sistem. Najjednostavniji slučaj takvog usložnjavanja rada zvučnog izvora javlja se kad se on postavi na neku krutu površinu beskonačnih dimenzija (u praksi dovoljno velikih dimenzija). Oznaka "kruta" ravan uvodi se da bi se pokazalo da nikakva zvučna energija koju stvara izvor ne odlazi u materijal od koga je ta površina napravljena. Činjenica da kruta površina prinudno, to jest fizički ograničava beskonačnost medija utiče na rad samog izvora. Ovde će biti pokazano kako se taj uticaj matematički modeluje.

Prostorni ugao zračenja tačkastog izvora

Ograničavanje prostora u koji zrači izvor najjednostavnije je opisati na primeru tačkastog zvučnog izvora kada se on postavi na samu površinu neke dovoljno velike krute površine. Zbog zanemarljivih dimenzija tačkastog izvora može se smatrati da se on nalazi tačno u ravni postavljene krute površine. Njegovo zračenje tada se raspodeljuje na sužen prostor koji je manji od 4π steradijana. U modelovanju ovakve pojave uvodi se pojam prostornog ugla zračenja Ω_z . On pokazuje veličinu prostornog ugla u koji se zvučna energija širi polazeći od zvučnog izvora.

U izrazu (4.17) za otpornost zračenja tačkastog izvora član 4π u imeniocu definiše površinu talasnog fronta, odnosno prostorni ugao u koji tačasti izvor zrači. Zato se otpornost zračenja može pisati i kao:

$$R_{az} = \frac{\rho ck^2}{\Omega_z} \quad (5.11)$$

gde je Ω_z prostorni ugao zračenja. Uvodeći ovu oznaku izraz (4.20) za zvučnu snagu tačkastog izvora sada se može pisati:

$$P = q_o^2 \frac{\rho ck^2}{\Omega_z} \quad (5.12)$$

a intenzitet definisan izrazom (4.23) postaje:

$$J = \frac{P_a}{\Omega_z r^2} \quad (5.13)$$

Iz ovih izraza se vidi da ograničavanje prostornog ugla zračenja tačkastom zvučnom izvoru, što znači smanjenje u odnosu na vrednost 4π koju ima u slobodnom prostoru, podrazumeva promenu vrednosti zvučne snage, a time i promenu intenziteta koga izvor stvara u okolnom prostoru. Kolika će promena nastati takvim ograničavanjem prostornog ugla zračenja zavisi od toga kako ta promena utiče na fizičko funkcionisanje izvora. Ako stavljanjem izvora u ravan akustički protok koji on stvara ostaje konstantan, onda se shodno izrazima (5.12) i (5.13) menjaju i snaga izvora i intenzitet.

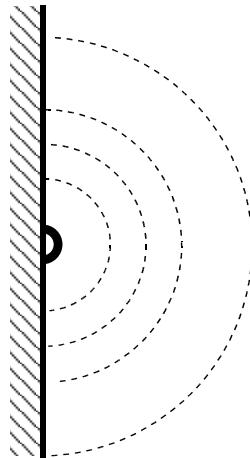
Tačkasti zvučni izvor na beskonačnoj krutoj ravni

Najjednostavniji slučaj fizičkog ograničenja prostornog ugla zračenja tačkastom izvoru javlja se kada se on postavi na jednu beskonačni veliku krutu ravan, kao što je prikazano na slici 5.9. U takvim okolnostima prostorni ugao zračenja je $\Omega_z = 2\pi$. Snaga zračenja tačkastog izvora sa zadatim protokom u takvom slučaju je :

$$P_a = q_o^2 \frac{\rho c k^2}{2\pi} \quad (5.14)$$

a intenzitet je:

$$J = \frac{P_a}{2\pi r^2} \quad (5.15)$$



Slika 5.9 – Tačkasti izvor u beskonačno velikoj krutoj ravni sa prostornim uglom zračenja 2π .

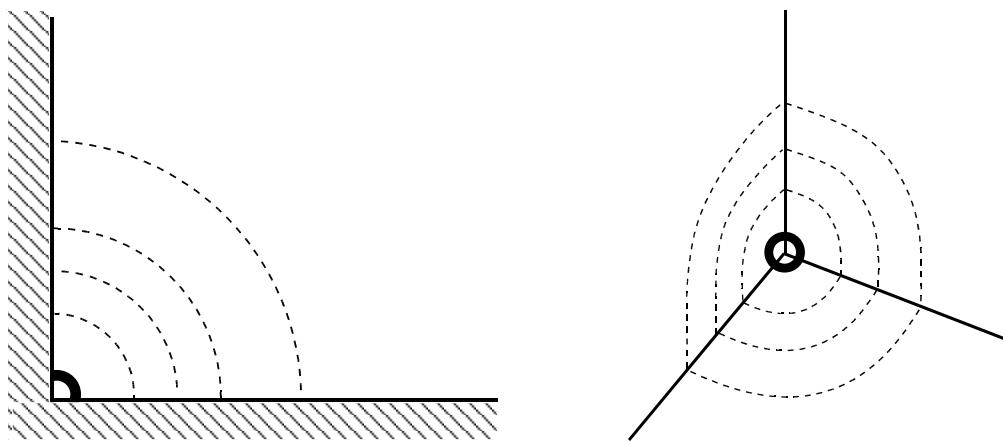
Ako protok q koga emituje izvor ostaje nepromenjen, snaga zračenja ovakvog izvora se povećava dva puta u odnosu na okolnosti kada se taj isti izvor nalazi u slobodnom prostoru. Istovremeno, intenzitet će se povećati četiri puta, jer je:

$$J = \frac{2P_a}{2\pi r^2} = 4 \frac{P_a}{4\pi r^2} \quad (5.16)$$

Ovakva promena podrazumeva da će se u prostoru ispred ravni nivo zvuka koga stvara tačkasti izvor povećati za 6 dB u odnosu na stanje u polju kada se on nalazi u beskonačnom mediju.

Tačkasti zvučni izvor na preseku dve ili tri krute ravni

Na sličan način kao u primeru sa slike 5.9 može se pokazati da postavljanje tačkastog izvora na spoj dve ravni, ili u ugao gde se sastaju tri ravni, unosi dalje ograničavanje prostornog ugla zračenja. Ova dva slučaja su prikazana na slici 5.10.

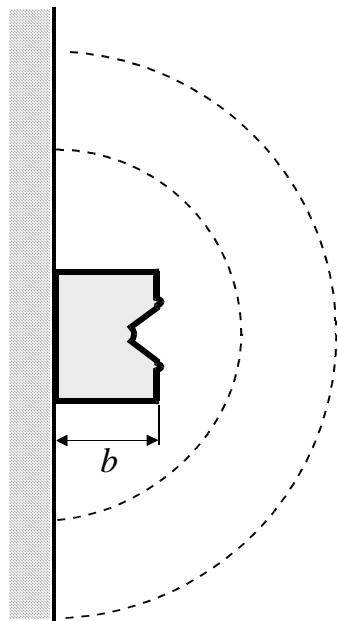


Slika 5.10 – Tačkasti izvor na spoju dve krute ravni (levo) i na spoju tri ravni (desno.)

Kada se tačkasti zvučni izvor nalazi na spoju dve ravni, prostorni ugao zračenja postaje π . U slučaju kada je izvora u uglu, to jest na mestu gde se spajaju tri ravni, prostorni ugao zračenja je $\pi/2$. Postavljanje tačkastog izvora u ovakve pozicije dovodi do daljeg povećanja vrednosti otpornosti zračenja. Ako se pri tome ne menja akustički protok q koga stvara izvor, snaga zračenja će se povećati za još dva, odnosno četiri puta, respektivno, a intenzitet za još četiri, odnosno osam puta. U domenu nivoa zvuka to znači da će u slučaju konstantnog protoka tačkasti zvučni izvor na spoju dve ili tri ravni stvarati nivo zvuka viši za 12 dB, odnosno 18 dB u odnosu na nivo koji bi isti tačkasti izvor stvarao u neomeđenom beskonačnom mediju.

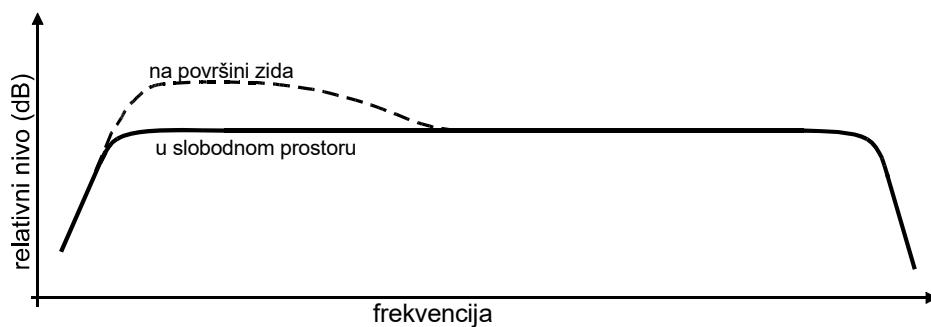
Slučaj realnih zvučnih izvora na beskonačnoj krutoj ravni

Kada se neki realni zvučni izvor postavi na zid, poput tačkastog zvučnog izvora sa slike 5.9, njegovo ponašanje neće u potpunosti odgovarati opisanom slučaju. Na primer, kada se jedan zvučnik u kutiji postavi na zid, kao što je prikazano na slici 5.11, njegov rad će odgovarati slučaju tačkastog izvora u krutoj ravni samo na frekvencijama na kojima je dimenzija kutije označena na slici sa b dovoljno mala u odnosu na talasnu dužinu. To su frekvencije na kojima se posmatrani izvor može smatrati tačkastim izvorom.



*Slika 5.11 – Zvučnička kutija na krutom zidu.
Veličina b predstavlja dubinu kutije, to jest udaljenost membrane koja zrači od površine zida.*

Na višim frekvencijama membrana postaje relativno udaljena od zida u poređenju sa talasnom dužinom. Ako uslov $b \gg \lambda$ nije zadovoljen, zvučnik kao izvor ne menja svoj prostorni ugao zračenja. Talasni front će se širiti oko kutije, s tim što će se deo talasa koji se razvija od membrane zvučnika prema zidu reflektovati nazad. Promene u zračenju ovako postavljenog zvučnika u skladu sa izrazima (5.14) i (5.15) dešavaće se samo na nižim frekvencijama. Na slici 5.12 principijelno je ilustrovana promena u zračenju do koje dolazi kada se kutija zvučnika postavi na zid. Opseg frekvencija u kome dolazi do povećanja nivoa zvuka zavisi od dimenzija kutije.



*Slika 5.12 –
Principijelna
ilustracija povišenja
nivoa zvuka kada se
zvučnička kutija
postavi na zid.*

Postoje neke konstrukcije zvučničkih kutija kod kojih je pri njihovom dizajnu uračunato da se koristi efekat smanjenja prostornog ugla zračenja radi podsticanja zračenja na niskim frekvencijama. To se uvek navodi u njihovim specifikacijama, a linearna karakteristika se postiže tek kada se postave na površinu zida. U neomeđenom mediju, kao na primer kada se nalaze na nekom stativu u prostoru, takvi zvučnici na nižim frekvencijama stvaraju odgovarajuće niži nivo zvuka.

6. REFLEKSIJA ZVUČNOG TALASA

Refleksija zvuka je pojava nagle promene pravca prostiranja jednog dela energije zvučnog talasa. Do refleksije dolazi pri nailasku talasa na fizički diskontinuitet u sredini kojom se prostire. Pojam diskontinuiteta ovde podrazumeva svaku naglu promenu fizičkih svojstava sredine. Najdrastičniji oblik diskontinuiteta je kada talas, prostirući se kroz vazduh, nailazi na prepreku od masivnog i tvrdog materijala kao što je zid. Razlika u fizičkim svojstvima vazduha i materijala zida veoma je velika, pa je u tom slučaju refleksija talasa bliska potpunoj (skoro sva energija talasa se reflektuje i menja smer prostiranja).

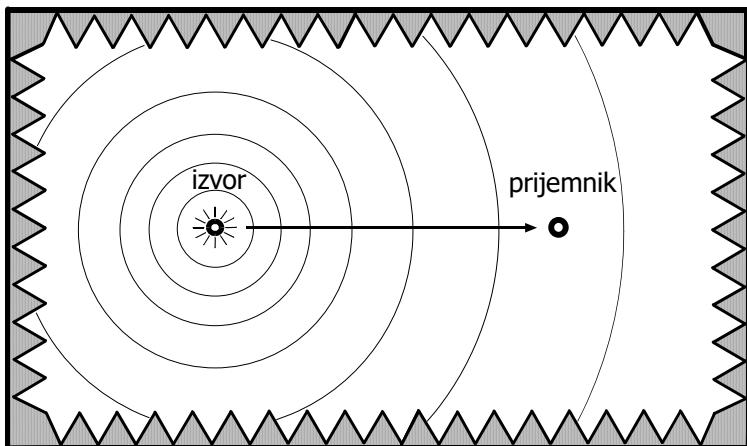
Kada u nekoj sredini radi zvučni izvor, pojava refleksije u njemu podrazumevaju da zvučno polje postaje složeno. U svakoj tački prostora postoji više od jedne komponente polja: direktni zvuk koji dolazi najkraćim putem od izvora i refleksija koja stiže od prepreke. Zvučno polje je rezultat superponiranja ove dve komponente. U mnogim okolnostima postoji više od jedne ravni diskontinuiteta, usled čega postoje i višestruke refleksije. Rezultantno polje tada je superpozicija svih prisutnih talasa, direktnog i reflektovanih. U tom smislu najsloženiji slučaj zvučnog polja je u prostorijama, gde postoje brojne refleksije od zidova.

6.1 Pojam slobodnog prostora

Sva dosadašnja objašnjenja podrazumevala su da u prostoru u kome se posmatra zvučno polje postoji samo direktni, to jest progresivni talas koji se udaljava od izvora i ne postoje bilo kakvi reflektovani talasi. To je bila polazna pretpostavka u prikazu rešavanja zvučnog polja da bi se jasno definisala pojava prostiranja i otklonilo njeno maskiranje uticajem refleksija koje usložnjavaju polje. Prostor u kome ne postoje refleksije naziva se slobodan prostor. To je akustički pojam koji predstavlja još jednu idealizaciju, pošto u realnosti takvi uslovi ne postoje. Naime, pojam slobodnog prostora podrazumeva da je fizički prostor u kome se prostire zvuk neomeđen preprekama u svim pravcima. Međutim, u realnosti je to praktično nemoguće. Čak i kada se sve moguće fizičke prepreke prostiranju zvuka otklone, postoji tlo čije je prisustvo neminovnost. Bez obzira na to čime je tlo pokriveno, ono predstavlja jedan diskontinuitet na kome će se javiti refleksija zvuka, koja će se širiti dalje kroz vazduh.

Idealan slobodni prostor može se realizovati samo u laboratorijskim uslovima. U te svrhe u akustičkim laboratorijama se uređuju posebne prostorije tako što se svih šest površina u njima pokrivaju materijalima i konstrukcijama koje efikasno apsorbuju zvuk. Takva

prostorija se naziva anehoična prostorija, a njen šematski prikaz dat je na slici 6.1. U žargonu se anehoična prostorija naziva "gluva soba". Anehoična prostorija je jedino mesto gde je, mada samo u laboratorijskim uslovima, realizovan idealan slobodan prostor u kome nema pojave refleksija. Na slici 6.2 prikazana je fotografija unutrašnjosti jedne anehoične prostorije.



Slika 6.1 - Šematski prikaz
anehoične prostorije



Slika 6.2 - Izgled jedne
anehoične prostorije.

Anehoične prostorije se koriste u laboratorijama za ispitivanje raznih izvora zvuka, jer u njoj postoji samo direkstan zvuk iz izvora, bez dodatnog uticaja eventualnih refleksija. Najčešća primena je za testiranje zvučnika i mikrofona. Takve prostorije se takođe koriste

za eksperimente iz psihokustike jer se pomoću mreže zvučnika može simulirati zvučno polje proizvoljne strukture u koje se postavlja slušalac. Najzad, jedna varijanta anehoične prostorije se sreće u dramskim studijima za snimanje radio drama. U njoj se snimaju dijalozi koji treba da se dešavaju na otvorenom prostoru, što se dočerava odsustvom refleksija.

Na slici 6.2 vidi se da je u laboratorijskoj anehoičnoj prostoriji ravan poda realizovana zategnutom čeličnom mrežom po kojoj se hoda. Ispod nje se nalazi ista akustička obrada kao na zidovima. U realnim prostorijama koje se iz nekih razloga intenzivno akustički obrađuju da bi se minimizirale refleksije, kao što je to na primer u nekim prostorijama studija za razna muzička snimanja, pod uvek ostaje bez akustičke obrade da bi se u njoj moglo normalno hodati. Takve prostorije se uobičajeno označavaju kao "semianehoične".

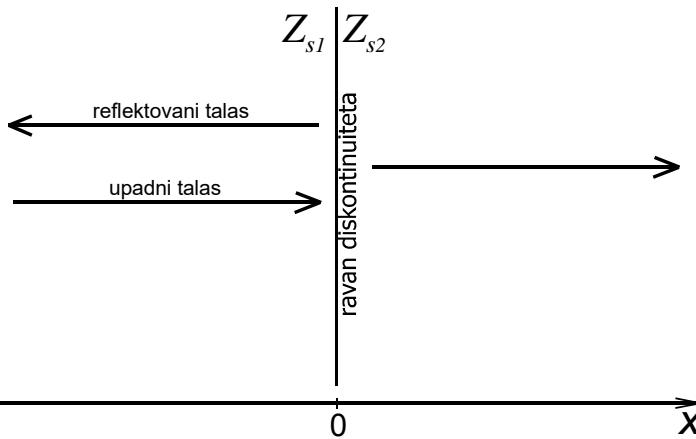
U prostorima van laboratorija ne može se izbeći prisustvo tla. Ono što se realno može postići je da u okruženju nema vetikalnih prepreka, to jest zidova, čime se eliminišu moguće refleksije. Takav slučaj se naziva otvoreni prostor, što predstavlja realnu varijantu akustičkog pojma slobodnog prostora. U otvorenom prostoru se pojavljuje samo refleksija od tla, eventualno od još neke usamljene prepreke. S toga je ukupni nivo zvuka u polju rezultat superponiranja direktnog zvuka i konačnog broja prisutnih refleksija, pa se matematička analiza polja može vršiti njihovim sabiranjem.

6.2 Procesi na ravni diskontinuiteta sredine

U akustici pojам fizičkog diskontinuiteta u sredini kroz koju se prostire zvučni talas podrazumeva naglu promenu vrednosti specifične impedanse sredine. Primer diskontinuiteta šematski je prikazan na slici 6.3. Ravan diskontinuiteta odvaja sredine sa različitim impedansama Z_{s1} i Z_{s2} . Radi pojednostavljenja analize pogodno je početak koordinatnog sistema postaviti u ravan diskontinuiteta. Pojava refleksije označava da će se energija ravanskog talasa koji pri prostiranju nailazi na diskontinuitet jednim delom reflektovati i vraćati nazad, što je na slici označeno kao reflektovani talas, a ostatak energije će nastaviti da se prostire kroz drugu sredinu.

Matematički opis zvučnog polja u prvoj sredini iz koje talas nailazi (zona negativnih vrednosti x), može se utvrditi polazeći od opštег rešenja talasne jednačine za ravanski talas:

$$\underline{p}(x,t) = \hat{p}_+ e^{j(\omega t - kx)} + \hat{p}_- e^{j(\omega t + kx)} \quad (6.1)$$



Slika 6.3 – Principijelna predstava nailaska talasa na diskontinuitet sredine

gde dva člana sa desne strane predstavljaju upadni i reflektovani talas, to jest talas koji se kreće u pozitivnom pravcu x ose i talas koji se kreće u negativnom pravcu. Rešenje talasne jednačine pokazuje da je polje rezultanta direktnog i reflektovanog zvuka. Na osnovu ranije definisane impedanse za brzinu u sredini odakle dolazi zvučni talas može da se napiše:

$$\underline{v} = \frac{\hat{p}_+}{Z_{s1}} e^{j(\omega t - kx)} - \frac{\hat{p}_-}{Z_{s1}} e^{j(\omega t + kx)} \quad (6.2)$$

U ravni diskontinuiteta, a to znači na mestu $x = 0$, matematički opis stanja zvučnog polja mora biti nezavistan od toga da li se posmatra iz prve ili druge sredine. U tom smislu, može se odrediti odnos p/v na ravni diskontinuiteta definišući ga sa leve i sa desne strane ravni $x = 0$. Posmatrano sa leve strane to je:

$$\left(\frac{p}{v} \right)_{x=0} = Z_{s1} \frac{\hat{p}_+ + \hat{p}_-}{\hat{p}_+ - \hat{p}_-} \quad (6.3)$$

Prilazeći ravni diskontinuiteta sa suprotne strane mora da bude zadovoljen uslov:

$$\left(\frac{p}{v} \right)_{x=0} = Z_{s2} \quad (6.4)$$

Izjednačavajući izraze (6.3) i (6.4):

$$Z_{s1} \frac{\hat{p}_+ + \hat{p}_-}{\hat{p}_+ - \hat{p}_-} = Z_{s2} \quad (6.5)$$

može se odrediti odnos pritisaka progresivnog i reflektovanog talasa.

Za opisivanje procesa refleksije uvodi se veličina koja se naziva faktor refleksije, i koji je po definiciji:

$$\underline{r} = \frac{\hat{p}_-}{\hat{p}_+} = \frac{\underline{Z}_{s2} - \underline{Z}_{s1}}{\underline{Z}_{s1} + \underline{Z}_{s2}} \quad (6.6)$$

Odavde se vidi da veličina reflektovanog talasa zavisi samo od odnosa impedansi dve sredine. Refleksije neće biti, to jest faktor refleksije je 0, samo kada su impedanse dve sredine potpuno jednake. To je granični slučaj, jer tada nema diskontinuiteta. Svaka ma kako mala razlika u impedansama kao rezultat proizvodi pojavu refleksije, a relativni odnos veličine direktnog i reflektovanog talasa pri tome biće funkcija odnosa tih impedansi.

S obzirom da je za ravanski talas vrednost impedanse ρc , jasno je da pojам diskontinuiteta podrazumeva promenu gustine medija i (ili) promenu brzine prostiranja zvuka u njemu. Iz izraza (6.6) vidi se da će se refleksija javljati bez obzira da li talas nailazi iz sredine sa manjom ka sredini sa većom impedansom, što u praksi znači iz ređe ka gušćoj sredini, ili u obrnutom smeru.

Kada su impedanse dve sredine veoma različite, za više redova veličine, javlja se potpuna refleksija. Ona može nastupiti u dva karakteristična slučaja: kada impedansa druge sredine teži beskonačnosti i kada teži nuli. U prvom slučaju, kada je impedansa druge sredine teži beskonačnosti, što znači da je mnogo veća od impedanse prve sredine odakle dolazi talas, iz izraza (6.6) se vidi da je tada $r = 1$. Ako impedansa druge sredine teži nuli, što znači da je mnogo manja od prve impedanse, tada je $r = -1$.

Kada talas nailazi iz vazduha, izraz za faktor refleksije postaje:

$$\underline{r} = \frac{\underline{Z}_{s2} - \rho c}{\underline{Z}_{s2} + \rho c} \quad (6.7)$$

Pozitivan faktor refleksije u praksi se javlja kada zvuk iz vazduha nailazi na masivni zid. Ako je impedansa zida na koju talas nailazi iz vazduha realna, onda je i faktor refleksije realan. To dalje znači da su upadni i reflektovani talas u fazi. Negativna vrednost faktora refleksije se javlja kada zvuk nailazi iz gušće sredine, na primer iz vode, na graničnu ravan prema vazdušnoj sredini. Faktor refleksije je tada -1 , što znači da su u ravni diskontinuiteta direktni i reflektovani talas u protivfazi.

Faktor refleksije je u opštem slučaju kompleksna veličina. On se može prikazati u formi sa modulom i argumentom:

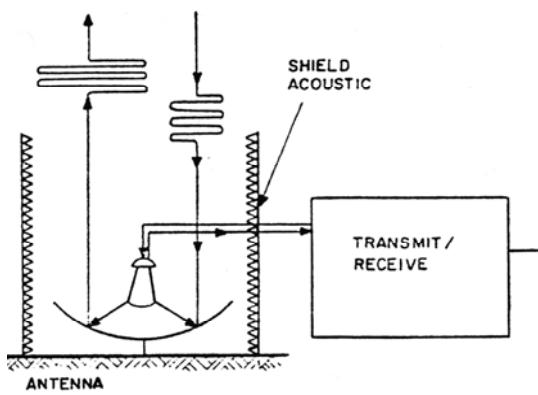
$$\underline{r} = R e^{j\delta} \quad (6.8)$$

Kompleksna vrednost faktora refleksije znači da će fazni stav između direktnog i reflektovanog talasa u ravni diskontinuiteta biti različit od 0, odnosno π . Da bi se u realnosti pojavila kompleksna vrednost pri refleksiji talasa koji iz vazduha pogađa neku prepreku, potrebno je da impedansa druge sredine sadrži reaktivnu komponentu. To se može javiti u slučaju kada prepreka ima složenu fizičku strukturu površine, na primer

kada refleksiona površina ispoljava neku mehaničku elastičnost. Ipak, u najvećem broju slučajeva od interesa za inženjersku praksu refleksije na fizičkim preprekama ne podrazumevaju kompleksan faktor refleksije.

Postoje praktične okolnosti kada se refleksija javlja i u samom vazduhu, bez pojave čvrstih prepreka. Diskontinuitet u takvim slučajevima nastaje na dva načina. Može biti posledica razlike u temperaturama dva sloja vazduha, što stvara razliku u brzini prostiranja zvuka c , a može nastati i turbulencijama u vazduhu koje utiču na pojavu slojeva promjenjene gustine ρ . Sve to kao rezultat daje promenu vrednosti impedanse ρc (vidi tekst u okviru).

Analiza stanja donjih slojeva atmosfere može se realizovati akustičkim uređajem koji se naziva SODAR. Šematski prikaz njegovog koncepta i izgled jednog takvog uređaja vidi se na slici.



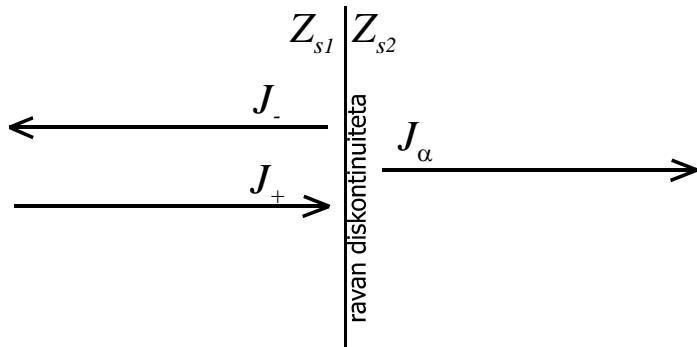
SODAR emituje naviše u atmosferu kratak zvučni impuls, a zatim prelazi u režim osluškivanja u kome registruje refleksije koje se vraćaju od diskontinuiteta vazduha. Na osnovu vremena kašnjenja pristiglih refleksija određuju se visine na kojima se javljaju diskontinuiteti, a na osnovu relativnog intenziteta pristiglog reflektovanog talasa može se odrediti veličina tog diskontinuiteta.

Jasno je da su talasi koji se reflektuju od malih diskontinuiteta relativno slabi. Da bi se prijemni deo zaštitio od okolne ambijentalne buke, čitav primopredajni sistem SODAR-a se postavlja u velike cilindrične štitnike, kao što se vidi na slici.

Koefficijent apsorpcije

Pokazano je da se pojava refleksije kvantifikuje vrednošću faktora refleksije koji pokazuje odnos pritisaka direktnog i reflektovanog talasa. Međutim, postoje okolnosti kada je pogodnije da se pojava refleksije opisuje energetski, a ne preko pritiska. U takvim okolnostima za opisivanje procesa koji se dešava pri refleksiji uvodi se pojam apsorpcije. To podrazumeva da se pojava posmatra iz sredine iz koje dolazi talas. Za posmatrača koji se nalazi u prvoj sredini deo energije talasa koji kroz ravan diskontinuiteta prelazi u drugu sredinu "nestaje", odnosno apsorbuje se. Zbog toga se takav pristup uobičajeno koristi u opisivanju pojавa refleksija kada zvuk u čovekovom okruženju nailazi iz vazduha

u razne pregrade. Na primer, u akustici prostorija matematičko modelovanje zvučnog polja zasniva se na analizi tokova energije i njenih gubitaka na zidovima gde se sva energija koja odlazi u zidove smatra apsorbovanom.



Slika 6.4 - Ilustracija pojave refleksije uz definiciju koeficijenta apsorpcije

Za energetsko opisivanje procesa refleksije uvodi se pojam koeficijenta apsorpcije α . On je definisan preko intenziteta upadnog talasa i intenziteta koji je prešao u drugu sredinu. Koristeći oznake sa slike 6.4, koeficijent apsorpcije se definiše kao:

$$\alpha = \frac{J_\alpha}{J_+} \quad (6.9)$$

Pošto je zbir snaga reflektovanog i apsorbovanog talasa jednak snazi upadnog talasa, onda važi:

$$J_+ = J_- + J_\alpha \quad (6.10)$$

pa važi i relacija:

$$\frac{J_-}{J_+} = 1 - \alpha \quad (6.11)$$

Prema tome, intenzitet reflektovanog talasa koji se vraća od ravnog diskontinuiteta je:

$$J_- = (1 - \alpha) J_+ \quad (6.12)$$

Jasno je da koeficijent apsorpcije može imati vrednosti između 0 i 1. U nekim okolnostima, pre svega u starijoj literaturi, umesto intervala (0,1) korišćeno je izražavanje u procentima, od 0% do 100%. Površina koja potpuno reflektuje zvučni talas ima koeficijent apsorpcije 0. Kada postoji potpuna prilagođenost dve sredine po impedansama, pa sva energija prolazi kroz ravan diskontinuiteta nestajući iz prve sredine, koeficijent apsorpcije granične ravni ima vrednost 1. Sve realne površine imaju vrednosti koje su između ove dve krajnjosti. Pri tome je vrednost 0 praktično nemoguća, čak i kada je diskontinuitet veoma veliki, kao u slučaju kada zvučni talas nailazi iz vazduha na masivni zid. Uvek postoje neki disipativni procesi na samoj površini diskontinuiteta zbog kojih se neće 100% energije reflektovati (kao posledica trenja molekula na površini zida i usled lokalnog prelaska topote iz vazduha u materijal zida). Zbog toga se na

površini realnih zidova uvek gubi jedan mali deo energije, bez obzira na odnos impedansi. Realni minimum koeficijenta apsorpcije, to jest vrednost koju imaju masivni zidovi je oko 0,02.

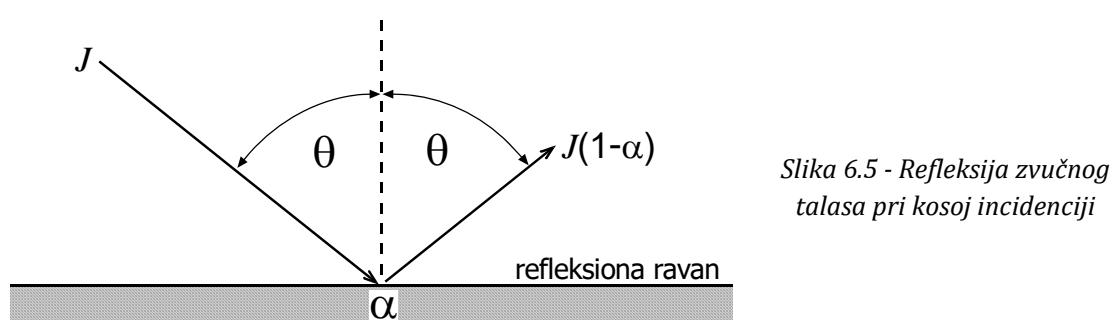
Za modelovanje zvučnog polja u čovekovom okruženju značajno je poznavanje koeficijenata apsorpcije raznih površina koje se mogu naći na putu zvučnih talasa u čovekovom okruženju jer oni određuju intenzitet refleksija. Koeficijent apsorpcije može se meriti u laboratorijskim uslovima. Za te potrebe definisane su standardizovane procedure. Mogućnost merenja posebno je značajna zbog raznih materiala koji se koriste u prostorijama tako što se postavljaju na zidove i plafone za potrebe akustičke obrade. Proizvođači materijala za uređenje enterijera uobičajeno daju takve podatke u prospektima.

U opštem slučaju koeficijent apsorpcije svih realnih površina frekvencijski je zavistan. Njegova vrednost je u većoj ili manjoj meri promenljiva sa frekvencijama. Neki materijali koji se koriste u prostorijama imaju u čujnom opsegu frekvencija promenu vrednost svog koeficijenta apsorpcije od teorijskog minimuma do gotovo potpune apsorpcije, dok je kod nekih ta promena relativno mala.

Refleksija pri kosoj incidenciji

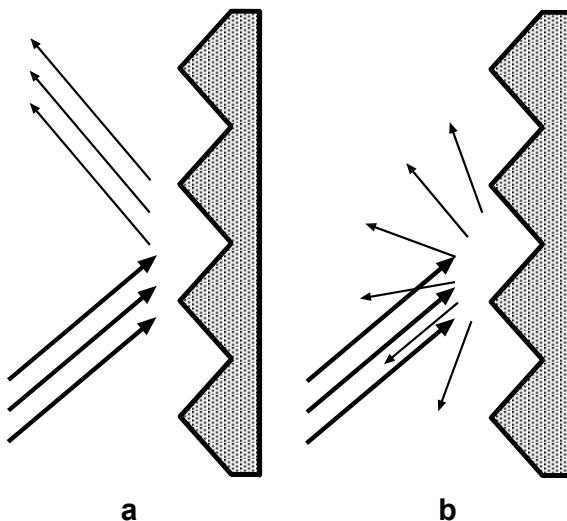
U dosadašnjim prikazima zbog jednostavnosti podrazumevalo se da talas nailazi na ravan diskontinuiteta pod pravim uglom, to jest sa normalnom incidencijom. U realnosti je normalna incidencija u zvučnom polju izuzetak, odnosno verovatnoća nailaska talasa pod pravim uglom u odnosu na prepreku je mala. U opštem slučaju ugao incidencije može biti proizvoljan.

Kada talas nailazi na prepreku pod nekim proizvoljnim uglom θ , kao što je prikazano na slici 6.5, refleksija se odvija po geometrijskom zakonu. Reflektovani talas nastavlja da se kreće pod istim tim uglom pod kojim je naišao upadni talas. To je pravilo koje važi za sve talasne pojave, kao na primer za svetlost (geometrijska optika), pa i za zvuk. Intenzitet reflektovanog talasa biće umanjen za uticaj apsorpcije reflektujuće površine.



Refleksije od neravnih površina

Kada zvučni talas nađe na površinu koja nije ravna već sadrži neravnine (reljef), pojava refleksije je složenija nego u prethodno opisanom slučaju na beskonačnoj ravni. Ako se pretpostavi da je i reljefna površina na koju nailazi talas beskonačna, kao što je pretpostavljeno i u slučaju kada je granična površina bila ravna, proces refleksije zavisi od odnosa dimenzija neravnina i talasne dužine zvuka. Ovakav slučaj je šematski ilustrovan na slici 6.6.

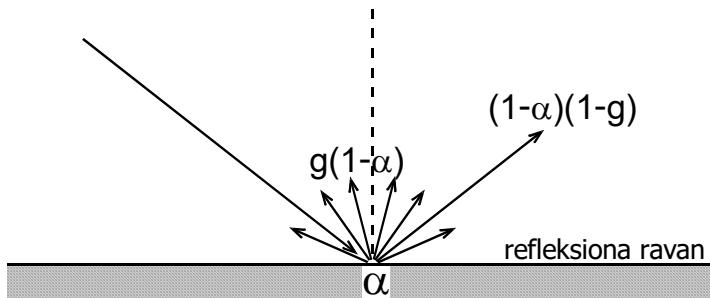


Slika 6.6 - Refleksija od neravne površine:
a - kada su neravnine mnogo manje od talasne
dužine,
b - kada su neravnine poredljive sa talasnom
dužinom.

Kada su neravnine po svojim dimenzijama mnogo manje od talasne dužine, talas ih pri refleksiji "ne primeće" (slika 6.6a). Refleksija se tada odvija na način kao u slučaju potpuno ravne površine. Međutim, kada su neravnine svojom veličinom poredljive sa talasnom dužinom, pri refleksiji dolazi do raspršavanja zvučne energije po pravcima. Takav slučaj se naziva difuzna refleksija (slika 6.6b). Pri difuznoj refleksiji dolazi do podele energije upadnog talasa. Jedan deo energije reflektuje se po geometrijskom zakonu, a ostatak se raspršava u svim pravcima. U takvim okolnostima može se reći da pogodjena zona deluje kao novi izvor zvuka koji s nekom usmerenošću zrači u poluprostor. Procenat upadne energije koja se pri refleksiji raspršava zavisi od odnosa talasne dužine i strukture reljefne površine, njegove dubine i geometrijske forme. Difuzne refleksije se modeluju uvodeći parametar koji se naziva koeficijent difuznosti refleksija g . Taj koeficijent ima vrednosti u intervalu od 0 do 1 i definiše deo energije upadnog talasa koja se reflektuje difuzno. Kada je $g = 0$, nema raspršavanja, već se sva energija reflektuje pravilno geometrijski u jednom pravcu. Kada je $g = 1$ pri refleksiji se sva reflektovana energija raspršava na sve strane.

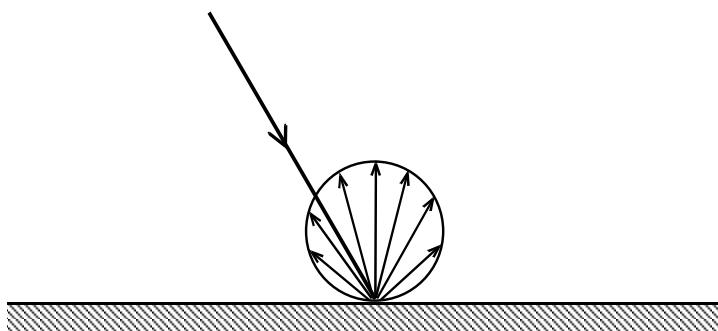
Koeficijent difuznosti refleksija g je svojstvo refleksione površine, zajedno sa koeficijentom apsorpcije α . Na slici 6.7 je pokazano da je intenzitet pravilno reflektovanog talasa $(1-g)(1-\alpha)J_+$ a ukupni difuzno reflektovani intenzitet je $g(1-\alpha)J_+$. U slučaju dovoljno malih talasnih dužina moguće je ostvariti strukturu reljefne površine

koja u potpunosti raspršava reflektovanu energiju, pa je tada $g = 1$. Realne površine mogu ispoljavati potpunu difuznost refleksija samo u jednom ograničenom opsegu frekvencija.



Slika 6.7 – Ilustracija difuzne refleksije sa raspršavanjem dela reflektovane energije.

Prostorna struktura širenja energije po pravcima nakon refleksije predstavlja se dijagramom verovatnoće pravaca pri raspršavanju. Ova verovatnoća zavisi od geometrijskog oblika reljefne strukture i odnosa dimenzija tog reljefa prema talasnoj dužini. U modelovanju difuznih refleksija najčešće se prepostavlja da ta verovatnoća odgovara kružnoj raspodeli, kao što je prikazano na slici 6.8. Analitički oblik verovatnoće ovakve raspodele po pravcima je $\cos\theta$, gde je θ ugao u odnosu na normalu. Za takav oblik difuzne refleksije kaže se da se dešava po Lambertovom zakonu. Zbog svoje analitičke jednostavnosti često se u simulacijama koristi ovakva zakonitost umesto realnih oblika krivih raspršavanja.

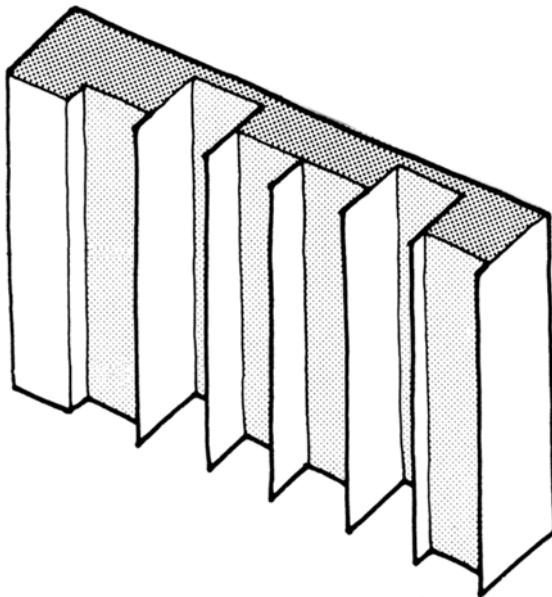


Slika 6.8 – Lambertov zakon raspršavanja pri difuznoj refleksiji.

Difuzne refleksije veoma su značajne u akustičkom dizajnu prostorija raznih namena. Na primer, postoje okolnosti kada je potrebno da se postigne statistička regularnost zvučnog polja u prostoriji, to jest da se postigne uniformnost pravaca kretanja zvučne energije. To se može ostvariti samo refleksionim površinama koje raspršavaju energiju. Druga okolnosti u kojoj postoji potreba za difuznim refleksijama javlja se kada je potrebno eliminisati pojavu nekog jakog reflektovanog talasa. Postavljanjem reljefne površine na mesto odakle se ta refleksija javlja učiniće da se upadna energija rasprši i tako minimizira pojava štetne refleksije.

Zbog takvih važnih primena difuznih refleksija vremenom su uvedene u upotrebu konstrukcije posebnih geometrijskih formi razvijene matematičkom analizom. One iznad neke granične frekvencije (odnosno ispod neke granične talasne dužine) relativno

uniformno reflektuju zvučnu energiju po pravcima. Takve konstrukcije nazivaju se difuzori i koriste se u obradi koncertnih sala i studijskih prostora. U starim koncertnim salama gipsani radovi, stubovi, galerije i slične forme imale su ulogu difuzora. U savremenom dizajnu za tu ulogu se izrađuju posebne konstrukcije odgovarajuće geometrijske forme. Na slici 6.9 prikazan je jedan često korišćeni oblik difuzora čija je geometrija optimizirana analitičkim putem. On se uobičajeno označava kao QRD difuzor (naziv je engleska skraćenica matematičke forme kojom je definisana njegova geometrija). Takav oblik se može videti u akustičkoj obradi mnogih studijskih prostora. Prikazana forma difuzora ima nekoliko varijeteta, ali je njihova namena uvek ista. Razlike postoje samo u detaljima reljefa.



Slika 6.9 - Jedan primer konstrukcije difuzora koji se primenjuje u akustičkom dizajnu prostorija (tzv. QRD difuzor).

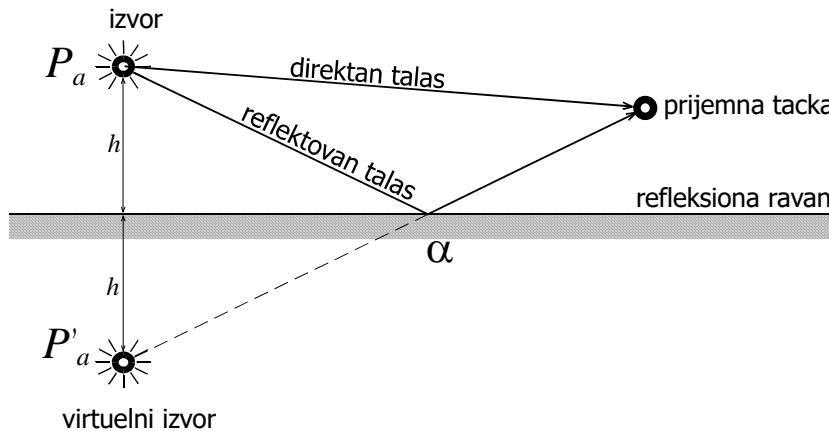
6.3 Zvučno polje u prisustvu refleksije

Slučaj talasa koji iz vazduha nailazi na tvrdi zid i reflektuje se od njega predstavlja opšte mesto u akustici. U čovekovom životnom okruženju vazdušni prostor u kome se javljaju zvučne pojave omeđen je raznim pregradama od masivnih materijala. Sve te realne pregrade u okruženju predstavljaju velike diskontinuitete sredine. U tom smislu granični slučaj su prostorije. U njima je zvučno polje u opštem slučaju omeđeno sa šest tvrdih ravnih (zidovi, pod, plafon).

Zvučno polje u pristvu refleksija postaje složeno. U odnosu na okolnosti koje vladaju u slobodnom prostoru gde u svakoj tački postoji samo jedan talas koji direktno dolazi od izvora, u prisustvu refleksija zvučno polje je rezultat superponiranja direktnog talasa i refleksija. Specifičnost superponiranja direktnog talasa i refleksije je u tome što su to dva ista zvuka koja su išla različitim putanjama. Oni se međusobno razlikuju samo po tome što refleksija uvek kasni relativno u odnosu na direktni zvuk jer na svom putu prelazi dužu putanju. U takvim okolnostima rezultat njihovog superponiranja zavisi od tog relativnog kašnjenja.

Modelovanje refleksija

Proračun zvučnog pritiska, odnosno nivoa zvuka u nekoj tački zvučnog polja kada u nju dospevaju refleksije zahteva precizno definisanje putanja reflektovanih talasa da bi se mogli odrediti međusobni fazni stavovi svih komponenti polja. Najprostiji slučaj je kada postoji samo jedna refleksija, i takav slučaj je prikazan u primeru sa slike 6.10. U pokazanom primeru zvučni izvor se nalazi iznad jedne beskonačne refleksione ravni čija površina ima neki koeficijent apsorpcije α . U prijemnu tačku stižu direktni i reflektovani talas. Za opisivanje stanja u zvučnom polju potreban je model kojim se u opštem slučaju može lako odrediti putanja reflektovanog talasa.



Slika 6.10 - Refleksiona ravan i virtualni izvor

Ako važe pretpostavke da je ravan beskonačna i da je zvučni izvor dovoljno udaljen od ravni tako da ravan ne utiče na njegov rad (bar više od jedne talasne dužine) refleksija talasa se može modelovati primenom geometrijskih principa. To podrazumeva da se u postupak modelovanja uvodi pojam virtualnog izvora na način koji se primenjuje u drugim oblastima u kojima se koriste geometrijski modeli za analizu prostiranja talasa (optika, elektromagnetika itd.). Virtualni izvor se postavlja simetrično u odnosu na refleksionu ravn kao lik realnog izvora (lik u "ogledalu"). Ovaj postupak je ilustrovan na slici 6.10. Nakon određivanja položaja virtualnog izvora, u daljoj analizi se uklanja refleksiona ravan, a reflektovani talas je predstavljen talasom koga generiše virtualni izvor kao poseban zvučni izvor.

Akustička snaga virtualnog izvora P'_a zavisi od efikasnosti refleksije. Kroz vrednost snage virtualnog izvora modeluje se gubitak energije usled apsorpcije na površini refleksione ravni. Ako se proces refleksije javlja na površini koja je opisana koeficijentom apsorpcije α , onda je intenzitet reflektovanog talasa nakon refleksije

$$J_r = (1 - \alpha) J \quad (6.13)$$

gde je J intenzitet koji bi talas imao samo na osnovu pređenog puta, odnosno kada bi refleksija bila bez gubitaka. Na osnovu toga definiše se snaga virtualnog izvora P'_a koji generiše reflektovani talas:

$$P_a' = P_a(1 - \alpha) \quad (6.14)$$

Vidi se da je u slučaju potpune refleksije ($\alpha = 0$) snaga virtuelnog izvora jednaka snazi realnog izvora.

Stojeći talas ispred prepreke pri normalnoj incidenciji

Pokazano je da u prostoru ispred zida od koga se reflektuje zvučni talas polje postaje složeno jer nastaje kao rezultat superponiranja direktnog i reflektovanog talasa. Pritisak i brzina u prostoru ispred zida određeni su izrazima (6.1) i (6.2). Ako je poznat faktor refleksije zida, onda je zvučno polje ispred njega:

$$\underline{p}(x, t) = \hat{p}_+ e^{j(\omega t - kx)} + R \hat{p}_+ e^{j(\omega t + kx + \delta)} \quad (6.15)$$

Na osnovu ranije definisane impedanse može se slično napisati izraz za brzinu u prostoru ispred zida:

$$\underline{v} = \frac{\hat{p}_+}{\underline{Z}_{s1}} e^{j(\omega t - kx)} + R \frac{\hat{p}_+}{\underline{Z}_{s1}} e^{j(\omega t + kx + \delta)} \quad (6.16)$$

U slučaju dovoljno masivnog tvrdog zida $\underline{Z}_{s2} = \infty$, a $\underline{Z}_{s1} = \rho c$. U prvoj aproksimaciji može se smatrati da tada nastaje potpuna refleksija, jer je razlika impedansi velika, pa je $R = 1$. Zbog toga je amplituda direktnog talasa jednaka amplitudi reflektovanog talasa. Pošto je na masivnom zidu i $\delta = 0$, to jest nema promene faze, izraz (6.15) postaje

$$\underline{p}(x, t) = \hat{p}_+ \left[e^{j(\omega t - kx)} + e^{j(\omega t + kx)} \right] \quad (6.16)$$

Posle sređivanja ovog izraza dobija se:

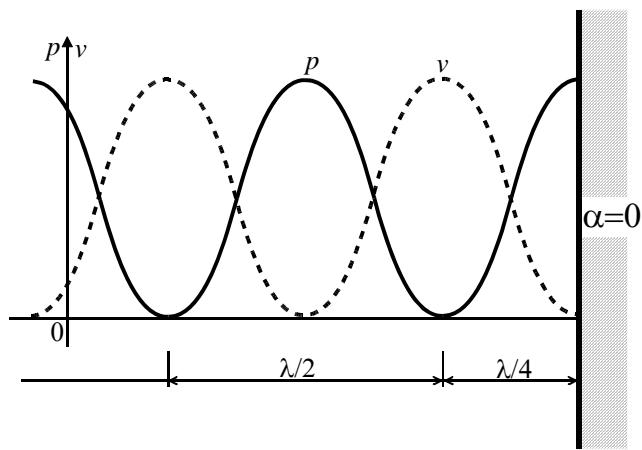
$$\underline{p}(x, t) = 2 \hat{p}_+ \cos kx e^{j\omega t} \quad (6.17)$$

Izraz pokazuje da se pri superponiranju direktnog i reflektovanog talasa ispred zida prostorna raspodela amplituda ne menja u vremenu. Vrednost amplitude pritiska duž x ose određena je članom $\cos kx$, što znači da nema efekta prostiranja. Raspodela amplituda pritiska ispred zida ima fiksnu formu koja se naziva stojeći talas.

Na slici 6.11 prikazana je forma stojećeg talasa ispred masivnog zida pri normalnoj incidenciji. Na površini zida pritisak ima maksimalnu vrednost, a minimum se nalazi na udaljenosti od zida koja je jednaka četvrtini talasne dužine. Perioda ponavljanja forme stojećeg talasa je $\lambda/2$. U slučaju potpune refleksije, amplitude direktnog i reflektovanog talasa su jednake, kao u izrazu (6.16), pa stojeći talas u maksimumu ima amplitudu $2p_+$. Istovremeno, u minimumima nastaje potpuno poništavanje direktnog i reflektovanog talasa, pa je amplituda pritiska u stojećem talasu na tim mestima 0. U slučaju da refleksija

nije potpuna, to jest kada koeficijent apsorpcije zida nije jednak nuli, amplituda stojećeg talasa se smanjuje. U tom slučaju u maksimumima talasa pritisak će biti manji od $2p_+$, a u minimumima neće dolaziti do potpunog poništavanja i u njima će pritisak biti veći od nule. Prema tome, u zavisnosti od vrednosti faktora refleksije pritisak u maksimumu stojećeg talasa biće između p_+ i $2p_+$, a u minimumima između 0 i p_+ . Na osnovu toga se merenjem veličine stojećeg talasa može odrediti vrednost faktora refleksija i koeficijenta apsorpcije pregrade.

Promena brzine oscilovanja u stojećem talasu takođe je ucrtana u slici 6.11. Na samoj površini zida brzina oscilovanja mora biti nula, jer nije moguće longitudinalno kretanje molekula zbog prisustva masivne prepreke. Sa slike se vidi da se maksimumi brzine poklapaju sa minimumima pritiska, odnosno minimumi brzine sa maksimumima pritiska.

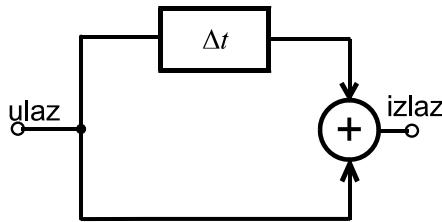


Slika 6.11 – Pritisak i brzina u zvučnom polju ispred masivnog zida.

Frekvencijski sadržaj zvučnog polja sa refleksijom

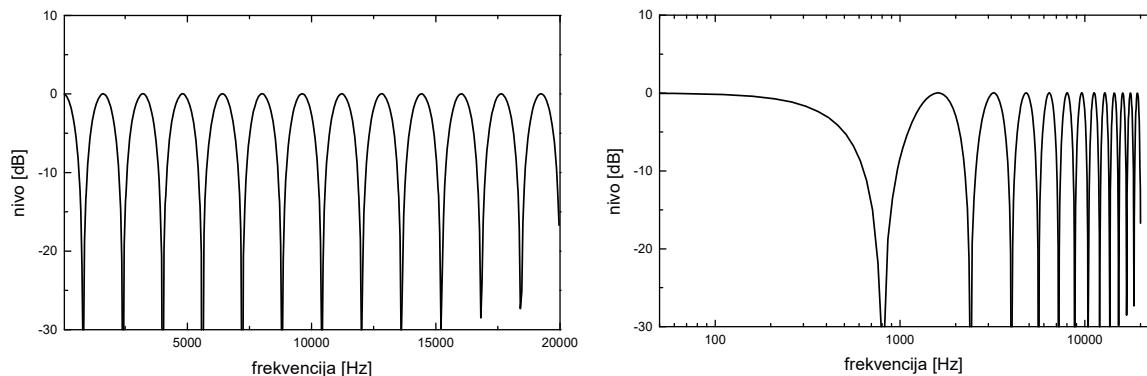
Između direktnog zvuka i refleksije postoji konstantno vremensko kašnjenje koje nastaje zbog razlike u pređenim putanjama, kao što je pokazano na slici 6.10. Kao rezultat stvara se razlika u fazama između spektralnih komponenata ova dva signala. U okolnostima konstantnog vremenskog kašnjenja fazni stavovi između spektralnih komponenti koje se superponiraju menjaju se po frekvencijama. Rezultantni pritisak na mestu prijema zavisi od međusobnih faznih stavova i relativnog odnosa amplituda spektralnih komponenti. U opštem slučaju rezultat je promena u spektru zvuka.

Da bi se detaljnije analiziralo superponiranje direktnog i reflektovanog zvuka može poslužiti slika 6.10 gde se javlja jedna refleksija. Proces sa slike može se opisati principijlnom blok šemom koja je prikazana na slici 6.12. U zavisnosti od toga koliki je vremenski pomak Δt između direktne i reflektovane komponente, rezultat superponiranja po frekvencijama može biti od poništavanja do sabiranja.



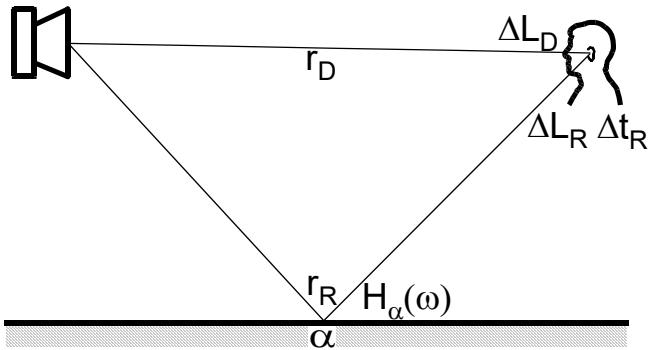
Slika 6.12 - Principijelna blok šema nastanka češljastog filtra.

Na svim frekvencijama na kojima je putna razlika između reflektovanog i direktnog talasa neparni umnožak polovine talasne dužine nastaje slabljenje, jer su direktni i reflektovani talas u protivfazi. Na frekvencijama na kojima je putna razlika celobrojni umnožak talasne dužine (to jest parni umnožak polovine talasne dužine) dolazi do njihovog sabiranja, jer su tada ova dva talasa u fazi. Kao ukupni rezultat spektar zvuka nakon superponiranja sa svojom refleksijom postaje izmenjen s formom koja se definiše kao češljasti ili „komb“ filter. Njegov izgled je prikazan na slici 6.13. Prikazana je rezultantna frekvencijska karakteristika sistema prenosa sa jednom refleksionom ravninom za slučaj kada je relativno kašnjenje refleksije $\Delta t = 1,25$ ms. Dijagrami su mormalizovani tako da je najveća vrednost postavljena na 0 dB. S obzirom da reflektovan talas prelazi duži put i još eventualno gubi deo energije pri refleksiji, slabljenje nikada ne znači potpuno poništavanje.



Slika 6.13 - Frekvencijska karakteristika komb filtra sa slike 6.12 za kašnjenje Δt od 1,25 ms, prikazan u dve različite razmere duž frekvencijske ose: linearna razmera (levo) i logaritamska razmera (desno)

U realnosti uticaj refleksije na zvučno polje nije idealan, kao što to predstavlja blok šema sa slike 6.12. Faktori koji utiču na razlike direktnog i reflektovanog talasa u realnim okolnostima principijelno su prikazane na slici 6.14. Pri prostiranju duž obe putanje zvuka, direktne i reflektovane, postoji slabljenje prema zakonu širenja talasnog fronta koje je srazmerno dužini putanja, pa direktan talas pretrpi slabljenje nivoa zvuka ΔL_R . Reflektovani talas će imati slabljenje ΔL_D koje nastaje usled širenja talasnog fronta, ali i usled gubitaka pri refleksiji, pri čemu je ΔL_R uvek veće od ΔL_D . Za rezultat superponiranja relevantno je relativno slabljenje refleksije $\Delta L = \Delta L_R - \Delta L_D$. Najzad, koeficijent apsorpcije refleksione ravni je uvek funkcija frekvencije, pa se refleksija može modelovati funkcijom prenosa $H_\alpha(\omega)$.



Slika 16.14 – Šematski prikaz faktora relevantnih za rezultat superponiranja direktnog i reflektovanog talasa.

Zbog konačnosti brzine prostiranja zvuka, duža putanja koju prelazi refleksija u odnosu na direktan zvuk prouzrokuje konstantno kašnjenje refleksije Δt :

$$\Delta t = \frac{\Delta r}{c} = \frac{r_R - r_D}{c} \quad (6.18)$$

gde je c brzina prostiranja zvuka a Δr putna razlika direktnog i reflektovanog talasa. Na mestu slušaoca postoji njihova frekvencijski zavisna fazna razlika $\Delta\varphi$ koja određuje rezultat superponiranja:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = 2\pi \Delta t f = \omega \Delta t \quad (6.19)$$

7. POJAVE PRI PROSTIRANJU ZVUKA U VAZDUHU

Na sudbinu zvučnog talasa kada krene od izvora, a time i na strukturu zvučnog polja, utiču razne fizičke pojave. U drugom poglavlju je objašnjeno da se prilikom udaljavanja zvučnog talasa od izvora javlja slabljenje zbog širenja talasnog fronta. Ta pojava je označena kao "zakon 6 dB". U prethodnom poglavlju opisana je pojava refleksije koja nastaje pri nailasku talasa na diskontinuitet impedanse. Međutim, osim širenja talasnog fronta i refleksije postoje i druge pojave koje utiču na sudbinu zvučnog talasa, a time i na stanje u zvučnom polju. One nastaju usled procesa u samom mediju, to jest u vazduhu kroz koji se talas prostire, ili kao posledica interakcije talasa sa fizičkim preprekama na koje nailazi.

Kao posledica fizičkih procesa u samom mediju kroz koji se talas prostire javljaju se pojave označene kao disipacija i refrakcija, a pri susretu talasa sa preprekama na njihovim ivicama javlja se pojava difrakcije. Sve tri navedene pojave imaju uticaja na intenzitet i spektralni sadržaj zvuka koji iz nekog izvora stiže u tačku posmatranja. Pojedinačan značaj svake od njih zavisi od okolnosti.

7.1 Pojave u mediju

Pojave pri prostiranju koje nastaju u samom medijumu posledica su osobina vazduha kao fizičke sredine. Nastaju kao posledica nekih procesa na molekularnom nivou vazduha ili usled nehomogenosti vazdušne mase.

Disipacija

Slabljenje nivoa zvuka po zakonu "6 dB", koje je ranije prikazano, nastaje samo širenjem talasnog fronta. Takva pojava podrazumeva da pri tome ne postoje gubici zvučne energije, već je to samo razvlačenje fiksne količine zvučne energije talasa na sve veću i veću površinu talasnog fronta. Međutim, u vazduhu se pri prostiranju zvuka naporedo odvija i proces trošenja zvučne energije, odnosno njen nepovratno pretvaranje u druge oblike. To je proces disipacije, što znači nestajanje energije iz zvučnog polja zbog pretvaranja u druge oblike. Mehanizam nastanka disipacije ima relativno složenu prirodu. Od uticaja su viskoznost fluida, lokalno odvođenje toplote i izvesni rezonantni procesi na molekularnom nivou. Samerljivi efekti disipacije na čujnim frekvencijama u najvećoj su meri posledica molekularnih gubitaka. Pri tome, vodena para deluje

katalitički na taj proces, pa gubici zvučne energije usled disipacije zavise od vlažnosti vazduha.

Proces disipacije zvučne energije podrazumeva da se na jediničnoj dužini puta talasa gubi fiksni procenat njegove trenutne energije. Zbog toga se slabljenje energije sa pređenim putem usled disipacije odvija po eksponencijalnom zakonu. Zbog toga je intenzitet zvuka nakon pređenog rastojanja r :

$$J = J_o e^{-mr} \quad (7.1)$$

gde je J_o intenzitet u početnoj tački putanje talasa definisanoj sa $r = 0$, a koeficijent m je veličina koja kvantitativno određuje to slabljenje. Iz gornjeg izraza je jasno da ovaj koeficijent dimenziono mora biti $[m^{-1}]$. Koeficijent m dominantno zavisi od frekvencije, pri čemu njegova vrednost rapidno raste sa frekvencijom. On u izvesnoj meri zavisi i od vlažnosti vazduha. Postoji zavisnost i od temperature, ali je ona mala i uglavnom se može zanemariti.

Kada se u izraz (7.1) doda i proces širenja talasnog fronta, dobija se opšti izraz koji definiše intenzitet zvuka na nekom rastojanju od izvora r ako je poznat početni intenzitet J_o na rastojanju r_o :

$$J = J_o \frac{r_o^2}{r^2} e^{-m(r-r_o)} \quad (7.2)$$

Izraženo preko pritisaka to je:

$$p = p_o \frac{r_o}{r} e^{-\frac{m}{2}(r-r_o)} \quad (7.3)$$

Gornji izrazi mogu se prevesti u njihov logaritamski oblik (deljenjem leve i desne strane izraza (7.2) referentnim intenzitetom $10^{-12}W/m^2$, logaritmujući obe strane i množeći ih sa 10). Tako se dobija izraz koji definiše promenu nivoa zvuka na putu talasa od r_o do r :

$$\Delta L[dB] = 20 \log \frac{p_o}{p} = 20 \log \frac{r}{r_o} + 4,34m(r - r_o) \quad (7.4)$$

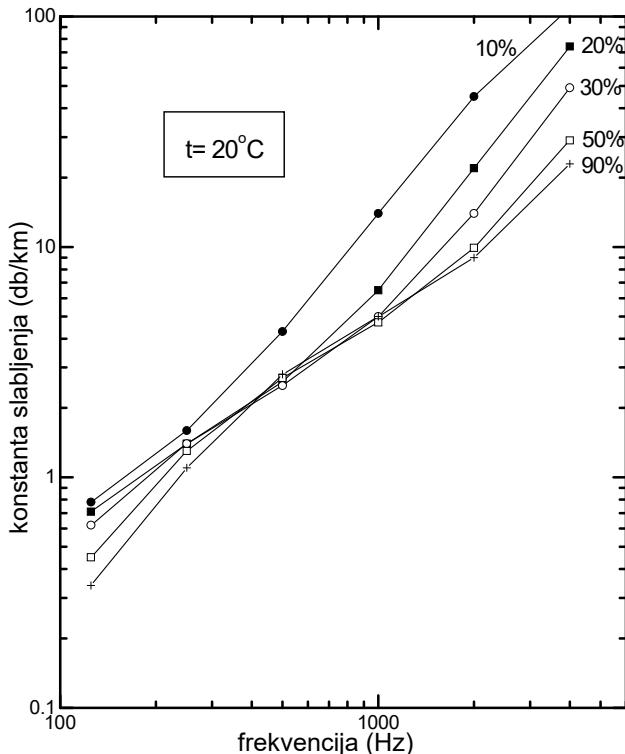
Prvi član sa desne strane gornjeg izraza definiše slabljenje usled širenja talasnog fronta, a drugi član slebljenje usled disipacije. Ukupno slabljenje je suma ova dva člana.

U izrazu (7.4) pojavljuje se faktor $4,34m$ ispred drugog člana. U praksi se ovaj faktor posmatra kao jedinstven pokazatelj slabljenja nivoa zvuka usled disipacije umesto samog koeficijenta m . Zbog logaritamske forme izraza (7.4) taj faktor mora biti dimenziono [dB/m]. Tako se izraz (7.4) može pisati:

$$\Delta L[dB] = 20 \log \frac{r}{r_o} + (r - r_o) d[dB/m] \quad (7.5)$$

gde je d koeficijent slabljenja nivoa zvuka usled disipacije u vazduhu. Njegova vrednost može se odrediti merenjem. Zbog relativno malih vrednosti ubičajeno se iskazuje preko veličine slabljenja na većim deonicama pređenog puta, najčešće u [dB/km] ili [dB/100 m].

Na slici 7.1 pokazan je dijagram vrednosti slabljenja nivoa zvuka usled disipacije (pri temperaturi 20°C), preuzet iz literature. Parametar je vlažnost vazduha. Sa smanjenjem temperature vrednosti slabljenja nivoa zvuka u manjoj meri se povećavaju, ali je ta promena zanemarljiva. Koeficijent m iz izraza (7.1) takođe se može naći u literaturi definisan dijagrom, ali je u praksi korisniji podatak o slabljenju nivoa zvuka d u [dB/m].

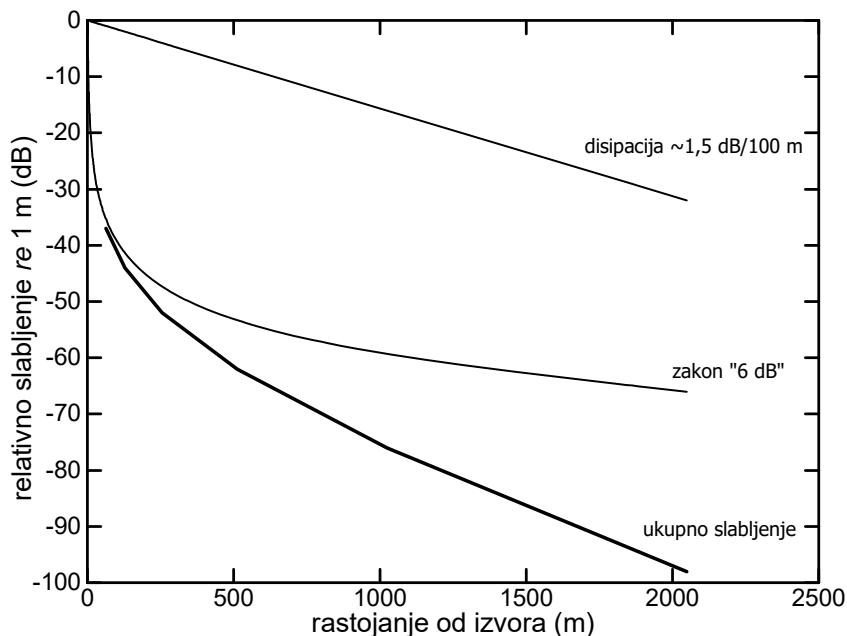


Slika 7.1 - Dijagram slabljenja nivoa zvuka usled disipacije na temperaturi vazduha 20°C ; parametar je vlažnost vazduha

Sa dijagraama prikazanog na slici 7.1 jasno je da su slabljenja usled disipacije ekstremno velika u oblasti visokih frekvencija, posebno u oblasti ultrazvuka. Već na frekvencijama reda veličine 10 kHz ono može biti nekoliko desetina dB na 100 m , odnosno preko 100 dB/km . To znači da na visokim frekvencijama disipacija postaje osnovni faktor koji određuje prostiranje zvuka. Zbog tako velikih vrednosti slabljenja, zvuk na vrlo visokim frekvencijama, to jest ultrazvuk, u vazduhu nije upotrebljiv na većim distancama. Praktična primena ultrazvuka u vazduhu ograničena je samo na vrlo mala rastojanja od izvora.

U izrazu (7.5) pokazano je da je ukupno slabljenje zvuka pri prostiranju kroz vazduh zbir slabljenja usled širenja talasnog fronta i slabljenja usled disipacije. Na slici 7.2 prikazana je jedna ilustracija promena nivoa zvuka sa rastojanjem od izvora koja nastaje delovanjem svakog od ova dva faktora pojedinačno, i njihov zbirni uticaj. U ovoj ilustraciji usvojena vrednost slabljenja usled disipacije je $1,5\text{ dB/100 m}$, što odgovara frekvencijama oko 2 kHz . Sa dijagraama se vidi da na manjim rastojanjima širenje talasnog

fronta dominantno određuje nivo zvuka. Ukupno slabljenje nivoa do rastojanja reda veličine 100 m od izvora praktično se poklapa sa krivom koja definiše slabljenje usled uticaja širenja talasnog fronta. Odatle proizilazi da u proračunima ukupnog nivoa nekog širokopojasnog zvuka uticaj dissipacije na malim rastojanjima može se zanemariti. Međutim, na većim rastojanjima dissipacija ima veliki uticaj, pa se kriva ukupnog slabljenja razilazi od krive zakona "6 dB". To znači da se pri proračunima nivoa zvuka na većim rastojanjima čini velika greška ako se zanemaruje dissipacija. Na veoma velikim rastojanjima od izvora, reda kilometara, uticaj dissipacije dominantno određuje domete čujnosti nekog zvuka.

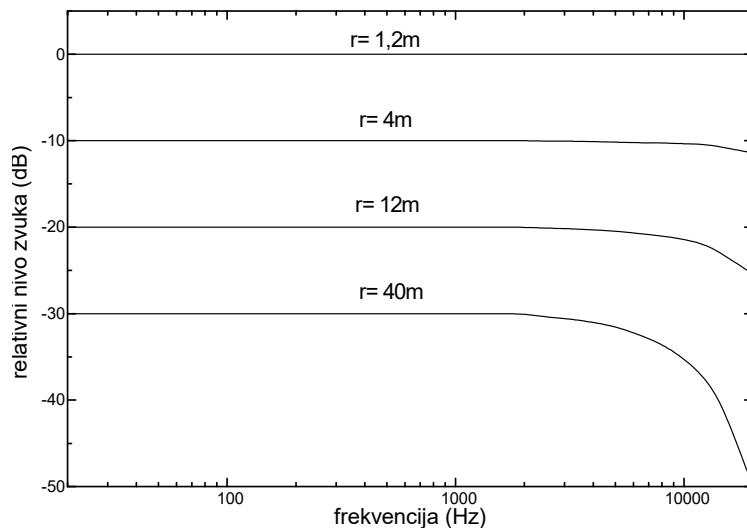


Slika 7.2 - Dijagram opadanja nivoa zvuka sa rastojanjem od izvora

Prema tome, dissipacija ne utiče bitno na ukupni nivo zvuka u zoni neposredno oko izvora. Međutim, i na relativno malim rastojanjima postoji izvestan uticaj dissipacije koji se može zapaziti, jer izražena frekvencijska zavisnost slabljenja utiče na relativne promene spektralnog sadržaja zvuka. Jedna ilustracija ove činjenice prikazana je na slici 7.3. Na njoj je ucrtana promena spektralnog nivoa belog šuma na četiri različita rastojanja od zvučnog izvora koji ga emituje. Dijagram se može shvatiti i kao prikaz relativnih promena u spektralnom sadržaju realnih zvukova sa povećavanjem rastojanja od izvora. Za referantnu udaljenost od izvora usvojeno je rastojanje 1,2 m. Za prikaz su odabrana rastojanja koja podrazumevaju slabljenje usled širenja talasnog fronta u koracima od po 10 dB.

Sa slike se vidi da čak i na malim rastojanjima od izvora dolazi do izvesnog relativnog slabljenja na najvišim frekvencijama, bliskim graničnoj frekvenciji 20 kHz. Na rastojanju 12 m od izvora spektralne promene iznad 10 kHz su značajne, a na 40 m značajne spektralne promene javljaju se već iznad nekoliko kiloherca. Ovakve promene spektralnog sadržaja zvuka pri prostiranju kroz vazduh manifestuju se kao promena boja

zvuka, koja je srazmerna udaljenosti od izvora. Proširujući ovu konstataciju može se reći da svi zvukovi koji dolaze od izvora koji se nalaze na većim rastojanjima imaju promjenjiv spektralni sadržaj, jer na većim rastojanjima dolazi do relativnog potiskivanja visokih frekvencija (vidi okvir).



Slika 7.3 – Relativne promene u spektru zvuka sa rastojanjem od izvora.

Ima nekoliko karakterističnih primera iz života koji ilustruju uticaj disipacije na promene spektralnog sadržaja zvuka. Prvi primer su duvački orkestri koji sviraju po ulicama, obično kada su neki praznici. Kada se slušalac iz daljine približava orkestru prvo čuje samo bubanj, jer njegov zvuk dominantno sadrži niske frekvencije koje najmanje slave disipacijom. Sve ostale komponente zvuka orkestra u uslovima uličnog ambijenta oslabljenje su ispod nivoa percepcije. Sa približavanjem orkestru polako se pojavljuju i drugi instrumenti u njegovom zvuku, i tek kada se dovoljno priđe može se čuti kompletan zvuk.

Drugi primer su koncertne sale. U njima zvučni talasi relativno dugo putuju kroz prostor dok potpuno ne izgube svoju energiju. Na tom putu deluje disipacija zbog čega se zvuk na mestima koja nisu neposredno ispred orkestra odlikuje relativno oslabljenim visokim frekvencijama. Interesantno je da su slušaoci na to navikli, pa se tako izmenjeni spektralni sadržaj smatra standardnim zvukom u sali. On se razlikuje od zvuka koji se može registrovati neposredno pored muzičara na bini.

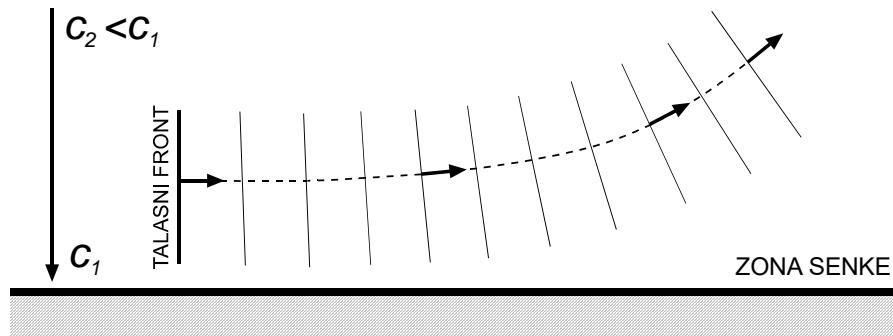
U sistemima za ozvučavanje bioskopskih sala frekvencijska karakteristika se, po standardu, ne podešava da bude potpuno linearna, već da ima postepeno slabljenje ka višim frekvencijama. To slabljenje počinje od 2 kHz i podrazumeva konstantno obaranje frekvencijske karakteristike ka višim frekvencijama. Takva karakteristika sistema za ozvučavanje gledaocu obezbeđuje subjektivni utisak prirodnosti zvukova koji prate filmsku sliku.

Refrakcija

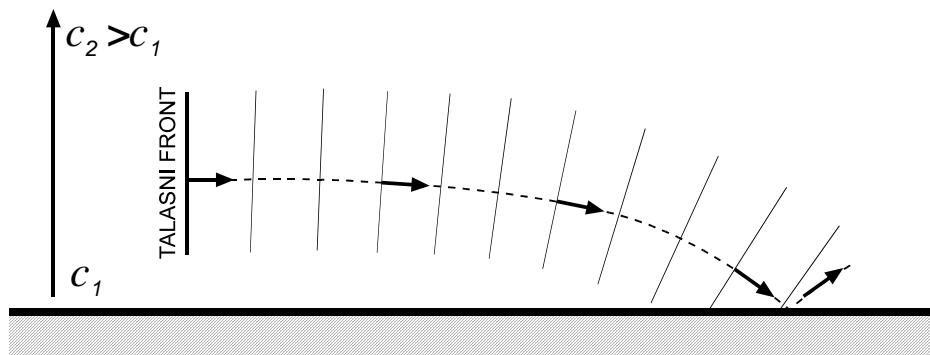
Refrakcija je pojava savijanja talasnog fronta, odnosno pojava da talas pri prostiranju odstupa od pravolinijskog kretanja. Refrakcija nastaje kada postoji nehomogenosti sredine kroz koju se talas prostire, pri čemu nehomogenost podrazumeva pojavu različitih brzina prostiranja zvuka po zapremini medija. Uobičajena je pojava da se brzina zvuka menja sa visinom od tla. U vazdušnoj sredini razlika u brzinama prostiranja zvuka u prostoru može nastati usled pojave gradijenta temperature po visini od tla ili pri pojavi vetra. Gradijent temperature po visini posebno je izražen ujutru i uveče, jer je tada najveća razlika u temperaturama tla i vazduha.

Na slikama 7.4 i 7.5 prikazan je princip skretanja talasnog fronta pri dva moguća gradijenta brzine prostiranja zvuka po visini od tla. Kada brzina opada sa visinom talasni front pri zemlji kreće se brže od talasnog fronta u visini. Zbog toga se javlja skretanje talasa naviše, kao što je prikazano na slici 7.4. Pri refrakciji u kojoj talasni front skreće naviše na izvesnom rastojanju od izvora pojavljuje se takozvana "zvučna senka". Tako se naziva zona u koju zvuk ne dospeva, jer sva energija talasa skreće u vis. Pri ovakvoj refrakciji zvuk se ne može čuti na rastojanjima koja su veća od granice senke, bez obzira na snagu izvora i sve druge njegove osobine. Kada brzina zvuka raste sa visinom talasni front pri zemlji tada se prostire sporije nego u visini, pa zvučni talas skreće naniže, kao što je prikazano na slici 7.5. Ovakva refrakcija omogućava da se zvuk iz nekog izvora čuje na većim rastojanjima nego što je uobičajeno.

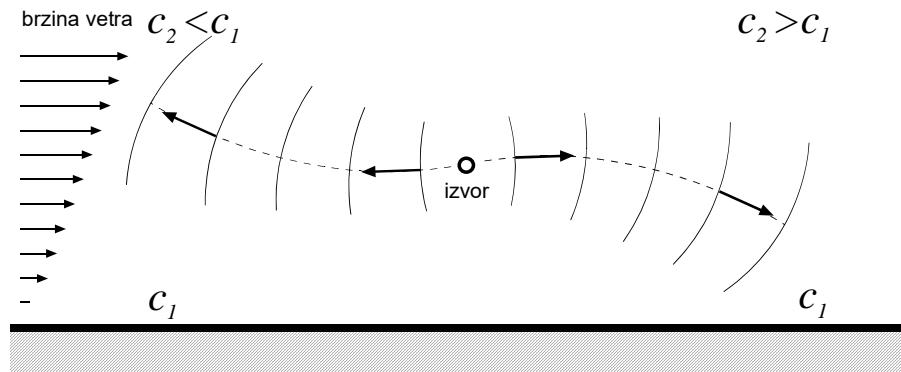
Kada se u prisustvu vetra kreće čitava vazdušna masa, onda je brzina prostiranja zvučnog talasa rezultanta brzine kretanja vazduha i brzine prostiranja zvuka. Zbog prepreka na tlu i viskoznosti vazduha uobičajeno je da postoji izvesni gradijent brzine vetra sa visinom od tla, pri čemu je uvek brzina kretanja vazdušne mase u vetruscu najmanja pri zemlji i raste sa visinom. Iako je brzina zvuka značajno veća od uobičajenih brzina kretanja vazduha kada duva vetrar, varijacije rezultatne brzine prostiranja zvučnog talasa po visini mogu dovesti do pojave savijanja njegove putanje. Refrakcija koja se javlja u takvim okolnostima prikazana je na slici 7.6. Ako se apstrahuje eventualno istovremeno postojanje gradijenta temperature, pri kretanju zvuka niz vetrar javlja se savijanje talasnog fronta prema tlu jer je brzina kretanja talasnog fronta na visini veća od brzine pri tlu. U smeru nasuprot vetrusu talasni front se savija naviše jer je brzina prostiranja pri tlu veća nego u visini. To utiče da se sa te strane javlja zvučna senka, kao u slučaju sa slike 7.4.



Slika 7.4 - Refrakcija usled negativnog gradijenta brzine zvuka po visini



Slika 7.5 - Refrakcija usled pozitivnog gradijenta brzine zvuka po visini

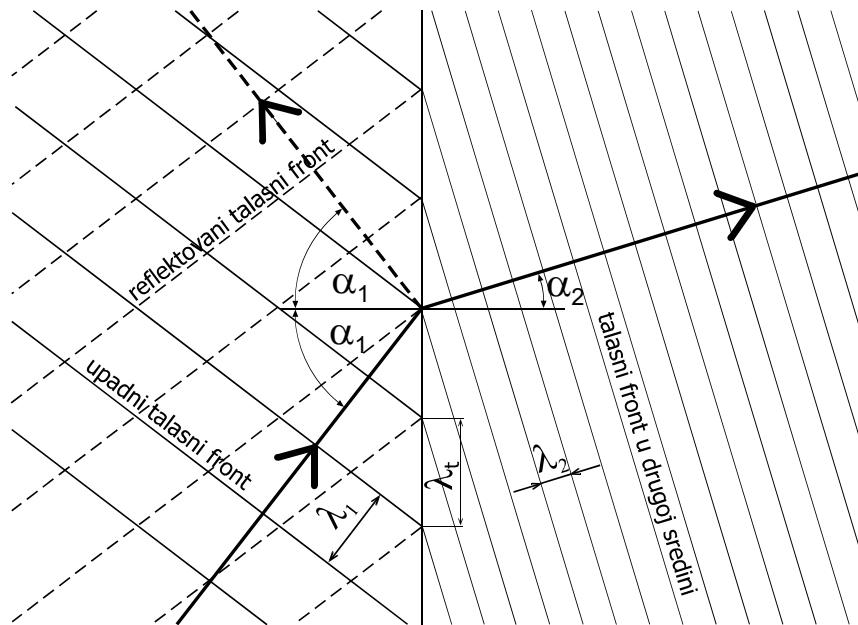


Slika 7.6 - Refrakcija pri vetru

Vidi se da je pri pojavi gradijenta temperature po visini difrakcija osno simetrična u odnosu na normalu na tlo koja prolazi kroz izvor. U svim pravcima oko zvučnog izvora skretanje talasnog fronta je jednako. Kada se refrakcija javlja zbog vetra, pojava refrakcije nije osno simetrična. U suprotnim smerovima duž pravca duvanja vetra pojave skretanja zvučnog talasa su različite.

Refrakcija pri prelasku talasa u drugu sredinu

U prethodnom poglavlju refleksija pri nailasku zvučnog talasa na sredinu drugačije impedanse razmatrana je podrazumevajući da se pojava posmatra iz prve sredine, i tada je samo reflektovani talas relevantan. U okolnostima kose incidencije talas koji prelazi u drugu sredinu tom prilikom nije razmatran (slika 6.5). Međutim, ako se posmatranje pojave refleksije proširi i na drugu sredinu, videće se da u opštem slučaju na ravni diskontinuiteta dolazi do promene pravca prostiranja, što predstavlja refrakciju. Pojava je prikazana na slici 7.7. Do promene pravca dolazi zbog različitih brzina kretanja zvuka u dve sredine. Za razliku od prethodno opisane refrakcije usled gradijenta temperature ili pri pojavi vетра, gde je promena pravca prostiranja talasa kontinualna u prostoru (postepeno skretanje), u ovom slučaju dolazi do jednokratne, nagle promene pravca na graničnoj ravni.



Slika 7.7 - Prikaz refleksije pri kosoj incidenciji talasa.

U prvoj sredini, odakle nailazi upadni talas, može se definisati ugao α_1 u odnosu na normalu refleksione ravni pod kojim je talas pogađa. Pod istim uglom se reflektovan talas u prvoj sredini udaljava od ravni. Pod pretpostavkom da je refleksiona ravan beskonačna, talasni front reflektovanog talasa zadržava oblik ravni. Talasna dužina zvuka u prvoj sredini λ_1 funkcija je brzine prostiranja c_1 . Talas u drugoj sredini nema istu brzinu prostiranja, pa se pri prelasku granične ravni menja talasna dužina (na slici 7.7 uvedena je pretpostavka da je $c_1 > c_2$, pa je talasna dužina u drugoj sredini λ_2 manja od talasne dužine u prvoj sredini λ_1).

Na graničnoj površini između dve sredine mora postojati jednakost faze talasa. Posledica toga je da trag obe talasne dužine na graničnoj ravni mora biti jednak (na slici označen sa λ_t). Da bi to bilo moguće, na graničnoj ravni mora da se promeni ugao prostiranja, odnosno dolazi do prelamanja talasa. Pri tome, kao i u optici, važi Snelov zakon:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \quad (7.6)$$

Pri kosoj incidenciji postoje okolnosti kada će se javiti totalna refleksija. To je slučaj za sve upadne uglove talasa za koje će ugao u drugoj sredini biti veći ili jednak $\pi/2$. Polazeći od Snelovog zakona taj graniči ugao je određen relacijom:

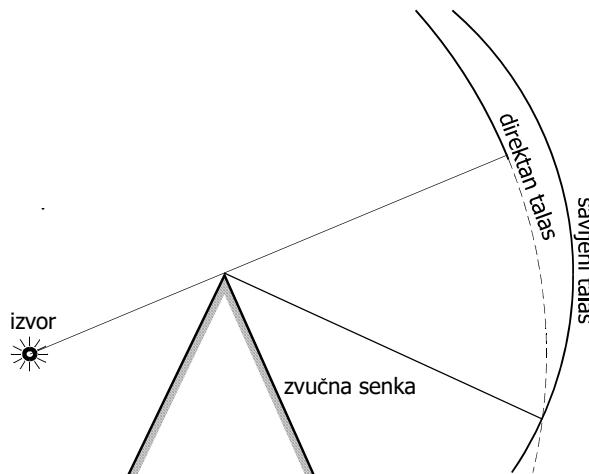
$$\sin \alpha_1 > \frac{c_1}{c_2} \quad (7.7)$$

Jasno je da do pojave totalne refleksije može doći samo ako je $c_2 > c_1$.

7.2 Difrakcija

Difrakcija je pojava savijanja dela energije zvučnog talasa oko ivice prepreke na koju nailazi pri prostiranju. Difrakcija je karakteristična za sve talasne pojave, pa i za zvuk. Zahvaljujući difrakciji deo energije talasa dospeva iza prepreke, u zonu koja se naziva "zvučna senka", iako tu nema optičke vidljivosti sa izvorom talasa.

Difrakcija se objašnjava pojavom da ivica prepreke pogodjena talasom postaje novi zvučni izvor koji zrači u okolni prostor, pa i u prostor iza prepreke. Ovo je šematski ilustrovano na slici 7.8, gde je označen i talasni front koji nastaje od ivice kao novog izvora. U literaturi su opisani matematički modeli difrakcije koji omogućavaju da se u jednostavnijim slučajevima modeluje zvučno polje iza prepreke. Polje u zoni iza prepreke rezultanta je superponiranja zračenja svih ivica prepreke koje su pogodjene dolazećim talasom. U takvim okolnostima u zvučnoj senci nivo zvuka je niži nego što bi bilo da prepreke nema. Nivo zvuka u zoni senke funkcija je geometrijskih parametara prepreke i talasne dužine zvuka.



Slika 7.8 - Ilustracija pojave difrakcije

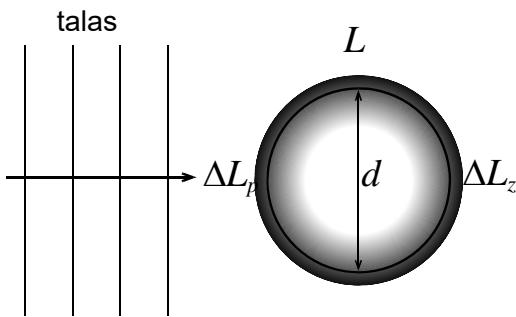
Difrakcione pojave na prerekama konačnih dimenzija

Kada se u zvučnom polju nalazi prepreka zanemarljivih dimenzija u odnosu na talasnu dužinu, ona svojim prisustvom ne unosi nikakav poremećaj u strukturi polja. To znači da talas velike talasne dužine obilazi dovoljno malu prepreku kao da nje nema. Sa porastom frekvencije, odnosno sa smanjenjem talasne dužine u odnosu na dimenzije prepreke, javlja se poremećaj u strukturi polja koji ona svojim prisustvom unosi. S prednje strane prepreke pri porastu frekvencije postepeno dolazi do sve izraženije pojave refleksije, odnosno sve veći procenat energije se reflektuje. U kranjem slučaju dovoljno visokih frekvencija, odnosno veoma malih talasnih dužina u odnosu na dimenzije prepreke, pojava refleksije odgovara okolnostima koje se javljaju na beskonačnoj ravni. Istovremeno, u zoni iza prepreke pojavljuje se zvučana senka. Zona iza prepreke dobija zvučnu energiju difrakcijom, to jest savijanjem talasa oko ivica. Posmatrano po frekvencijama, deo energije koji se reflektuje postaje sve veći a zvučna senka iza prepreke postaje sve izraženija.

S obzirom na veoma širok opseg frekvencija koji čovečije čulo sluha prima, a to znači i širok opseg talasnih dužina, na mnogim realnim prerekama u čovekovom okruženju opisana tranzicija između stanja njene neprimetnosti i stanja potpune refleksije dešava se u okvirima čujnog opsega. Komponente na najnižim čujnim frekvencijama obilaze prepreku, a komponente na najvišim frekvencijama reflektuju se od nje i iza prepreke se formira zvučna senka. U praksi je od posebnog značaja takav efekat na ljudskoj glavi kao prepreci, jer se na promenama po frekvencijama zasnivaju neke sposobnosti čula sluha. To je razlog zbog koga se mikrofoni prave tako da budu vrlo malih dimenzija, da bi u što širem frekvencijskom opsegu bili zanemarljivih dimenzija u odnosu na talasne dužine zvuka.

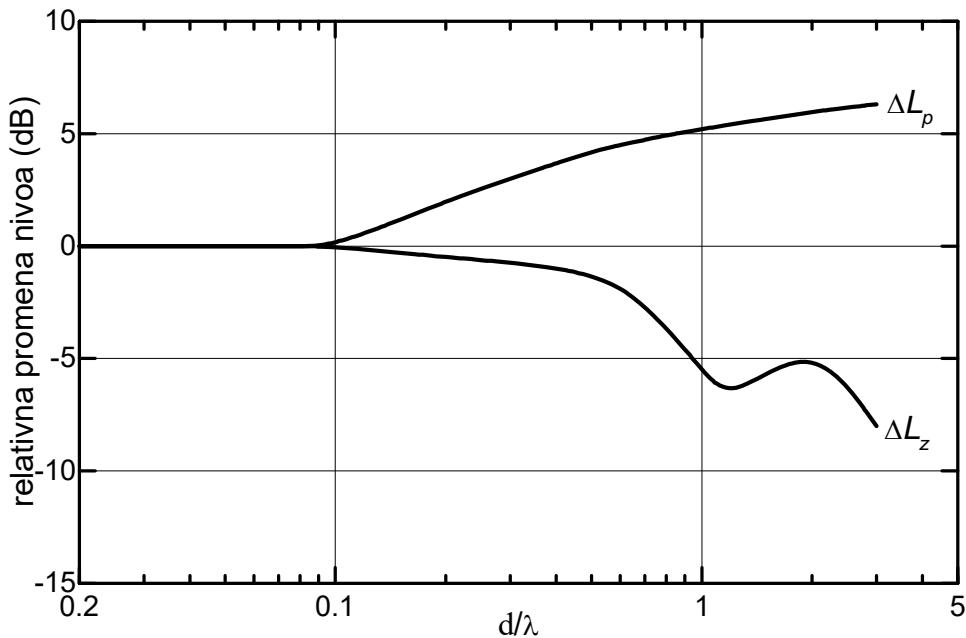
Pojava difrakcije na prepreci konačnih dimenzija ilustrovana je na slici 7.9. Uzet je primer kugle od masivnog materijala prečnika d , koja predstavlja prepreku nailazećem zvučnom talasu. Sve što je rečeno za opšti slučaj važi i ovde, pa se može reći da kugla kao prepreka ne unosi promenu u zvučnom polju na frekvencijama za koje je talasna dužina mnogo veća od njenog prečnika. Sa porastom frekvencije sa prednje strane kugle postepeno se javlja refleksija, pa je polje u toj zoni rezultanta superponiranja direktnog i reflektovanog zvuka. Sa zadnje strane kugle zvučna energija dospeva difrakcijom koja nastaje po čitavom njenom obodu, što čini da će tu nivo zvuka biti niži u odnosu na stanje pre unošenja kugle u zvučno polje.

Promene koje nastaju u zvučnom polju unošenjem kugle mogu se kvantifikovati promenama nivoa zvuka ispred i iza nje u odnosu na stanje kada kugla tu nije bilo. Ove promene su označene sa ΔL_p i ΔL_z . Izraženost refleksije i difrakcije na posmatranoj prepreci funkcija je odnosa talasne dužine i prečnika d . Zato su i veličine relativne promene zvučnog pritiska ispred i iza prepreke ΔL_p i ΔL_z funkcije ovog odnosa. Na slici 7.10 prikazane su analitički izračunate vrednosti ΔL_p i ΔL_z u funkciji od odnosa prečnika kugle i talasne dužine. Na taj način apscisna osa se može shvatiti kao skala normalizovane frekvencije.



Slika 7.9 - Slučaj difrakcije na prepreci konačnih dimenzija.

Sa dijagrama se vidi da postoji jedna granična oblast frekvencija, (približno u okolini $d/\lambda = 0,1$) ispod koje kugla svojim prisustvom uopšte ne utiče na strukturu zvučnog polja. Iznad te oblasti počinje uticaj kugle kao prepreke, što podrazumeva povišenje nivoa zvuka ispred i smanjenje iza nje. U slučaju kugle, zbog njenog pravilnog oblika, zvučna energija dospeva u zonu zvučne senke sa svih strana. Vidi se da postoji efekat superponiranja zvučne energije koja dospeva različitim putevima, što se manifestuje varijacijama nivoa zvuka iza kugle s promenom frekvencije.



Slika 7.10 - Relativna promena zvučnog pritiska ispred (ΔL_p) i iza lopte prečnika d kao prepreke konačnih dimenzija (ΔL_z)

Zaštitna funkcija akustičkih barijera

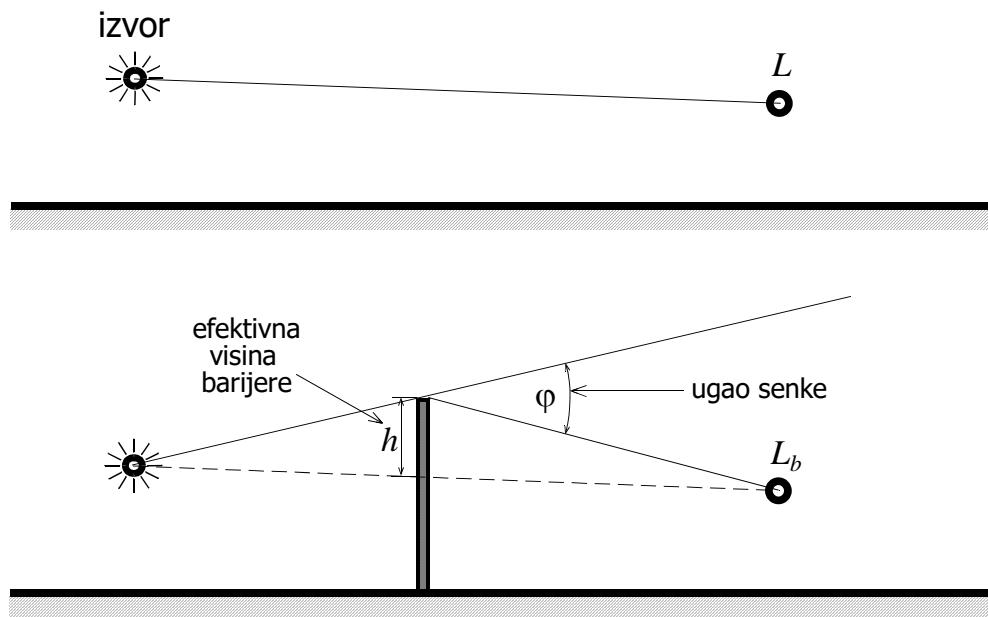
Činjenica da je nivo zvuka koji difrakcijom dospeva u zonu iza neke prepreke niži od nivoa koji bi na istom mestu postojao kada prepreke ne bi bilo značajna je za inženjersku oblast zaštite od buke. Postavljanje akustičkih barijera, odnosno zidova, uobičajeno je sredstvo za smanjenje nivoa neželjenog zvuka na otvorenom prostoru. Zaštitno dejstvo akustičke

brijere principijelno je prikazano na slici 7.11. Ako u nekoj tački prostora postoji nivo zvuka L , koji je prema nekim kriterijumima suviše visok, postavljanje zida kao brijere između izvora i te tačke unosi izvesno slabljenje L_b . Doprinos brijere kvantificuje se slabljenjem koje se definiše kao:

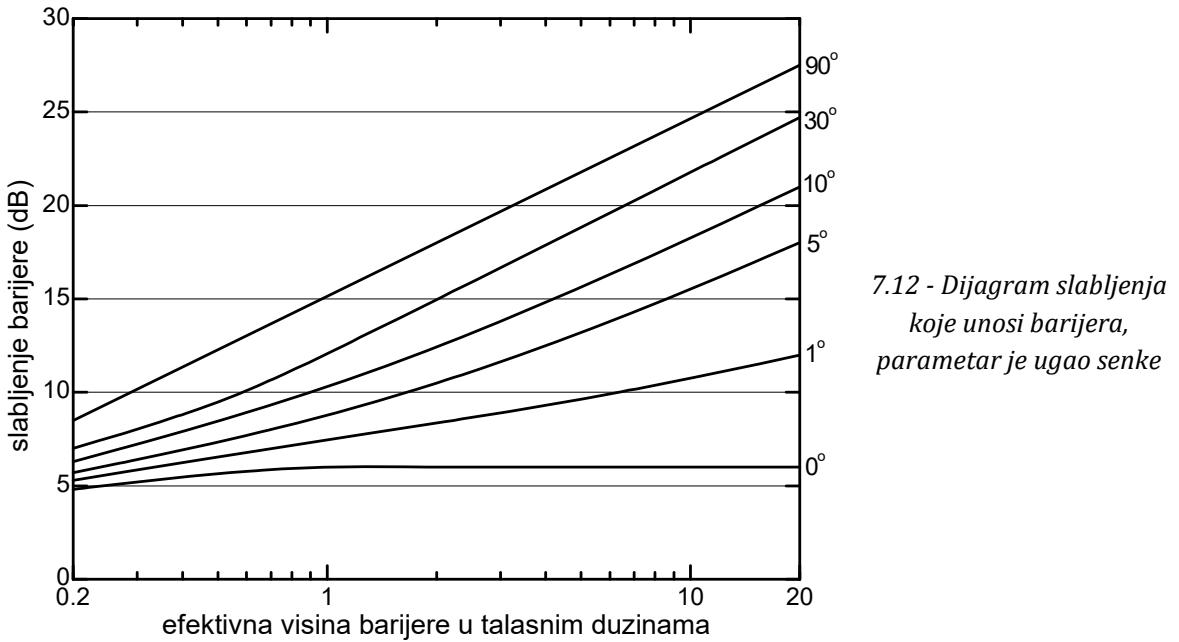
$$\Delta L = L - L_b \quad (7.8)$$

Veličina tog slabljenja funkcija je geometrijskih parametara, odnosno prostorne konfiguracije relevantnih tačaka: vrha brijere, izvora i prijemne tačke u kojoj treba sniziti nivo zvuka. U praksi se to može svesti na tri geometrijska podatka: talasnu dužinu λ , efektivnu visinu brijere h i ugao senke φ . Definicije parametri h i φ označene su na slici 7.11.

Veličina slabljenja ΔL koje unosi brijera svojim prisustvom između izvora i prijemnika u literaturi za inženjerske aplikacije uglavnom se prikazuje dijagramima. Jedan takav dijagram prikazan je na slici 7.12. Efektivna visina brijere, koja je predstavljena na apscisi, normalizovana je u odnosu na talasnu dužinu, a parametar na dijagramu je ugao senke. Sa dijagrama se može proceniti zavisnost slabljenja od talasne dužine, to jest frekvencije.



Slika 7.11 - Ilustracija primene brijere kao sredstva za smanjenje nivoa zvuka. Na slici su označeni relevantni geometrijski parametri.



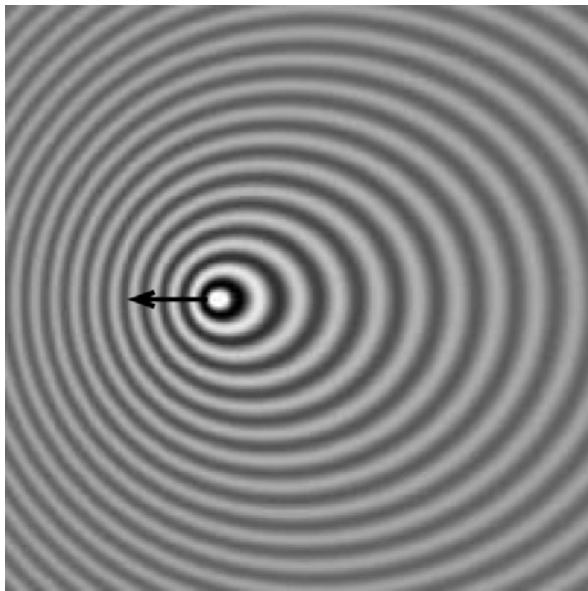
7.12 - Dijagram slabljenja
koje unosi barijera,
parametar je ugao senke

Posmatrajući geometrijsku konfiguraciju sa slike 7.11 i dijagram slabljenja sa slike 7.12 vidi se da je akustička barijera efikasnija (to jest unosi veće slabljenje) ako se nalazi bliže jednoj od referentnih tačaka, odnosno ako je postavljena neposredno uz izvor ili neposredno uz prijemnik zvuka. Tada je ugao senke maksimalan, pa je i uneto slabljenje nivoa zvuka najveće moguće koje se može ostvariti sa zadatom visinom barijere. Nasuprot tome, najgori slučaj je kada se barijera nalazi na sredini rastojanja između izvora i prijemnika, jer je tada ugao senke najmanji mogući.

U opisu efekta koji se dobija postavljanjem barijera podrazumevalo se da je barijera beskonačne dužine. U tom slučaju ne postoji mogućnost obilaska zvuka levo i desno oko barijera. Dijagram sa slike 7.12 podrazumeva takvu barijeru. U praksi to nikada nije slučaj, jer je širina akustičke barijere uvek konačna. Zbog toga je zvučno polje iza nje rezultanta superponiranja komponente koja prelazi preko njene gornje ivice i komponenti koje dospevaju obilaskom s obe njene strane.

7.3 Doplerov efekat

Doplerov efekat je, po definiciji, promena frekvencije i talasne dužine zvuka koga prima posmatrač koji se relativno kreće u odnosu na izvor tog zvučnog talasa. Jedna ilustracija pojave Doplerovog efekta prikazna je na slici 7.13. Vide se razlike u talasnim duzinama ispred i iza izvora u pokretu. Relativno kretanje koje je uslov za pojavu doplerovog efekta može nastati u slučaju kretanja izvora, prijemnika ili oba istovremeno. Doplerov efekat se javlja i u okolnostima kada do prijemnika dolazi refleksija talasa, ako se pri tome refleksiona ravan kreće. Ovaj slučaj je ekvivalentan kretanju virtuelnog izvora.



Slika 7.13 – Ilustracija pojave Doplerovog efekta sa razlicitim talasnim duzinama ispred i iza izvora koji se kreće .

Talasna dužina zvuka koga stvara izvor koji miruje je:

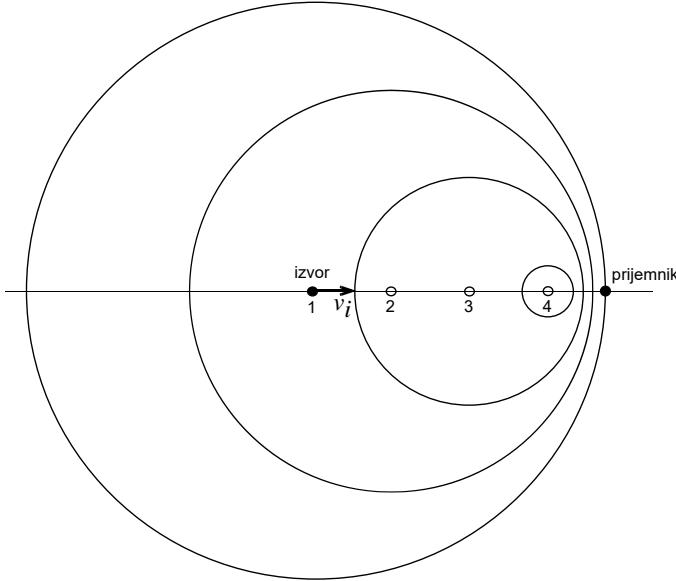
$$\lambda_i = \frac{c}{f_i} \quad (7.9)$$

Ako se izvor kreće nekom brzinom v_i , talasna dužina zvuka ispred i iza njega zavisi od brzine koja je rezultanta brzine prostiranja zvuka c i brzine kretanja izvora. Ovaj slučaj je označen na slici 7.14. Posmatrano sa pozicije označenog prijemnika talasna dužina zvuka koga on prima je:

$$\lambda_p = \frac{c - v_i}{f_i} \quad (7.10)$$

Odnos talasnih dužina zvuka kada je izvor u mirovanju i zvuka koga prima prijemnik kada se izvor kreće je:

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_i} = \frac{c - v_i}{c} \quad (7.11)$$



Slika 7.14 - Talasni front izvora u kretanju prema prijemniku.

Prema tome, odnos frekvencija koju stvara izvor i koju registruje prijemnik je:

$$\frac{f_p}{f_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_p} = \frac{c}{c - v_i} \quad (7.12)$$

Iz ovog izraza se vidi da će zvuk koga registruje prijemnik kada se izvor kreće ka njemu biti više frekvencije od one koju stvara izvor, jer je razlomak na desnoj strani veći od 1.

Za nastanak Dopleovog efekta značajno je relativno kretanje izvora i posmatrača, odnosno prijemnika. Za promenu primljene frekvencije od značaja je njihova relativna brzina. Ako bi se obe tačke kretale duž x ose sa slike 7.14 brzinama v_i i v_p , onda je za doplerov efekat relevantna relativna brzina:

$$v_{rel} = v_i - v_p \quad (7.13)$$

Ovde se brzine moraju posmatrati algebarski u odnosu na smer x ose. Promena frekvencija primljenog zvuka se naziva Doplerov pomeraj frekvencije:

$$f_p = \frac{c}{c - v_{rel}} f_i \quad (7.14)$$

Klasičan primer Doplerovog efekta je poznat iz svakodnevnog života. To je primetna promena frekvencije zvuka sirene automobila kada prolazi drumom pored posmatrača. U fazi približavanja automobila frekvencija je viša, da bi se u trenutku njegovog polaska pored posmatrača naglo promenila i postala niža dok je automobil u fazi udaljavanja. Promena frekvencije usled Doplerovog efekta može, na primer, da posluži za beskontaktno određivanje brzine kretanja refleksione ravni ako se prema njoj šalje zvučni talas, jer je to ekvivalentno kretanju virtuelnog izvora dvostruko većom brzinom od brzine kojom se kreće ta ravan.

8. ZVUČNO POLJE U ZATVORENIM PROSTORIMA MALIH DIMENZIJA

Pojmovi malog i velikog u akustici su relativni i određuju se poređenjem sa talasnom dužinom zvuka. U tom smislu, zatvoreni prostori malih dimenzija su oni čije su sve dimenzije mnogo manje od talasne dužine. Na veoma niskim frekvencijama to mogu biti čak i prostori čije absolutne dimenzije nisu male, kao na primer manje sobe u stanovima koje su male u odnosu na talasnu dužinu na 20 Hz (17 m). Ipak, u praksi pojam malih prostora uglavnom se odnosi na razne komore i cevi čije su dimenzije mnogo manje od talasne dužine u širem opsegu frekvencija.

Pojava prostiranja zvučnog talasa manifestuje se činjenicom da je u različitim tačkama prostora faza pritiska različita. Pri zvučnoj pobudi zatvorenog prostora koji je mnogo manji od talasne dužine zvučni pritisak u svim njegovim tačkama je jednak i u fazi. Zbog toga se u malim prostorima ne primećuje efekat prostiranja talasa. Primetna je samo vremenska promena pritiska koja je pri tome sinhrona po čitavoj zapremini.

Specifičan slučaj malih prostora su oni kod kojih dve dimenzije zadovoljavaju postavljeni uslov da su mnogo manje od talasne dužine, a jedna njihova dimenzija je poredljiva sa talasnom dužinom. To je slučaj takozvanog zvukovoda, ranije korišćenog uz objašnjenje nastanka ravanskog talasa. Njihova specifičnost je u tome što se u njima javlja efekat prostiranja zvuka, ali samo duž jedne dimenzije. U ravni njegovog poprečnog preseka vrednost zvučnog pritiska je konstantna jer su poprečne dimenzije mnogo manje od talasne dužine. Ranije je za objašnjenje uvedena prepostavka da je zvukovod beskonačan, čime je eliminisana pojava talasa reflektovanog od njegovog kraja. Za razliku od tog primera, ovde će biti razmotreni zvukovodi čija je dužina konačna. Zvučno polje u takvom zvukovodu je složeno zbog pojave refleksije na njegovim krajevima. Refleksije će se takođe javiti i na svakom drugom diskontinuitetu, kao što su nagle promene poprečnog presek cevi. Specifičan slučaj predstavljaju mali prostori kod kojih su dimenzije duž sve tri koordinate poredljive sa talasnom dužinom, ali će to biti razmatrano u posebnom poglavljju.

Mali zatvoreni prostori oba tipa u praksi se javljaju, na primer, kao kutije zvučnika na nižim frekvencijama, automobilski auspuh, cevi duvačkih instrumenata, vokalni trakt čoveka i druge slične zatvorene forme koje se pod određenim okolnostima pobuđuju zvukom. Matematičko modelovanje zvučnog polja razlikuje se u dva navedena tipa, jer se

u njima javljaju drugačiji fizički fenomeni. Kada je prostor duž sve tri koordinate mnogo manji od talasne dužine primenjuje se model koji proizilazi iz činjenice da u tim prostorima nema efekta prostiranja. U slučaju zvukovoda konačne dužine primenjuje se model koji se zasniva na pojmu sopstvenih rezonanci u cevi.

8.1 Osobine zvučnog polja u prostorima malih dimenzija

Kada se u polju prepostavi sinusoidalna promena pritiska rešenje talasne jednačine ima oblik:

$$\underline{p}(x, y, z, t) = \underline{p}(x, y, z)e^{j\omega t} \quad (8.1)$$

Ako je talasna dužina mnogo veća od svih dimenzija nekog zatvorenog prostora, u svim tačkama njegove unutrašnjosti stanje polja je uvek u fazi, pa je zvučni pritisak u svim tačkama isti. Tada je zvučno polje vremenski promenljivo, ali nezavisno od prostornih koordinata. Prema tome, ako se u talasnoj jednačini zanemare prostorne koordinate, amplituda pritiska postaje konstanta. To znači da je zvučno polje harmonijski sistem sa jednim stepenom slobode, i pritisak u prostoru je:

$$p(t) = \hat{p}e^{j\omega t} \quad (8.2)$$

Kada se u elektrotehnici prepostavi da stanje u kolu ne zavisi od prostornih koordinata, to vodi slučaju električnih kola sa koncentrisanim parametrima. Dimenzije provodnika tada nemaju nikakvu ulogu jer su mnogo manje od talasne dužine, i faza signala u svim tačkama kola je ista. Po analogiji sa električnim kolima za male prostore čije su sve dimenzije mnogo manje od talasne dužine koristi se naziv "akustičko kolo". U akustičkom kolu faza pritiska u svim tačkama je ista.

Prema fizičkom ponašanju vazduha kao medija u takvim uslovima mogu se razlikovati dva fizička oblika malih prostora: komore i cevi. Njihov odziv na zvučnu pobudu određuju različita fizička svojsta vazduha.

Zatvorene komore - akustička kapacitivnost

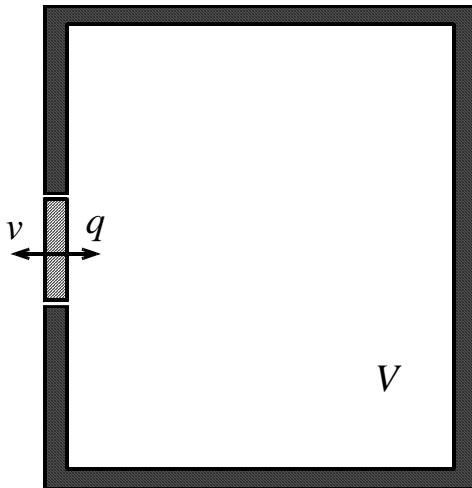
Na slici 8.1 prikazana je jedna komora za koju se prepostavlja da je mnogo manja od talasne dužine zvuka kojim se pobudjuje. Prepostavljeno je da se pobuda ostvaruje oscilacijama krutog klipa postavljenog na jednoj njenoj stranici. Rad klipa je definisan brzinom oscilovanja v ili akustičkim protokom q koji je funkcija brzine i površine klipa. Kao što je objašnjeno, u ovakvoj komori nema pojave prostiranja zvuka. Pritisak je samo funkcija vremena $p(t)$ i ne zavisi od pozicije unutar komore.

Akustička impedansa koja predstavlja opterećenje klipa kao zvučnog izvora kada zrači u unutrašnjost komore posledica je elastičnosti zatvorenog vazduha. Ta elastičnost se manifestuje pri promeni unutrašnje zapremine vazduha V . Ako je pobuda sinusno promenljiva, onda je brzina oscilovanja klipa:

$$v(t) = \hat{v} e^{j\omega t} \quad (8.3)$$

Promena zapremine komore pri prostoperiodičnom kretanju klipa definisane je izrazom:

$$dV = - \int v dt = - \frac{v}{j\omega} \quad (8.4)$$



Slika 8.1 - Komora sa klipom kao izvorom zvuka

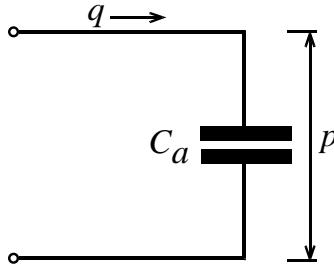
Na osnovu gasnih zakona može se pokazati da je akustička impedansa koju vidi klip:

$$Z_a = \frac{p}{q} = -j \frac{\rho c^2}{V\omega} = \frac{1}{j\omega \frac{V}{\rho c^2}} \quad (8.5)$$

Princip analogija koji se uvodi između akustičkih i električnih pojava zasniva se na formalnoj podudarnosti matematičkih modela akustičkih kola i odgovarajućih električnih kola. Iz izraza (8.5) može se videti da akustička impedansa kojom se komora suprotstavlja radu klipa ima formalni izgled kao impedansa kondenzatora u elektrotehnici. U toj formalnoj sličnosti uticaj komore se kvantifikuje veličinom koja se zove akustička kapacitivnost. Ona je, prema gornjem izrazu:

$$C_a = \frac{V}{\rho c^2} \quad (8.6)$$

Akustička kapacitivnost je svojstvo zatvorene komore kao akustičkog kola. Ona je dimenziono [$\text{kg}^{-1} \text{m}^4 \text{s}$]. U svetu akustičko-električnih analogija ponašanje zatvorene komore pri zvučnoj pobudi opisuje se ponašanjem kondenzatora pri analognoj električnoj pobudi, kao na slici 8.2.



Slika 8.2– Ekvivalentna električna šema komore sa kondenzatorom kapacitivnosti C_a

Iz postavljene analogije proizilazi da je akustička impedansa komore koju vidi klip kao izvor zvuka:

$$\underline{Z}_a = -j \frac{\rho c^2}{V\omega} = \frac{1}{j\omega C_a} \quad (8.7)$$

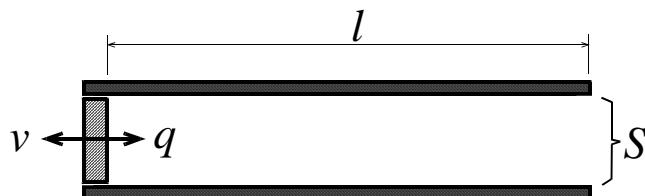
Pritisak u komori je funkcija akustičkog protoka koga stvara klip i akustičkog kapaciteta komore. Efektivna vrednost pritiska u komori je:

$$p = q \frac{1}{\omega C_a} \quad (8.8)$$

Iz gornjih izraza se vidi da postoji analogija sa električnim kolima, gde je akustički protok q ekvivalentan električnoj struji, pritisak p je ekvivalentan električnom naponu, a akustička kapacitivnost C_a je ekvivalentna električnom kapacitetu kondenzatora. Odatle se generalno može zaključiti da je ponašanje komore koja je mnogo manja od talasne dužine ekvivalentno ponašanju kondenzatora u električnim kolima. Na osnovu toga se takođe vidi da je pritisak u komori pri konstantnoj akustičkoj pobudi, koja se manifestuje konstantnom brzinom oscilovanja klipa, obrnuto srazmeran frekvenciji.

Cevi i otvori - akustička induktivnost

Drugačiji slučaj je pri zvučnoj pobudi malih prostora u obliku uskih cevi čija je dužina mnogo kraća od talasne dužine (dimenzije poprečnog preseka cevi su, po definiciji, manje od dužine). Jedna takva cev prikazana je na slici 8.3. Kao i u slučaju komore, prepostavlja se da na njenom početku dejuje kruti klip kao zvučni izvor koji osciluje brzinom v i tako generiše akustički protok u cevi q . Posebna vrsta cevi u kategoriji otvori u masivnim pločama. Njihova specifičnost je poredljivost dužine sa veličinom poprečnog preseka.



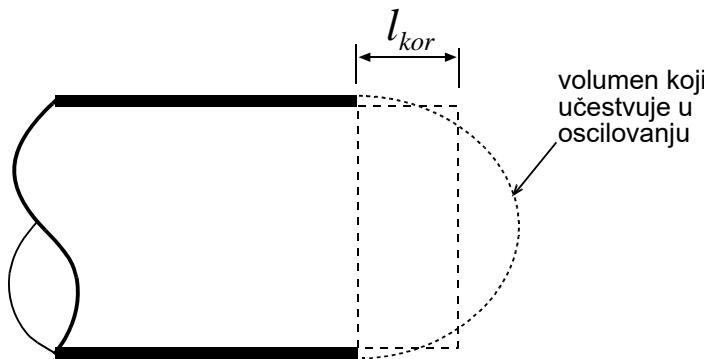
Slika 8.3- Cev sa označenim relevantnim geometrijskim parametrima.

U uskoj cevi pri velikim talasnim dužinama u odnosu na njenu dužinu l sve čestice vazduha kreću se jednako. Tada dolazi do izražaja inercija unutrašnje zapremine

vazduha. Klip kao izvor zvuka opterećen je masom vazduha, to jest postoji ekvivalentna inercija koja deluje na kretanje klipa. Masa vazduha u cevi koja se kreće je $\rho l S$.

Kada se posmatra kretanje vazduha na otvoru cevi nasuprot klipa, postoji jedna mala zapremina vazduha izvan cevi, neposredno uz otvor, koja osciluje zajedno sa onim u cevi. Pri svom kretanju vazduh u cevi "gura", odnosno "uvlači" tu dodatnu zapreminu. Zbog toga je ukupna masa vazduha koja učestvuje u oscilovanju uvećana za taj "dodatak". Pojava je šematski pokazana na slici 8.4. Dodatni vazduh van cevi koji učestvuje u oscilovanju zajedno sa vazduhom unutar cevi nalazi se u prostoru bliskom otvoru, što je na slici simbolični prikazano isprekidanom linijom. Ta zapremina se može posmatrati kao da je dužina cevi malo uvećana za neku korekciju dužine l_{kor} . Dužina vazdušnog stuba u cevi koji svojom inercijom opterećuje izvor zvuka sa slike 8.3 zbog toga je:

$$l_{eff} = l + l_{kor} \quad (8.9)$$



Slika 8.4 – Ilustracija uz objašnjenje korekcije efektivne dužine cevi.

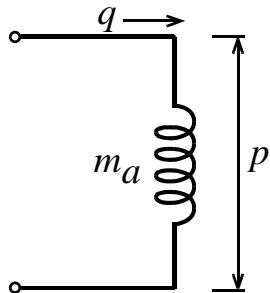
Akustička impedansa koja opterećuje klip kao izvor na početku cevi je:

$$Z_a = j\omega \frac{\rho l_{eff}}{S} \quad (8.10)$$

Vidi se da akustička impedansa kojom se cev mnogo kraća od talasne dužine suprotstavlja pobudi na jednom njenom kraju ima formalni izgled kao impedansa kalema u elektrotehnici ($j\omega L$). Zbog toga se uticaj cevi opisuje veličinom koja se zove akustička induktivnost m_a , i koja je prema gornjem izrazu:

$$m_a = \frac{\rho l_{eff}}{S} \quad (8.11)$$

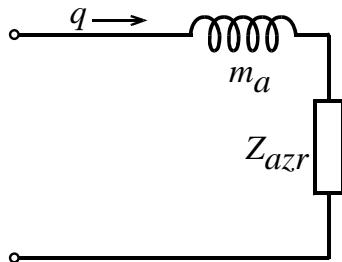
Prema tome, svojstvo cevi u akustičkim kolima je akustička induktivnost m_a . Ona je dimenziono [kg m^{-4}]. Akustički protok koji se pojavljuje na ulazu cevi zbog velike talasne dužine mora da stavi u pokret svu masu vazduha koja je u cevi, pa je izvor zvuka opterećen impedansom cevi, kao što to prikazuje ekvivalentna šema na slici 8.5.



Slika 8.5 – Ekvivalentna električna šema cevi sa akustičkom induktivnosti m_a .

Veličina produženja cevi l_{kor} zavisi od geometrijskih okolnosti, i u opštem slučaju predstavlja funkciju oblika poprečnog preseka cevi i prostornog ugla u koji zrači njen otvor. Vrednost ove korekcije izražava se kao funkcija poluprečnika otvora. Na primer, za otvor cevi koji slobodno zrači u prostor veličine 4π steradijana korekcija je $l_{kor} = 0,61 \cdot a$, gde je a poluprečnik otvora. Vidi se da je to mala vrednost koja je zanemarljiva kada su cevi značajno duže od dimenzije njenog poprečnog preseka. Međutim, ta korekcija nije zanemarljiva kada se posmatra akustička induktivnost malih otvora, kao što je to na primer slučaj sa otvorima u raznim perforiranim pločama. Dužina cevi je tada mala u odnosu na poluprečnik otvora, pa korekcija dužine ima veliki uticaj.

U ekvivalentnoj šema sa slike 8.5 izvršeno je jedno zanemarivanje. Naime, otvor cevi nasuprot klipu u takvom fizičkom sistemu deluje kao izvor koji zrači u prostor. Energija iz cevi odlazi u prostor u vidu sfernog talasa. Zbog toga je taj otvor, kao svaki zvučni izvor, opterećen nekom impedansom zračenja kojom se modeluje uticaj prostora na rad izvora. S time potpuna ekvivalentna šema akustičkog kola sa slike 8.3 izgleda kao na slici 8.6. Protok koga generiše izvor na početku cevi određen je akustičkom induktivnošću cevi i impedansom zračenja njenog otvora.



Slika 8.6 – Ekvivalentna električna šema otvorene cevi akustičke induktivnosti m_a .

Disipativne pojave u akustičkim kolima – akustička otpornost

Pri kretanju zvučne energije kroz uske prostore poput cevi sa slike 8.3 postoji nezanemarljiva pojava disipacije, to jest gubitaka energije koji nastaju usled viskoznog trenja. Taj proces se dešava u sloju vazduha neposredno uz unutrašnje površine cevi. Ako je cev vrlo uska, onda se taj sloj proširuje praktično na čitav njen presek. Praveći i ovde analogiju sa elektrotehnikom, pojava takvih gubtaka je ekvivalentna disipaciji na otpornostima u električnim kolima. U akustičkom domenu gubici se modeluju akustičkom otpornošću R_a . Ona je dimenziono [$\text{kg m}^{-4} \text{s}^{-1}$].

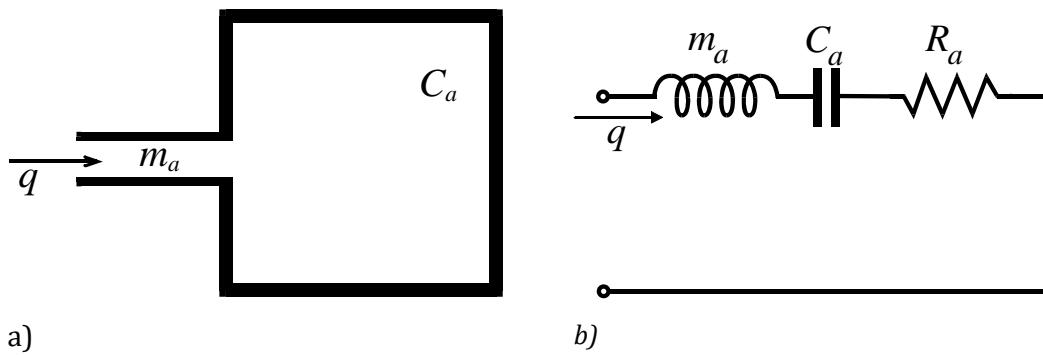
Akustička otpornost cevi koja je mnogo manja od talasne dužine (ili malog otvora u ploči) funkcija je ukupne unutrašnje zapremine vazduha u kojoj se dešava viskozno trenje. To znači da akustička otpornost zavisi od dužine cevi i njenog poprečnog preseka. Viskozne pojave u vazduhu su po svojoj prirodi frekvencijski zavisne, jer je debljina sloja vazduha u kome se manifestuje efekat viskoznosti funkcija frekvencije. Analitička rešenja za akustičku otpornost cevi vrlo su složena, ali je njena vrednost posredno dostupna merenjima.

8.2 Složenija akustička kola

Kombinovanjem elemenata akustičkih kola, cevi, odnosno otvora i komora mogu se formirati akustički sistemi prenosa koji ispoljavaju složenu frekvencijsku zavisnost akustičkog odziva. To omogućava da se realizuju specifične funkcije kao što je akustički filter, apsorber zvuka i slično. Ovde će biti pokazana dva jednostavna slučaja.

Akustički rezonator

Najznačajnija forma akustičkog kola je takozvani akustički rezonator. On se sastoji od jedne cevi i jedne komore, to jest akustičke induktivnosti i kapacitivnosti. Akustički rezonator je prikazan na slici 8.7a. U literaturi se ovakva konstrukcija često naziva Helmholtcov rezonator. Prepostavlja se da na rezonator spolja može da deluje neka zvučna pobuda koja u otvoru stvara protok q . Podrazumeva se da u ulaznom otvoru postoji izvesna disipacija energije usled trenja na zidovima cevi koja u kolo rezonatora uvodi i akustičku otpornost. Kada se otvor rezonatora izloži dejstvu spoljašnjeg zvučnog polja, na njemu će postojati zvučni pritisak određen fizičkim okruženjem. U otvoru se usled toga javlja protok q koji prolazi kroz cev i odlazi u komoru.



Slika 8.7 – Akustički rezonator i njegova ekvivalentna električna šema.

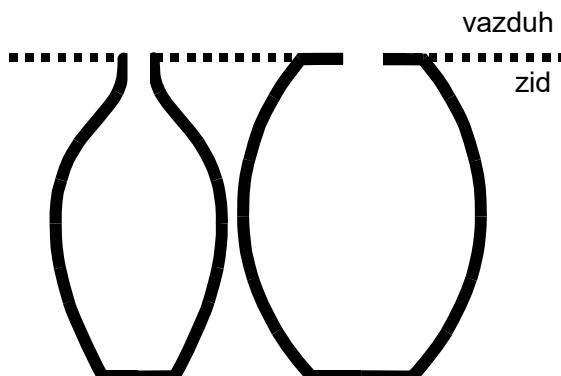
Činjenica da kroz cev i komoru prolazi isti protok ukazuje na njihovu rednu vezu u smislu konfiguracije ovog akustičkog kola. Ekvivalentna šema rezonatora prikazana je na slici 8.7b. Vidi se da je to jedno redno oscilatorno kolo. Na rezonanci kola njegova impedansa je minimalna, pa će u datim uslovima na toj frekvenciji protok biti najveći, bez obzira na

uslove pobude. Može se reći da akustički rezonator na svojoj rezonanci predstavlja apsorber zvuka, jer „usisava“ više energije iz zvučnog polja od onoga što bi normalno pogađalo površinu njegovog malog otvora izloženog dejstvu zvučnog polja.

Ponašanje akustičkog rezonatora pri zvučnoj pobudi može se posmatrati i sa aspekta mehanike kretanja vazduha. Masa vazduha u cevi predstavlja kao jedan mali teg koji se pri zvučnoj pobudi kreće levo-desno sa jednim stepenom slobode. Sa njim je povezana opruga koja postoji kao posledica delovanja elastičnosti vazduha zatvorenog u komori. Prema tome, vazduh u rezonatoru na koga deluje zvučna pobuda predstavlja mehanički sklop koji se sastoji od tega i opruge. Takav sistem ima svoju mehaničku rezonancu. Pri pobudi na rezonantnoj frekvenciji brzina kretanja tega i njegova amplituda su maksimalni. Takvo mehaničko ponašanje vazduha u rezonatoru ima svoje akustičke posledice koje se manifestuju kao rezonanca pri kojoj se javlja maksimalni protok q .

Povećavanje akustičkog protoka kroz rezonator podrazumeva, po definiciji, da je brzina oscilovanja molekula vazduha povećana. To povećanje je maksimalno na frekvenciji rezonance. Termogeni gubici u cevi kao posledica viskoznog trenja direktno su srazmerni brzini kretanja molekula. Prema tome, trošenje zvučne energije u rezonatoru biće najveće na frekvenciji rezonance. Tako pojava rezonance znači povećane gubitke energije iz zvučnog polja iz koga se pobuđuje rezonator.

Akustički rezonatori su najstariji oblik akustičkih konstrukcija i korišćeni su još u antička vremena (akustička „prosta mašina“). Tokom srednjeg veka rezonatori su ugrađivani u zidove velikih crkava da bi delovali kao apsorberi zvuka. Pri tome se računalo na povećane gubitke koje ispoljavaju na rezonancama. Uglavnom su pravljeni kao posude od grnčarije. Na slici 8.8 prikazani su neki karakteristični oblici ugrađivanih rezonatora kakvi su pronalaženi u srednjovekovnim objektima. Na slici 8.9 prikazana je fotografija originalnih rezonatora izvađenih iz svodova jedne stare crkve. To su standradni sudovi za vodu, a funkciju otvora rezonatora imala je rupa koja je naknadno pravljena na njihovom dnu.

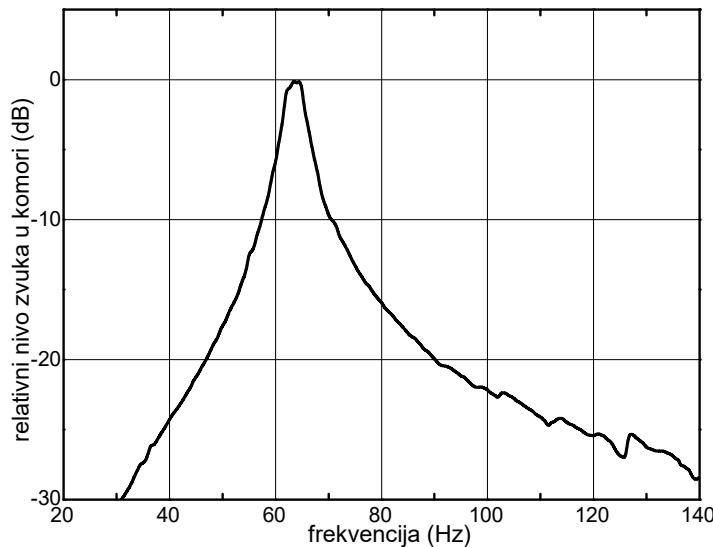


Slika 8.8 – Oblici akustičkih rezonatora koji su korišćeni u srednjovekovnim crkvama.



Slika 8.9 – Fotografija originalnih akustičkih rezonatora od grnčarije izvađenih iz svodova jedne stare crkve.

Na slici 8.10 prikazana je izmerena relativna promena nivoa zvuka u komori jednog rezonatora sa slike 8.9 pri konstantnoj spoljašnjoj pobudi iz zvučnog polja. Vidi se da se pojava rezonance manifestuje porastom nivoa zvuka u komori. To je posledica porasta protoka kroz rezonator u oblasti rezontantne frekvencije. Sa dijagrama se može proceniti širina njegove rezontantne krive. Na frekvenciji rezonance proces apsorpcije koju ispoljava rezonator može biti veoma efikasan. Međutim, vidi se da je efekat rezonance, što znači i povećane brzine oscilovanja molekula vazduha što proizvodi povećane gubitke, ograničen na vrlo uzak frekvencijski opseg u širini rezontantne krive, odnosno njegovog propusnog opsega. U slučaju analiziranog rezonatora on je svega nekoliko Hz.

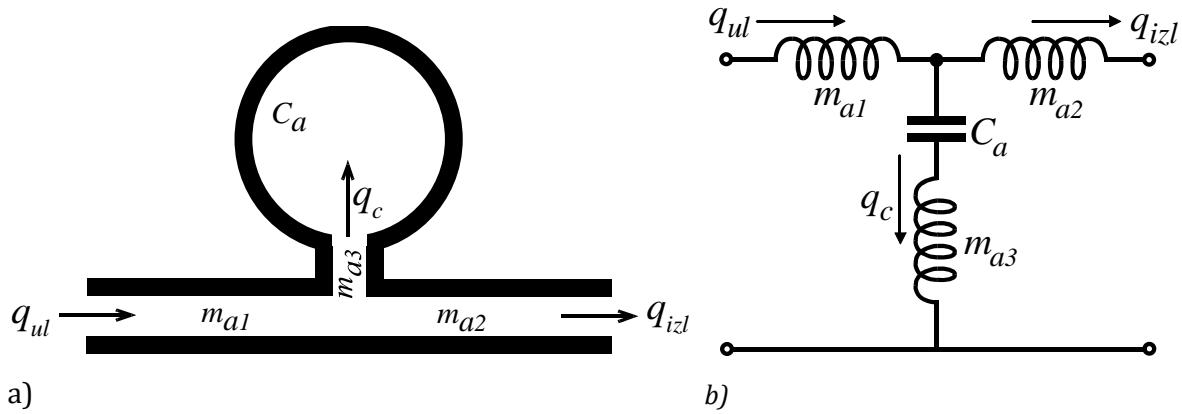


Slika 8.10 – Snimljena zavisnost pritiska u komori jednog od rezonatora sa slike 8.8 pri konstantnoj spoljašnjoj zvučnoj pobudi

Bočni rezonator u zvukovodu

Drugi primer složenijeg akustičkog sistema je prikazan na slici 8.11a. To je zvukovod sa postavljenim akustičkim rezonatorom kao dodatnim pobočnim elementom. Svi relevantni parametri označeni su na slici. Ekvivalentna šema tog tog akustičkog sistema prikazana je na slici 8.11b. Radi pojednostavljenja, na šemi je zanemaren uticaj akustičke

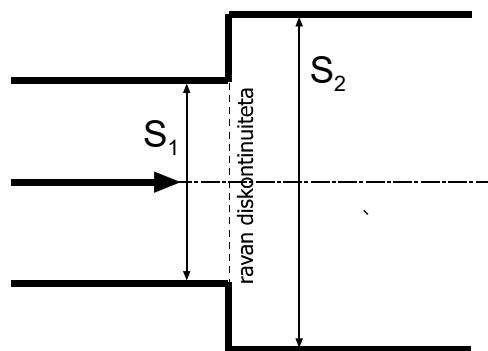
otpornosti u cevima i impedansa zračenja otvora zvukovoda koji zrači u prostor. Vidi se da akustički rezonator u ovakvoj konfiguraciji ima ulogu takozvanog zaptivnog kola jer će redna veza kapaciteta C_a i induktivnosti m_{a3} na svojoj rednoj rezonanci delovati kao kratak spoj. Na taj način sklop sa slike 8.11 deluje kao filter pri pojavi akustičkog protoka kroz zvukovod. U svojoj prenosnoj karakteristici on će imati slabljenje na rezonantnoj frekvenciji zaptivnog kola.



Slika 8.11 – Šematski prikaz zvukovoda sa bočnim rezonatorom i njegova ekvivalentna šema

8.3 Refleksije u cevima

Diskontinuitet sredine kroz koju se prostire talas definisan je specifičnom impedansom. Međutim, ranije je pokazano da postoje okolnosti u kojima je jednostavnije da se stanje sredine iskazuje preko akustičkih impedansi, pa se pojmom diskontinuiteta odnosio i na nagle promene vrednosti akustičke impedanse. Takav slučaj može nastati u cevima, odnosno u zvukovodu. Za diskontinuitet impedanse u zvukovodu potrebno je, po definiciji, da se promeni njegov poprečni presek, kao što je prikazano na slici 8.12. U ravni promene preseka menja se vrednost akustičke impedanse, pa se pri nailasku talasa javlja refleksija.



Slika 8.12 - Diskontinuitet u zvukovodu promenljivog poprečnog preseka.

Faktor refleksije se u ovom slučaju može definisati preko akustičkih impedansi. Modifikacijom izraza (6.6) dobija se faktor refleksije na diskontinuitetu zvukovoda:

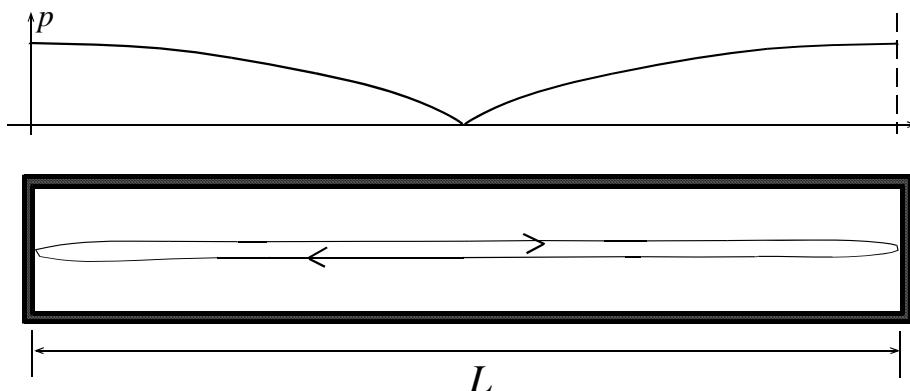
$$r = \frac{\hat{p}_-}{\hat{p}_+} = \frac{\frac{\rho c}{S_2} - \frac{\rho c}{S_1}}{\frac{\rho c}{S_2} + \frac{\rho c}{S_1}} \quad (8.12)$$

Otvor na kraju cevi predstavlja takođe diskontinuitet impedanse, zbog čega se pri prostiranju talasa kroz zvukovod na izlaznom otvoru uvek javlja refleksija. Na niskim frekvencijama impedansa na otvoru mnogo je manja od vrednosti impedanse duž zvukovoda. Ukratko, pojava refleksija na svim promenama poprečnog preseka cevi, a posebno na njenom kraju, dominantno određuje karakteristike zvučnog polja u zvukovodu.

Rezonace u cevima konačne dužine

Pri zvučnoj pobudi cevi čiji je poprečni presek mnogo manji, a dužina poredljiva ili veća od talasne dužine, u njoj se javlja efekat prostiranja talasa. Za razliku od slučaja akustičke induktivnosti, gde zbog male dužine nije bilo efekta prostiranja i pritisak je bio u svim tačkama isti, ovde zbog veće dužine zvučni pritisak nije jednak duž cevi, pa postoje fazne razlike pritiska duž cevi. Zbog neizostavnog postojanja diskontinuiteta akustičke impedanse na krajevima takve cevi, bez obzira na to da li je kraj otvoren ili zatvoren nekim masivnim čepom, u njoj se na krajevima javlja refleksija. Zbog toga će se zvučna energija duž cevi kretati sa ponavljanjem putanje sukscesivno se reflektujući od krajeva.

Jedan primer cevi koja je na oba kraja zatvorena tvrdim čepovima prikazan je na slici 8.13. Zvučno polje u unutrašnjosti takve cevi rezultanta je superponiranja talasa koji se prostiru u suprotnim smerovima. Pri tome postoje frekvencije na kojima će se direktni i reflektovani talas superponirati na način koji dovodi do pojačanja odziva u cevi, posmatrano u odnosu na odziv na ostalim frekvencijama. Takvo pojačanje odziva koje se dešava na nekim diskretnim frekvencijama označava se kao pojava rezonance u cevi.



Slika 8.13 - Cev zatvorena na oba kraja sa šematski prikazanim stojećim talasom u njoj.

Osnovni uslov da u cevi dođe do pojave rezonance je da se uspostavi sukscesivno ponavljanje putanje kretanja energije. Taj uslov je ovde zadovoljen zahvaljujući refleksijama na krajevima koje vraćaju talas da se kreće stalno istom putanjom duž cevi.

U slučaju sa slike gde se na krajevima nalaze tvrde površine sa impedansom koja teži beskonačnosti, granični uslov podrazumeva da se na krajnjim površinama javlja maksimum pritiska, a brzina oscilovanja mora biti jednaka nuli. Zbog toga na frekvenciji na kojoj se javlja rezonanca prostorna raspodela zvučnog pritiska duž cevi ima formu kao što je prikazano na gornjem delu slike 8.13. Ovakva prostorna forma raspodele pritiska koja se ne menja u vremenu naziva se stojeći talas. Prema tome, stojeći talas je fizička manifestacija pojave rezonance u cevi. Zona maksimuma pritiska naziva se "trbuš", a minimum se naziva "čvor" stojećeg talasa.

Rezonantne frekvencije zatvorene cevi

Iz raspodele pritiska duž cevi prikazane na slici vidi se da pojava rezonance nastaje na frekvenciji za koju je dužina cevi jednaka polovini talasne dužine:

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (8.13)$$

Međutim, to je samo najniža rezonantna frekvencija. Isti efekat nastaje i za sve celobrojne umnoške polovine talasne dužine, to jest za:

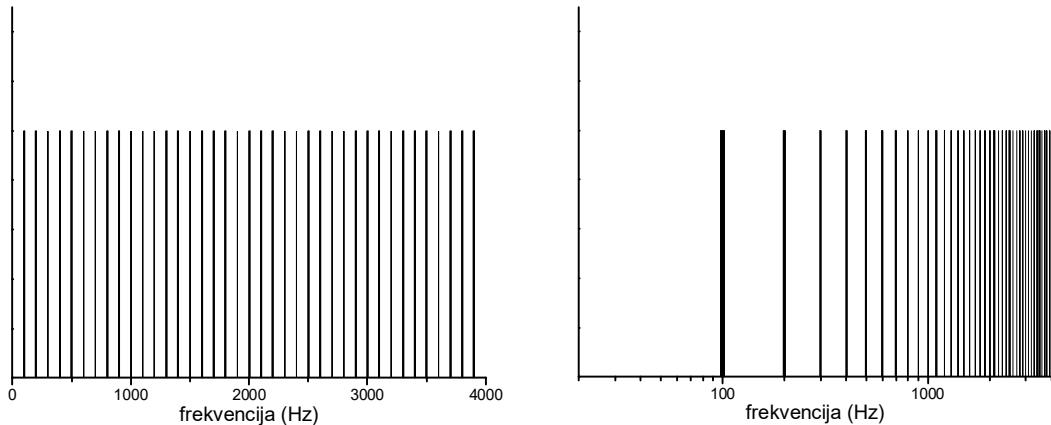
$$L = \frac{n\lambda}{2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (8.14)$$

Prema tome, cev konačnih dimenzija ima beskonačan niz sopstvenih rezonanci. Kada je cev zatvorena na oba kraja prostorna raspodela pritiska u stojećim talasima koji odgovaraju ovim frekvencijama je takva da se na njenim krajevima uvek javlja maksimum pritiska, kao i u primeru sa slike, ali se na višim rezonancama javlja odgovarajući veći broj čvorova, sa trbusima između njih.

Ako se u izrazu (8.14) talasna dužina transformiše u frekvenciju, dobija se uslov za sopstvene rezonance zatvorene cevi:

$$f_n = \frac{nc}{2L} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (8.15)$$

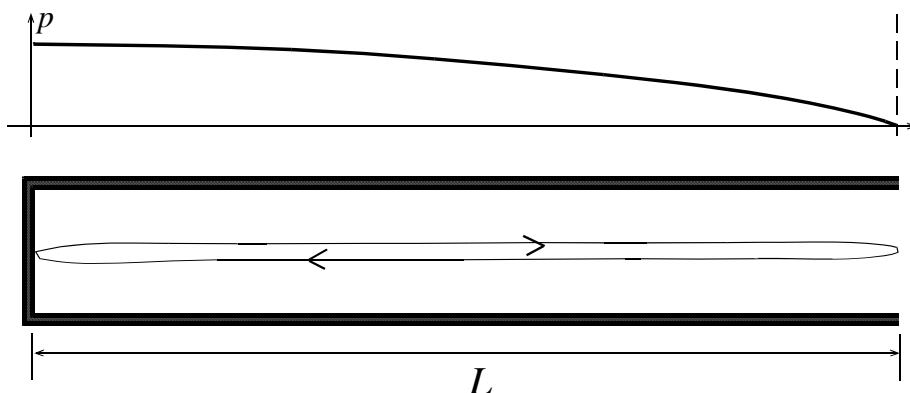
Na slici 8.14 ovaj niz rezonantnih frekvencija je prikazan grafički, sa frekvencijskom osom u linearnoj i logaritamskoj razmeri. Niz počinje od najniže rezonance određene izrazom (8.13) i prostire se duž frekvencijske ose kao ekvidistantan harmonijski niz. Kada je frekvencijska osa prikazana u logaritamskoj razmeri, što je uobičajeno predstavljanje takvih pojava u akustici, u prikazu se javlja zgušnjavanje rezonanci duž frekvencijske ose, ali je istovremeno jasnije vidljivija pozicija najniže rezonance.



Slika 8.14 - Raspored rezonantnih frekvencija u cevi dužine 1,7 m, prikazano u linearnoj (levo) i logaritamskoj razmjeri (desno). Svaka rezonanca je predstavljena jednom vertikalnom linijom na odgovarajućoj frekvenciji.

Rezonantne frekvencije cevi otvorene na jednom kraju

Drugi karakterističan slučaj rezonanci u cevi javlja se kada je cev otvorena samo na jednom kraju, kao što je to prikazano na slici 8.15. U odnosu na slučaj obostrano zatvorene cevi, ovde se menjaju granični uslovi na otvorenom kraju: u ravni otvora brzina oscilovanja je maksimalna, a pritisak je minimalan. Zbog toga prostorni raspored stojećeg talasa duž ovakve cevi na najnižoj rezonanci ima formu koja je prikazana na gornjem delu slike 8.15. Iz toga proizilazi da je pri zadatoj dužini cevi najniža rezonantna frekvencija dvostruko niža od one koja se javlja kada su oba njena kraja zatvorena. Pojava rezonanci u cevi otvorenoj na jednom kraju koristi se u muzičkim instrumentima (orgulje, drveni duvački instrumenti, svirale svih vrsta).

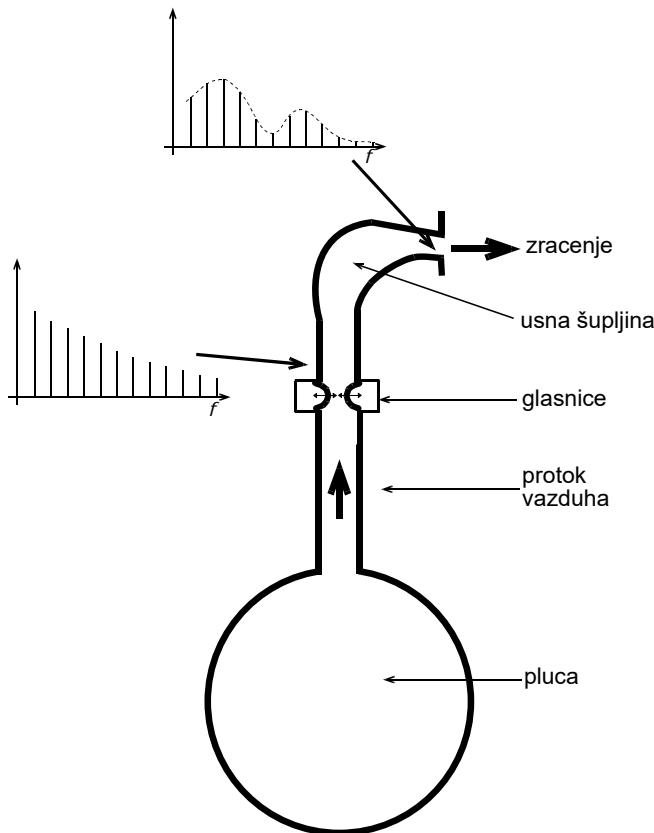


Slika 8.15 - Stojeći talas u cevi koja je otvorena na jednom kraju.

8.4 Glas kao izvor zvuka

Vokalni trakt je čovekov organ za kontrolisano generisanje zvuka. Zajedno sa čulom sluha predstavlja sistem za govornu komunikaciju. Glas je zvučna pojava na bazi koje je tokom evolucije vremenom nastao govor kao način kodovanja informacija u međusobnoj

komunikaciji ljudi. U elektroakustici se kao tema obrađuje samo glas i njegova funkcija zvučnog izvora, to jest načini generisanja zvučne energije i fizička svojstva nastalog zvuka, dok je govorna komunikacija mnogo složenija multidisciplinarna tema. Generisanje glasa je pojava koja je u fizičkom smislu neposredno povezana sa pojmom rezonanci u zvukovodu zbog toga što se spektralne karakteristike zvuka koji nastaju u govoru formiraju, između ostalog, i uticajem rezonanci duž cevi vokalnog trakta.



SLIKA 8.16 – Šematski prikaz vokalnog trakta.

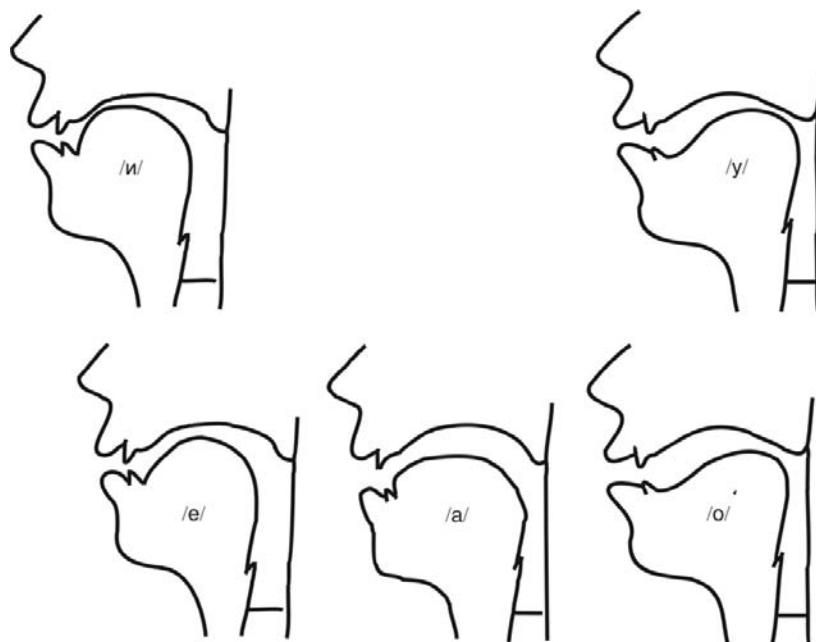
Na slici 8.16 prikazana je šematska ilustracija funkcionisanja sistema koji generiše glas. Postoje dve vrste glasova koje vokalni trakt može da generiše: zvučni (vokali) i bezzvučni (konsonanti). Zvučna energija vokala nastaje fizičkim presecanjem vazdušne struje koja kreće iz pluća, kao što je već opisano u poglavlju 4.2. To presecanja realizuju se vibracijama glasnica. Iznad ravni glasnica nastaje zvučni pritisak čiji je talasni oblik približno trouglast, jer se glasnice naglo otvaraju, a lagano zatvaraju. Poznato je da signal testerastog talasnog oblika ima harmonijsku strukturu spektra, što je na slici 8.16 simbolički označeno (testerasti talasni oblik ima sve harmonike, i parne i neparne).

Frekvencija oscilovanja glasnica određena je njihovom masom i elastičnošću. U normalnom govoru ta frekvencija je posledica njihovog prirodnog procesa oscilovanja, ali je na to moguće uticati voljnim promenama mehaničkih osobina glasnica (zategnutost). To se događa pri pevanju, kada se ostvaruje voljna kontrola frekvencije koja se može podešavati u granicama nazivanim „raspon pevanog glasa“. U govoru, kada su glasnice opuštene, osnovna frekvencija generisanog signala kod muškaraca je u opsegu

100 - 200 Hz, mada kod izrazitih basova osnovna frekvencija može biti ispod 100 Hz. Kod ženskih glasova osnovna frekvencija je 200 - 300 Hz.

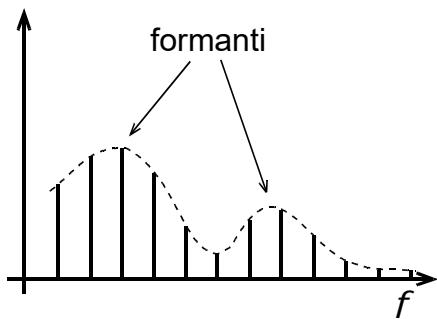
Iznad glasnica se nastavlja cev vokalnog trakta koja ima promenljivi presek. Promena poprečnog preseka ostvaruje se pokretima nepca, jezika, donje vilice i usta. Prema tome, zvučna pobuda se od glasnica prostire duž cevi konačne dužine sa otvorom usta na kraju. Poprečni presek ove cevi je dovoljno manji od talasne dužine na frekvencijama koje sadrži ljudski govor, pa vokalni trakt zadovoljava uslove da u fizičkom smislu predstavlja zvukovod. Promene preseka unose diskontinuitete impedansi duž cevi, što u vokalnom traktu prouzrokuje rezonantne pojave. Na taj način zvuk nastao glasnicama pri daljem prostiranju kroz vokalni trakt trpi frekvencijske promene. Ova promene su takođe simbolički naznačne u slici 8.16.

Na slici 8.17 prikazane su skice oblika vokalnog trakta u preseku pri izgovoru srpskih vokala. Položaj glasnica je šematski označen horizontalnom linijom. Vidi se da vokalni trakt predstavlja cev čiji se poprečni presek menja za svaki glas. Sa slike se takođe vidi da se za razne glasove menja i veličina izlaznog otvora cevi. Diskontinuiteti stvaraju uslove za nastanak rezonanci unutar vokalnog trakta, što određuje specifičnu prenosnu karakteristiku za svaki glas na putu od glasnica do spoljašnje sredine.



Slika 8.17 – Šematski prikaz cevi vokalnog trakta za vokale srpskog jezika

Zbog pojava rezonanci vokalni takt kao sistem prenosa ima nelinearnu frekvencijsku karakteristiku. Načelno govoreći, ta nelinearnost se manifestuje izdizanjem nekih oblasti frekvencija i potiskivanjem signala u oblasti između njih. Na slici 8.18 prikazan je principijelni izgled spekta glasa nakon prolaska kroz cev vokalnog trakta. Vidi se da on ima harmonijsku strukturu sa svojom osnovnom frekvencijom koja je određena periodom oscilovanja glasnica. Obvojnica spektra glasa je uobičena uticajem vokalnog trakta kao zvukovoda tako da postoje maksimumi i minimumi.



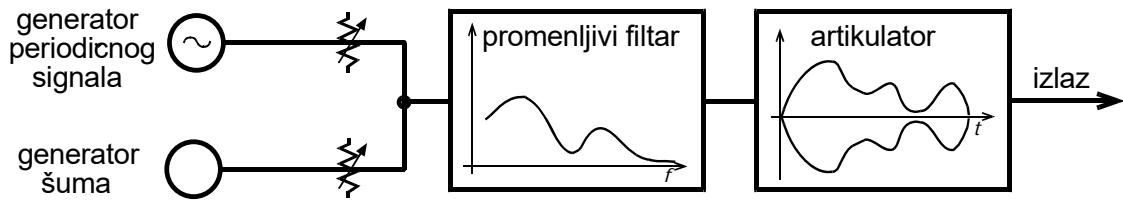
SLIKA 8.18 - Ilustracija frekvencijske strukture glasa sa definicijom formanata

Istaknute oblasti u spektru glasa nazivaju se formanti. Formant se može definisati svojom centralnom frekvencijom i širinom opsega. Svaki vokal u glasu ima svoj specifičan raspored formanata duž frekvencijske ose. Na osnovu toga se pri slušanju pravi perceptivna razlika među glasovima. U procesu učenja govora kod male dece uvežbava se uobličavanje vokalnog trakta da bi se dobili prepoznatljivi glasovi.

Osim radom glasnica, zvučna energija u vokalnom traktu može se generisati i trubulencijama na nekom suženju duž putanje vazduha od pluća do otvora usta. To suženje se u normalnom govoru formira u zoni usta i zuba. Za razliku od vokala koji imaju harmonijsku strukturu, zvuk nastao turbulentcijama ima stohastičku prirodu sa svim perceptivnim osobinama šuma. Karakteristični primeri su glasovi "S" ili "Š" u kojima je osnovni signal šum. I ovako generisanom zvuku menjaju se spektralne karakteristike u zavisnosti od trenutnog oblika cevi vokalnog trakta.

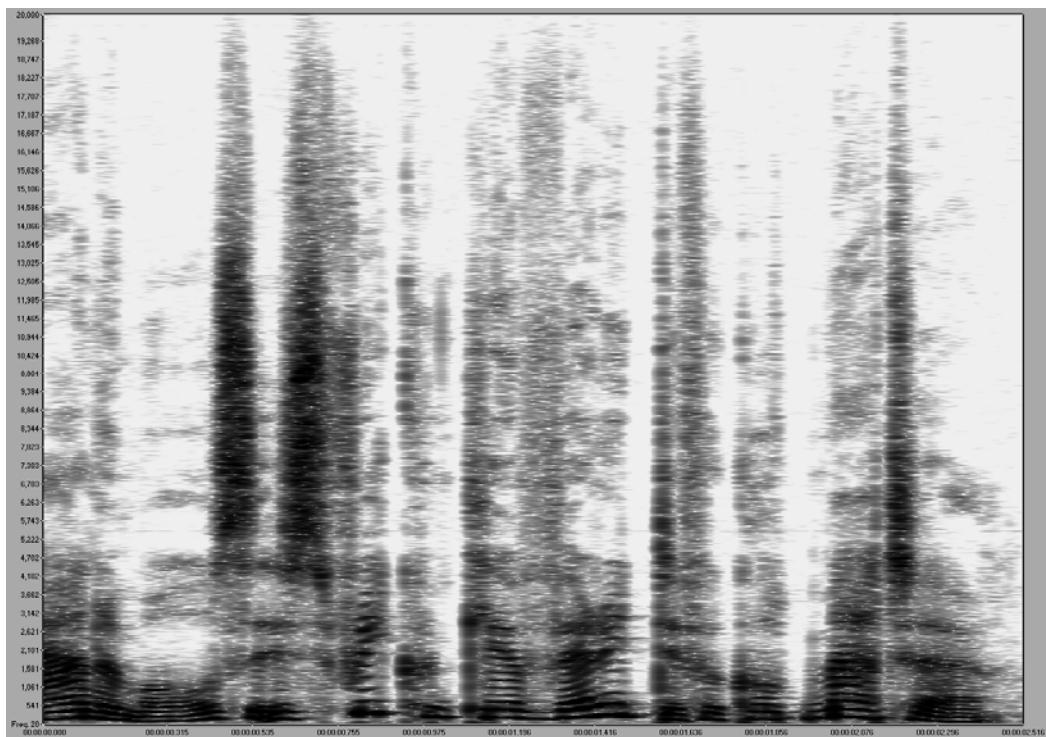
Generisanje šuma kao pobudnog signala moguće je i na samim glasnicama, kada se one iz nekih voljnih ili nevoljnih razloga stegnu i ne osciluju, ali suze prostor za prolazak vazduha. Voljno stezanje glasnica dešava se pri šapatu. Svi glasovi se spektralno formiraju pod uticajem geometrije vokalnog trakta kroz koji prolazi zvučna energija, samo što je osnovni signal u tom slučaju šum sa kontinualnim spektrom umesto diskretnog spektra koji se javlja kada glasnice osciluju. Nevoljno stezanje glasnica nastaje i u slučaju velike promuklosti, kada se dominantno generiše šum kao osnovni signal glasa.

Kada se rezimiraju sve činjenice o nastanku glasa moguće je nacrtati principijelu blok šemu sistema kojim se modeluje proces stvaranja glasa, i koja je prikazana na slici 8.19. Vidi se da u sistemu postoje dva generatora: jedan stvara periodični signal i tim generatorom se modeluje rad glasnica, a drugi je generator šuma i njegovim radom se modeluje šumna komponenta glasa. Oni se s promenljivim odnosom mešaju i nastavljaju put kroz vokalni trakt.



SLIKA 8.19 -Principijela blok šema koja ilustruje funkcionisanje glasa.

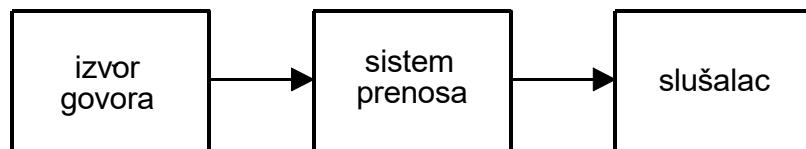
Govor je dinamička zvučna pojava u kojoj se smenjuju različiti glasovi. Zbog toga se za grafičko predstavljanje zvučnog sadržaja glasa i njegovu analizu uobičajeno koriste spektrogrami. Na slici 8.20 prikazan je spektrogram jedne izgovorene rečenice. Vidi se velika dinamika promena sadržine govornog signala i u vremenskom i u frekvencijskom domenu. Horizontalne linije vidljive u okviru nekih glasova predstavljaju harmonijske komponente, to jest osnovnu frekvenciju i više harmonike. Horizontalne tamnije zone predstavljaju formante, to jest zone povećane energije signala. Zone uniformno zacrnjene predstavljaju oblasti u kojima dominira šum.



SLIKA 8.20 -Primer spektrograma jedne izgovorene rečenice.

9. OSNOVNI PRINCIPI RADA ČULA SLUHA

Čulo sluha čoveka predstavlja prirodni sistem senzora koji omogućava percepciju zvučnih pojava iz okoline. Taj sistem se sastoji od dva uva koji funkcionišu kao senzori zvuka koji su prostorno razdvojeni glavom kao fizičkom preprekom. Pod uticajem zvučnih nadražaja iz okruženja u svesti slušaoca se stvaraju zvučne senzacije, odnosno zvučne slike o izvorima zvuka i njihovom položaju u prostoru. Zajedno sa vokalnim traktom, čulo sluha čini sistem za osnovnu komunikaciju među ljudima gde je zvuk nosioci informacija. U inženjerskom smislu čulo sluha predstavlja krajnju tačku, to jest izlaz svakog telekomunikacionog sistema kada se kroz njega prenosi signal govora. U okolnostima govornih komunikacija blok-šema sa slike 1.1 može se predstaviti kao na slici 9.1, jer se kao prijemnik zvuka na kraju prenosa pojavljuje čulo sluha sa svi svojim specifičnostima koje su detaljnije objašnjene u ovom poglavlju. Po svojim fizičkim osobinama čulo sluha je prilagođeno prijemu zvuka u vazduhu, jer je vazduh čovekovo prirodno okruženje.

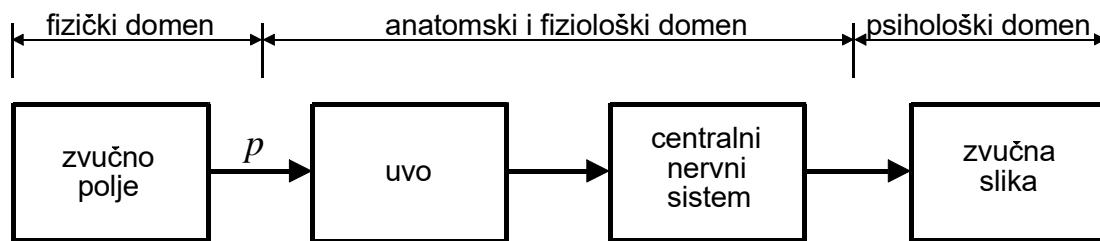


Slika 9.1 – Elementarna blok-šema procesa prenosa govora

Čulo sluha je kompleksan sistem koji registruje zvuk, ali ga i procesira i na osnovu toga u svesti slušaoca stvara složene zvučne slike. Što je zvuk koji se prima po svom fizičkom sadržaju složeniji, to je kompleksnija zvučna slika koja nastaje u svesti slušaoca. Kao deo čovekovog organizma, čulo sluha ispoljava neminovne individualne razlike među ljudima. Svi numerički ili grafički pokazatelji kojim se ilustruju pojedine osobine ovog čula dobijeni su usrednjavanjem na osnovu osobina velikog broja osoba. Zbog toga se svi numerički podaci kojim će u nastavku karakterisati čulo sluha moraju shvatati kao statistički pokazatelj, a ne kao egzaktni tehnički podaci.

Čulo sluha se kao sistem može podeliti na dva osnovna dela: na fizički i na psihološki deo, kao što je prikazano na slici 9.2. Fizički deo čula sluha čini sve ono što se anatomski prepoznaće u njegovom sklopu: dva uva sa senzorima, i nervni putevi koji ih povezuju sa mozgom. Celokupan proces slušanja završava se u psihološkom delu ovog čula kao rezultat rada centara u kori velikog mozga. Psihološki deo čula sluha čini nematerijalna

sfera u kojoj se javlja reakcija na zvučnu pobudu i gde se stvara svest o pojavi zvuka koji se čuje. U takvoj podeli funkcija može se reći da fizički deo čula posreduje između zvučnog polja i svesti čoveka. Ovakva podela vremenom je učinila da se u akustici razviju dve relativno nezavisne podoblasti koje se bave čulom sluha i slušanjem. To su fiziološka akustika, koja se bavi fizičkim delom čula, i psihološka akustika koja se bavi nematerijalnim aspektom rada čula, odnosno procesima formiranja zvučne slike.



Slika 9.2 – Globalna struktura procesa slušanja

Današnje poznavanje procesa prenosa signala kroz pojedine celine sa slike 9.2 nije ujednačeno. Rad fizičkog dela čula sluha koje obuhvata spoljašnje, srednje i unutrašnje uvo poznat je u mnogim detaljima, kako sa aspekta anatomije tako i sa aspekta fizioloških procesa koji se u njima odvijaju. Međutim, psihološka sfera čula sluha oblast je u kojoj još ima veoma mnogo nepoznanica i koja predstavlja široko polje istraživanja, kao i sve drugo što se tiče ljudskog mozga. Za to postoje dva bitna razloga. Prvi razlog je složenost procesa u moždanim centrima koje nije moguće opisivati nikakvim matematičkim modelima. Drugi razlog je nemogućnost spoljnog pristupa procesima u moždanim centrima, pa izlaz psihokustičkih procesa nije neposredno dostupan eksperimentalnom ispitivanju, već samo kroz opise osobe koja sluša. Istovremeno, u tom delu čula javljaju se najveće varijabilnosti u funkcijama, što dodatno otežava svako modelovanje njegovog rada.

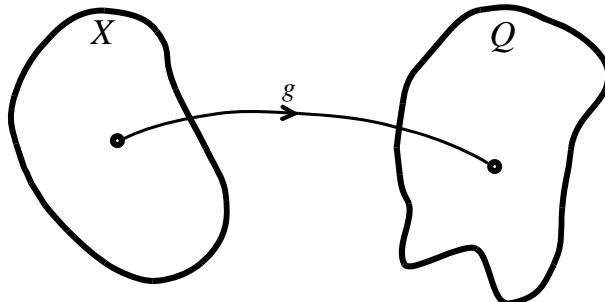
Percepcija zvuka kao proces preslikavanja

Kada se percepcija zvuka posmatra kao subjektivni odziv slušaoca na objektivne zvučne događaje u okruženju kao na slici 9.2, onda se rad čula sluha može shvatiti kao jedan proces preslikavanja kao što je simbolično prikazano na slici 9.3. Zvučna slika nastaje delovanjem fizičke pobude na čulo sluha slušaoca. Pojava zvuka kao objektivne veličine koja predstavlja fizičku pobudu označava se kao „zvučni događaj“. On predstavlja pojavu u realnom fizičkom svetu slušaočevog okruženja. U skladu s tim, uvodi se i pojam „zvučni objekat“, koji označava izvor zvuka čijim radom nastaje zvučni događaj.

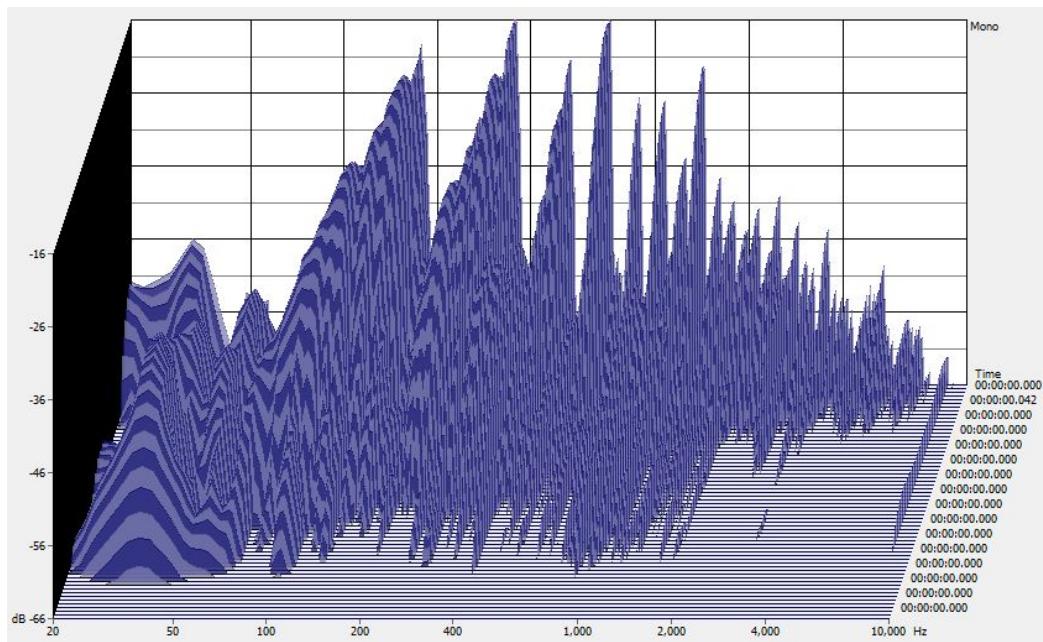
U fizičkom domenu može se definisati prostor u kome se pojavljuju svi zvučni događaji. On je određen dimenzijama relevantnih fizičkih veličina kojima se opisuju zvučne pojave: intenzitet, frekvencija i vreme. Na slici 9.4 prikazan je takav fizički prostor u kome je predstavljena jedna kratka zvučna pojava (prikazan je izgovoren slog „ma“). Vertikalna

osa predstavlja nivo zvuka, horizontalna osa je frekvencija, a treća osa predstavljena u perspektivi je vreme. Ono što je zajednička karakteristika svih veličina u fizičkom svetu jeste da je njihovo stanje u svakom trenutku definisano na odgovarajućim skalama nekim vrednostima koje se numerički izražavaju. Svaki zvučni događaj definisan je jednom tačkom u takvom višedimenzionalnom prostoru.

fizički (objektivni)
prostor zvučnog polja auditorni (subjektivni)
prostor zvučne slike



Slika 9.3 – Ilustracija procesa preslikavanja zvučnog događaja iz prostora fizičkih osobina zvučnog polja u auditorni događaj definisan u prostoru subjektivnih dimenzija zvučne slike



Slika 9.4 – Fizički prostor (intenzitet-frekvencija-vreme) u kome je prikazan zvuk izgovorenog sloga „ma“.

Zvučni događaji se preslikavaju u neke zvučne slike. Pošto zvučna slika nije u domenu fizičkog sveta, za odziv koji nastaje, to jest za saznanje o postojanju nekog zvuka, uvodi se naziv „auditorni događaj“. Time se pravi razlika između fizičkog sveta u kome se javlja realna pobuda i subjektivnog odziva. Svaki auditorni događaj predstavlja tačku u subjektivnom prostoru zvučne slike. Taj prostor je određen skupom subjektivnih dimenzija kojim se opisuju auditorni događaji i koje čulo sluha prepoznaće. Psihoakustika

se bavi definisanjem auditornog prostora zvučne slike i funkcijom g koja definiše preslikavanje između zvučnih događaja u fizičkom prostoru i auditornih događaja u subjektivnom prostoru zvučne slike. Percepcija zvučnog izvora, to jest predstava koja se u zvučnoj slici javlja o njegovom položaju u prostoru i drugim relevantnim osobinama, naziva se „auditorni objekat“.

U zavisnosti od okolnosti proces preslikavanja zvučnog događaja u auditorni događaj može se odvijati s veoma različitim ishodima u zavisnosti od koncentracije, obučenosti i zainteresovanosti slušaoca. Za lakše razumevanje može se napraviti analogija procesa slušanja sa procesom percepcije vizuelne slike čulom vida, što je bliže svakodnevnom ljudskom iskustvu. Kod svake osobe zdravih očiju fizički nadražaji iz okruženja deluje na čulo vida na isti način, ali obim percepcije i odnos prema primljenim vizuelnim informacijama će se u izvesnoj meri razlikovati od osobe do osobe. Na primer, neki ljudi umeju vrlo detaljno da opišu ono što su videli, a ima i onih koji prolaze kroz prostor bez ikakve percepcije detalja vizuelnih prizora iz okoline. Da bi se registrovala boja predmeta u prizoru koji se gleda potrebno je uložiti određenu koncentraciju. U tom domenu nisu svi ljudi isti, pa iskusni slikari mogu da prepoznaju mnogo više nijansi iste boje nego ostali. Samim tim je njihov subjektivni doživljaj viđenog prizora informativno drugačiji, što znači da postoji i obučavanje čula. Najzad, u onome što vide samo će neki ljudi prepoznavati eventualnu estetsku dimenziju, lepotu oblika i boja koje se posmatraju, a drugima će ta dimenzija ostati neprimetna.

Slična složenost postoji i u percepciji zvučne slike. Zbog toga funkcija preslikavanja g predstavlja delikatnu temu, jer je ona individualna, vremenski promenljiva i zavisi od brojnih trenutnih faktora.

Primeri varijabilnosti procesa preslikavanja

Promenljivost funkcije preslikavanja g sa slike 9.3 znači da se proces formiranja zvučne slike pri ponavljanju istog fizičkog nadražaja može u izvesnoj meri menjati. Bez obzira na individualne sposobnosti i obučenost, funkcija čula sluha u svakodnevnom životu nije uvek maksimalna, pa se može govoriti i o različitim nivoima aktiviranosti čula sluha. Ono što se pri tome najviše menja jeste skup dimenzija prostora Q u koji se procesom slušanja preslikava fizička realnost zvučnog polja. Na to može uticati više faktora, kao što su način slušanja, zainteresovanost slušaoca, koncentracija, itd.

Čak i kada se slušalac koncentriše na ono što čuje, moguća su dva načina slušanja: holističko i analitičko. Holističko slušanje je pristup u kome se čitav zvučni sadržaj posmatra kao jedinstvena kompleksna informacija. Za slušaoca to onda nije skup pojedinačnih zvukova, već jedan jedinstven zvuk koji kao takav nosi neke informacije. Na primer, kada se sluša muzika bez koncentrisanja na pojedinačne instrumente i njihov doprinos; kada se sluša zvuk automobila koji prolazi bez prepoznavanja njegovih pojedinačnih komponenti (šum guma na podlozi, zvuk motora, aerodinamički šum usled kretanja karoserije kroz vazduh). Holističko slušanje je uobičajeni način rada čula sluha kod netreniranih slušalaca.

Analitičko slušanje je proces pri kome se u zvučnoj slici prepoznaju pojedinačne zvučne komponente složenog zvuka. Da bi se postiglo analitičko slušanje, potrebna je izvesna vežba, ali najčešće i mala pomoć. Najjednostavniji način da se slušalac fokusira na samo jednu komponentu kompleksne pobude jeste da se ona na neki način učini prepoznatljivom u masi drugih zvukova. Za to su često neophodna razna pomoćna sredstva da bi se olakšalo koncentrisanje na tačno određen detalj u kompleksnoj zvučnoj slici. Jedno takvo sredstvo su namerne vremenske ili intenzitetne varijacije signala. Postoji školska ilustracija iniciranja analitičkog slušanja na primeru jednog tona odsviranog na nekom muzičkom instrumentu. Takav zvuk uvek sadrži niz harmonika kao nezavisnih komponenti, ali se sve one pri uobičajenom slušanju doživljavaju kao jedinstven zvuk. Međutim, ako se na neki način samo jedan od harmonika nekoliko puta uključi i isključi, čulo sluha će se vezati za njega. Nakon toga je u slopu složenog tona moguće lako prepoznavanje tog jednog harmonika kao nezavisne zvučne komponente.

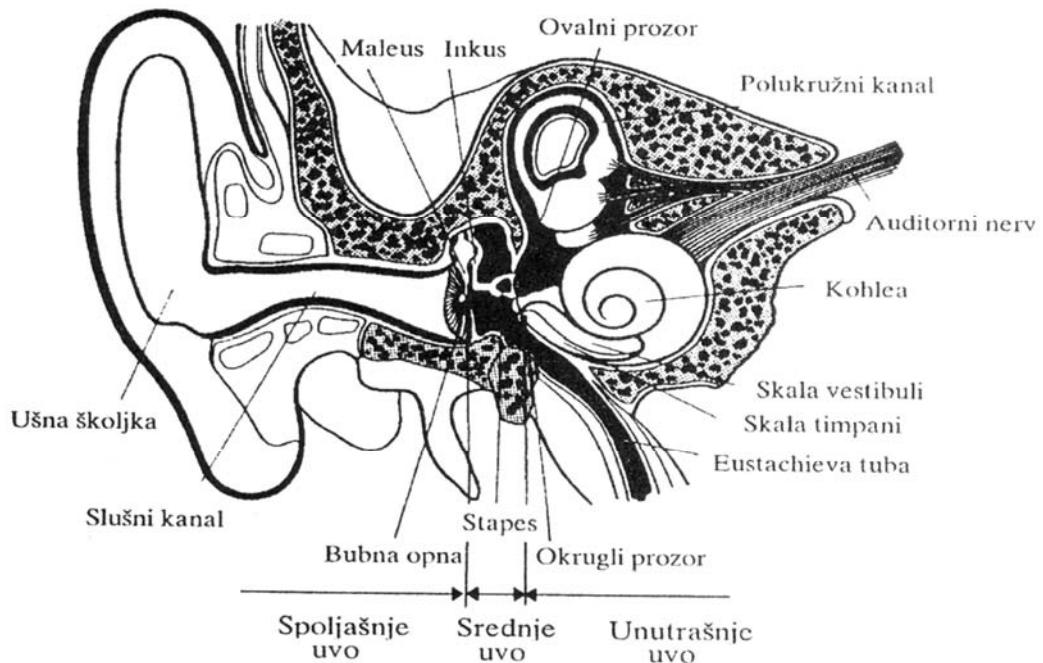
Postojanje analitičnog i holističkog slušanja pokazuje da isti fizički nadražaj čula sluha može davati različite izlaze iz tog procesa. Ovakva podela objašnjava da je uzrok varijabilnosti u primljenim zvučnim signalima negde na višem nivou procesiranja u moždanim centrima. To čini razliku između čula sluha kao senzora zvuka i fizičkih senzora poput mikrofona.

9.1 Fizički deo čula sluha

Fizički deo čula sluha sastoji se od dva uva i nervnih puteva do mozga. Struktura građe uva prikazana je na slici 9.5. Prikazan je presek kroz centralnu ravan desnog uva. Vidi se da je građa ovog organa relativno složena. Ona se u anatomske, ali i u funkcionalnom smislu, deli na tri celine. To su: spoljašnje, srednje i unutrašnje uvo. Ova podela ide anatomski jasnim granicama i označena je na slici 9.5. Spolja posmatrano, na glavi je vidljiv samo deo spoljašnjeg uva. Srednje i unutrašnje uvo nalaze se u šupljinama kosti glave, čime su u znatnoj meri zaštićeni od eventualnih mehaničkih oštećenja, od promene temperature, vlažnosti sredine itd.

Delovi i funkcija spoljašnjeg uva

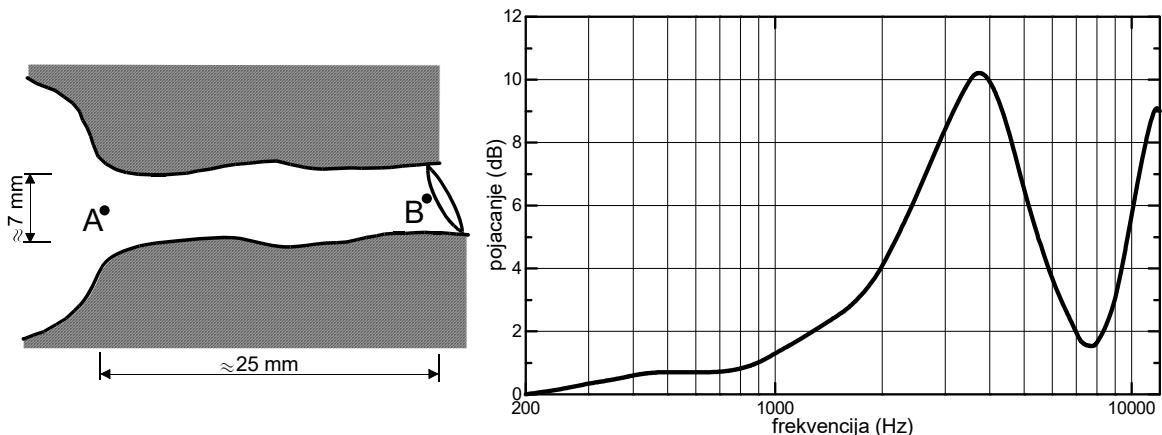
Spoljašnje uvo čine ušna školjka i slušni kanal. Ušna školjka je hrskavičava tvorevina pokrivena kožom, formirana asimetrično oko otvora slušnog kanala. Grubo posmatrano, ušna školjka ima levkast oblik. Površina okrenuta spoljašnjoj sredini ima na sebi grebenaste reljefne forme koje se oblikom i veličinom u izvesnoj meri razlikuju od osobe do osobe. Dimenzije ušne školjke su reda centimetara (dužina oko 7 cm), pa ona u oblasti veoma malih talasnih dužina utiče kao fizička prepreka na prijem zvuka. Na nižim frekvencijama ona nema uticaja na percepцију zvuka. Individualne razlike u veličini i građi ušne školjke utiču na izvesne individualne razlike koje postoje u procesu percepције zvuka.



Slika 9.5 – Izgled uva u preseku kroz njegovu centralnu ravan.

Slušni kanal je cev dužine 25-30 mm i prečnika 6-7 mm. On ima funkciju zvukovoda koji vezuje srednje uvo sa spoljašnjom sredinom. Na kraju kanala nalazi se bubna opna, tako da je to u akustičkom smislu cev otvorena na jednom svom kraju i zatvorena na drugom. Kanal ima i zaštitnu ulogu jer oblikom i dužinom mehanički štiti bubnu opnu od eventualnih spoljašnjih uticaja.

Na slici 9.6 prikazan je izgled slušnog kanala u preseku i njegova karakteristika prenosa. Ona je definisana kao odnos odziva i pobude, to jest kao razlika nivoa zvuka na površini bubne opne (tačka B) i ulaza u kanal (tačka A). Sa dijagrama se vidi da slušni kanal predstavlja cev zatvorenu s jedne strane, u njemu se javljaju rezonance na neparnim umnošćima osnovne frekvencije, i koje se manifestuju pojačanjem vidljivim na desnoj strani slike 9.6. S dužinom koju kanal prosečno ima, prva rezonanca je u oblasti 3 – 4 kHz, a sledeća u oblasti iznad 10 kHz i njen uticaj je takođe vidljiv u karakteristici sa slike 9.6. Individualne varijacije dimenzija slučnog kanala od osobe do osobe čine da i frekvencije njegovih rezonanci variraju u nekom malom intervalu. Pojačanje koje prva rezonanca slušnog kanala unosi u njegovu funkciji prenosa reda je veličine 10 dB. Kasnije će biti pokazano da je upravo u toj oblasti frekvencija ljudsko uvo najosetljivije, što je očigledan doprinos slušnog kanala.



Slika 9.6 – Izgled slušnog kanala i prenosna karakteristika za slučaj kanala sa dimenzijama označenim na slici.

Delovi i funkcija srednjeg uva

Srednje uvo ima posredičku ulogu između vazdušne sredine, koja se završava bubnom opnom, i unutrašnjeg uva u kome se nalaze senzori. To je jedna vazdušna šupljina u kojoj se nalaze: bubna opna, tri slušne koščice sa pratećim ligamentima i mišićima, i membrana prema unutrašnjem uvu koja se naziva "ovalni prozor". Šupljina srednjeg uva je povezana sa usnom dupljom jednom kapilarnom cevčicom koja se naziva eustahijeva tuba. Svi ovi delovi vidljivi su na slici 9.5.



Slika 9.7 – Fotografija bubne opne (levo) i skica njenog izgleda u preseku (desno).

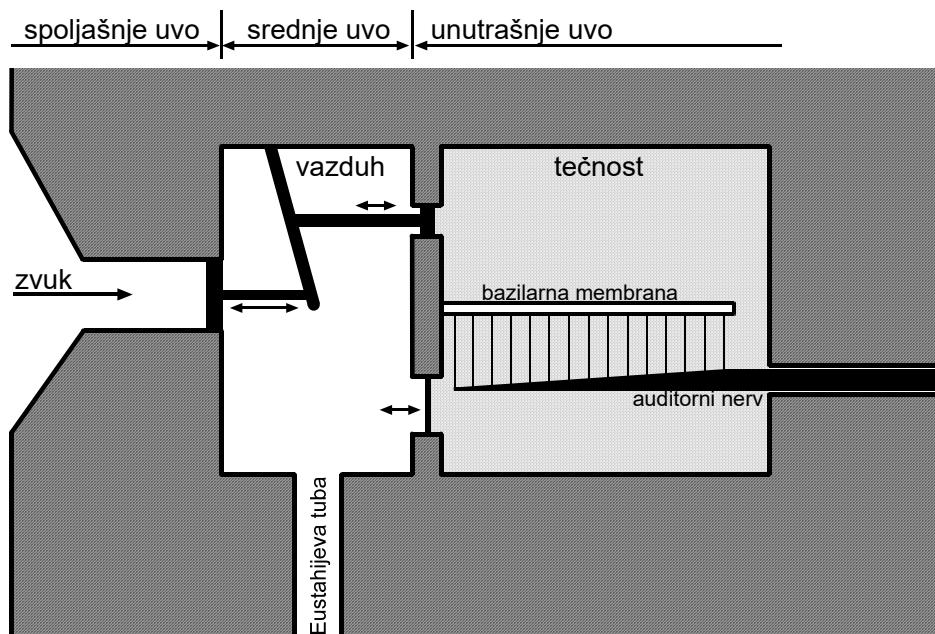
Bubna opna ima funkciju akustičko-mehaničkog pretvarača, jer transformiše zvučne vibracije iz vazduha u mehaničke vibracije slušnih koščica koje se nalaze iza nje. To je vrlo tanka membrana, debljine oko 0,1 mm. Fotografija njenog spoljašnjeg izgleda prikazana je na slici 9.7. Vidi se da je zbog male debljine ona skoro providna, pa se kroz nju nazire povezana prva slušna koščica ("čekić"). Zbog tako male debljine bubna opna je lako podložna oštećenjima pod dejstvom veoma jakih zvučnih pobuda. Na istoj slici se vidi da

je bubna opna postavljena pod izvesnim uglom u odnosu na osu slušnog kanala. U realnosti ona nije ravna, kao što su na primer membrane raznih mikrofona, već ima izražen konusni oblik.

Zbog konusnog oblika bubne opne vidljivog na slici 9.7 i zbog činjenice da je jedan mali mišić stalno drži u zategnutom stanju bubna opna ne radi kao jednostavan pasivni pretvarač. Struktura njenog oscilovanja relativno je složena, jer na različitim frekvencijama različiti delovi opne učestvuju u oscilovanju. Tako se s porastom frekvencije smanjuje efektivna površina opne koja učestvuje u oscilovanju.

Slušne koščice sačinjavaju mehanički sistem prenosa vibracija sa bubne opne na ovalni prozor unutrašnjeg uva koji se nalazi na suprotnoj strani. Zvuk se kroz taj sistem prenosi u obliku vibracija koščica. Unutrašnje uvo je ispunjeno tečnošću. Kada srednje uvo ne bi postojalo i kada bi zvuk iz vazduha direktno pobuđivao membranu iza koje je tečnost unutrašnjeg uva, zvuk bi se na granici dve sredine reflektovao nazad u vazduh zbog toga što postoji velika razlika u fizičkim svojstvima te dve sredine.

U takvoj situaciji sistem koščica srednjeg uva ima funkciju transformatora akustičke impedanse prilagođavajući u izvesnoj meri impedansu vazdušne sredine na impedansu tečnosti. Šematski prikaz rada srednjeg uva sa koga je jasnija transformatorska uloga slušnih koščica prikazan je na slici 9.8. Njihova funkcija proizilazi iz načina na koji su međusobno povezane, jer se sa slike vidi da one deluju kao sistem poluge. Relativno veliki hod bubne opne velike površine koja na koščice deluje malom silom transformiše se u veću силу koja malim hodom deluje na ovalni prozor značajno manje površine iza koga je tečnost unutrašnjeg uva. Bez toga uvo ne bi moglo da vrši funkciju senzora zvuka u vazduhu.



Slika 9.8 - Šematski prikazi rada srednjeg uva

Eustahijeva tuba

Eustahijena tuba je tanka cevčica, vidljiva na slici 9.5 i šematski naznačena na slici 9.8. Ona je sastavni deo srednjeg uva i spaja njegovu vazdušnu šupljinu sa usnom dupljom. Na najužem delu prečnik Eustahijeve tube je oko 1 mm. Preko nje se, po potrebi, ostvaruje vazdušna veza između spoljašnje sredine i komore srednjeg uva, što znači između spoljašnje i unutrašnje strane bubne opne. To omogućava izjednačavanje pritisaka sa dve strane ove opne, čime se sprečava njena reakcija na promene statičkog atmosferskog pritiska. Ovakva kompenzacija je veoma važna na primer pri ronjenju, kada spoljašnji pritisak na bubnu opnu može višestruko da premaši vrednost normalnog atmosferskog pritiska, ali i pri letenju avionom kada se statički pritisak značajno smanjuje.

Cev Eustahijeve tube je u normalnim okolnostima zatvorena, ali se pri gutanju ili zevanju otvara. Zbog toga je pri naglim promenama spoljašnjeg pritiska potrebno ponavljati gutanje da bi se otvaranjem Eustahijeve tube izjednačavao pritisak sa spoljašnje i unutrašnje strane bubne opne. Kada je cev otvorena, sopstveni glas čuje se jače i sa promenjenom bojom, jer zvuk iz usne duplje dospeva kroz tubu direktno u srednje uvo.

Upalni procesi mogu učiniti da se zbog oticanja sluzokože eustahijeva tuba ne može otvoriti. Tada ne postoji mogućnost kompenzacije pritisaka, što prouzrokuje bol u ušima pri promenama statičkog pritiska. U takvim okolnostima nije moguće ronjenje, jer se već na vrlo malim dubinama javlja jak bol usled deformacije bubne opne, a mogući su i problemi u vožnji avionom pri poletanju i sletanju.

Zaštitni efekat srednjeg uva

Život na zemlji evoluirao je u tišini koja je u prirodi vladala sve do industrijske revolucije. Tada su se u čovekovom okruženju pojavile okolnosti u kojima je čulo sluha izloženo jakim zvučnim pobudama. Vremenski period koji je protekao od tada suviše je kratak da bi doneo bitne promene u evoluciji čovečijeg organizma. Zbog toga uvo nema neku prirodnu zaštitu protiv prekomernog zvučnog nadražaja. Za razliku od toga, život na kopnu evoluirao je u prisustvu jake svetlosi od sunca, pa su sve kopnene životinjske vrste dobile očne kapke kao zaštitu. U nedostatku adekvatne biološke zaštite, zaštita čula sluha od prekomernih zvukova postala je ekološka tema. Mogućnost zaštite traži se u sferi zakonodavstva koje propisima reguliše postavljanje i korišćenje izvora zvuka (pravila ponašanja, kućni red) i u sferi fizičkih sredstava za zvučnu zaštitu, a to su pregradne konstrukcije kojima se čovek okružuje.

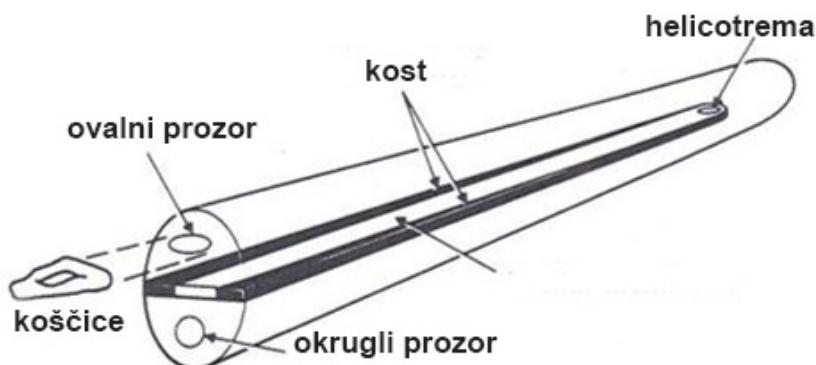
Jedini zaštitni mehanizam koji čovečiji organizam delimično štiti od prekomernih zvukova nalazi se u prenosnom sistemu srednjeg uva. Postoje dva efekta koja deluju u tom smislu: inercija slušnih koščica i razdešavanje njihovog prenosnog sistema. Iako su slušne koščice veoma lagane (čekić i nakovan oko 20 mg, uzengija 2-4 mg) njihova inercija predstavlja izvesnu zaštitu od naglog dejstva zvučnih vibracija (pucnjevi i slične pojave). Razdešavanje prenosnog sistema koščica nastaje pod dejstvom povratne sprege iz moždanih centara i naziva se akustički refleks. Ralizuje se odgovarajućim reakcijama

mišića koji kontroliše pomeranje koščica. Akustički refleks ima konačnu brzinu reagovanja koja zavisi od nivoa zvučne pobude. Vreme tog reagovanja je u intervalu 0,1–0,3 s. Ovaj mehanizam deluje pri zvučnim pobudama koje su svojim nivoom iznad 65-70 dB i njegov efekat približno linearно raste sa porastom pobude. Maksimalno slabljenje zvuka delovanjem akustičkog refleksa je oko 20 dB.

Delovi i funkcija unutrašnjeg uva

Unutrašnje uvo je smešteno u koštanim kanalima i ispunjeno tečnošću. Sastoji se od jednog spiralno smotanog kanala koji se naziva kohlea, i u kome se nalaze slušni receptori. Kohlea ima ukupnu dužinu oko 35 mm i smotana je u obliku puža sa nešto više od 2,5 navoja. U svojoj unutrašnjosti kohlea je jednom pregradom uzdužno podeljena na dva dela. Pregrada se naziva bazilarna membrana. U samom vrhu bazilarne membrane nalazi se otvor, tako da tečnost može da prolazi između dva dela prostora kohlee.

Principijelni izgled kohlee prikazan je na slici 9.9. Na njenom početku nalaze se dve male membrane označene na slici. Na gornjoj, koja se naziva ovalni prozor, pripojena je slušna koščica uzengija (*stapes*). Preko nje se vrši zvučna pobuda unutrašnjosti kohlee. Donja, koja se naziva okrugli prozor, ima pasivnu funkciju. Naime, pošto je tečnost u unutrašnjosti kohlee nestišljiva, svako pomeranje ovalnog prozora prema unutrašnjosti kohlee mora da prati odgovarajuće kretanje okruglog prozora prema spoljašnosti, i obrnuto. Ovakav rad dve membrane (takozvani "puš-pul") omogućava vibracionu pobudu unutrašnjosti kohlee iako je tečnost nestišljiva.



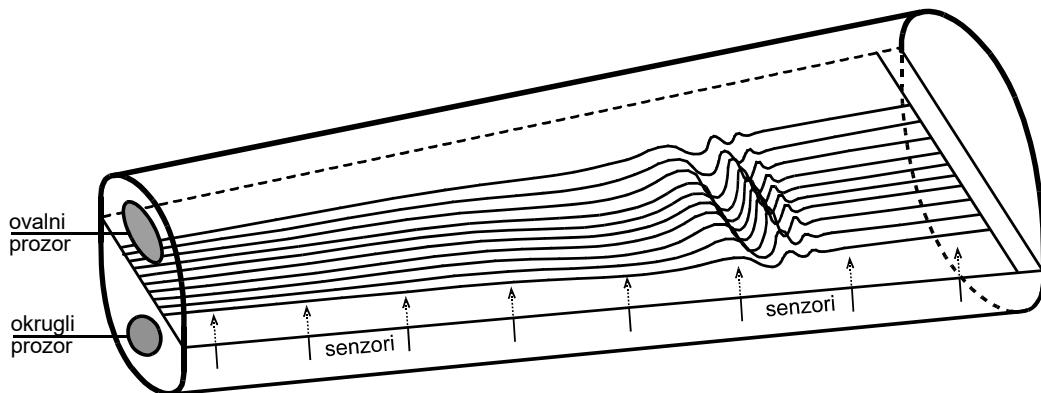
Slika 9.9 – Šematski prikaz kohlee

Čitavom dužinom bazilarne membrane nalaze se receptorske ćelije koje reaguju na svaki njen pokret, kao što je naznačeno na slici 9.8. Mehanička pomeranja pri oscilovanju membrane izazivaju pobudu senzorskih ćelija, što kao rezultat daje odgovarajuću nervnu aktivnost kojom se nadražaj prenosi do centara u mozgu.

Procesi na bazilarnoj membrani

Za razumevanje procesa koji se dešavaju pri zvučnoj pobudi značajno je sagledavanje prirode fizičkog procesa na bazilarnoj membrani. Širina bazilarne membrane nije konstantna. U zoni baze, to jest pri ulazu u kohleu ona je uža i širi se ka njenom vrhu. Kao takva ona predstavlja mehanički sistem koji ima svoje rezonance. One se javljaju poprečno u odnosu na dužinu membrane i određene su zategnutošću membrane i njenom masom. Frekvencija te rezonance kontinualno se menja duž njenih 35 mm dužine. Najviša frekvencija mehaničke rezonance bazilarne membrane je u oblasti oko 20 kHz i javlja se na samom njenom početku, neposredno pored ovalnog prozora. Najniža frekvencija rezonance je oko 20 Hz i javlja se na kraju bazilarne membrane, u zoni najudaljenijoj od ovalnog prozora.

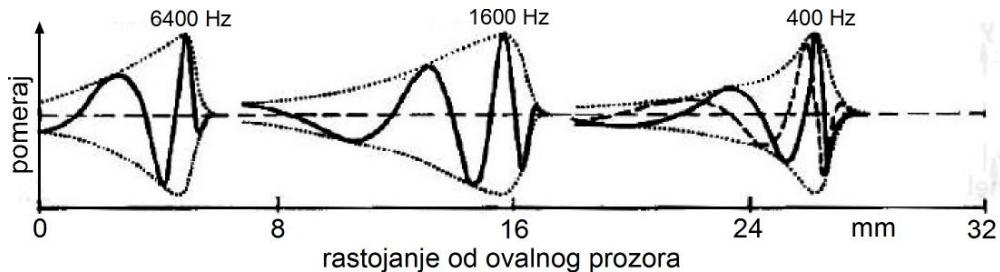
Pri zvučnoj pobudi preko ovalnog prozora energija vibracija dospeva u unutrašnje uvo. Kao odziv na tu pobudu pojavljuju se oscilacije bazilarne membrane. Način na koji se javljaju zvučne oscilacije bazilarne membrane prikazan je principijelno na slici 9.10. Oscilacije koje nastanu na njenom početku prenose se u vidu progresivnog talasa koji se kreće duž membrane. Te vibracije se prostiru duž bazilarne membrane sve do mesta gde se pobudna frekvencija poklapa sa frekvencijom sopstvene mehaničke rezonance membrane. U toj zoni energija putujućeg talasa pobuđuje njenu sopstvenu rezonancu, što rezultuje maksimalnom amplitudom oscilovanja. Tu se kretanje putujeći talasa zaustavlja jer svu njegovu energiju apsorbuje rezonantni proces. Iza tog mesta membrana ostaje u stanju mirovanja. Taj proces je za slučaj tri različite pobudne frekvencije simbolički prikazan na slici 9.12.



Slika 9.10 - Principijelna skica oscilovanja bazilarne membrane pri zvučnoj pobudi.

Vibraciono kretanje bazilarne membrane čitavom njenom dužinom registruju receptorske ćelije. Na osnovu toga centri u mozgu kontinualno dobijaju sliku stanja vibracija cele bazilarne membrane, bez obzira na vrstu pobude, a ne samo o položaju maksimuma. Na mestu rezonance reakcija senzora je samo najintenzivnija, ali informacije mozgu šalju sve pobuđene ćelije srazmerno lokalnom intenzitetu pobude. Centri u mozgu u svakom trenutku imaju sliku oscilatorne pobuđenosti bazilarne membrane i na osnovu takve kompleksne informacije formiraju svest o svim atributima primljenog zvuka.

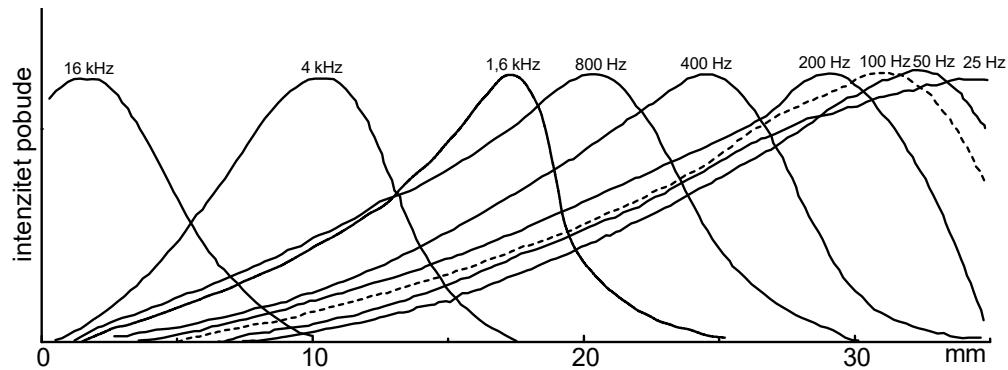
Prema tome, fizička zbijanja na bazilarnoj membrani ključna su za ukupni procesu slušanja.



Slika 9.11 – Vibracioni odziv bazilarne membrane pri pobudi zvukom tri različite frekvencije

Kritični opsezi

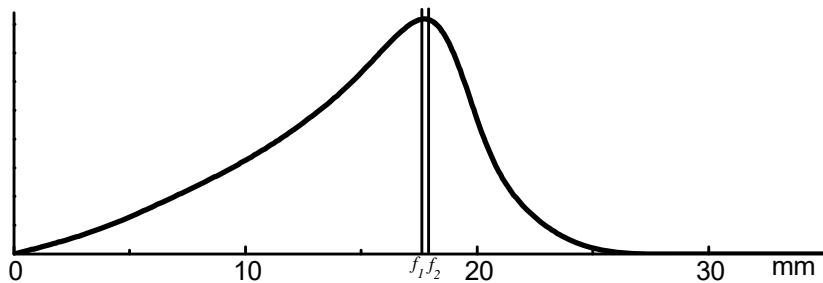
Šematski prikaz raspodele intenziteta vibracija bazilarne membrane pri pobudi čistim sinusnim tonom različitih frekvencija prikazana na slici 9.12. Sa slike se vidi da postoji ograničena oština maksimuma u odzivu. Uz to, analiza vibracija bazilarne membrane koju vrše receptorske ćelije ima konačnu rezoluciju zbog konačnog broja takvih ćelija raspoređenih duž membrane i zbog činjenice da se signali iz grupe susednih ćelija stapaju u jedinstven signal koji ide ka mozgu jednim nervnim vlaknom. Zbog svega toga čulo sluha ima izvesna ograničenja u rezoluciji stanja vibracija bazilarne membrane, a time i ograničenja u percepciji frekvencija. To znači da bazilarna membrana i njen senzorski sistem ispoljavaju osobinu čula koja se može, po analogiji, uporediti sa selektivnošću u elektrotehnici. Postoji neka konačna širina „propusnog opsega“ u osetljivosti čula sluha koja se može naslutiti sa slike 9.12.



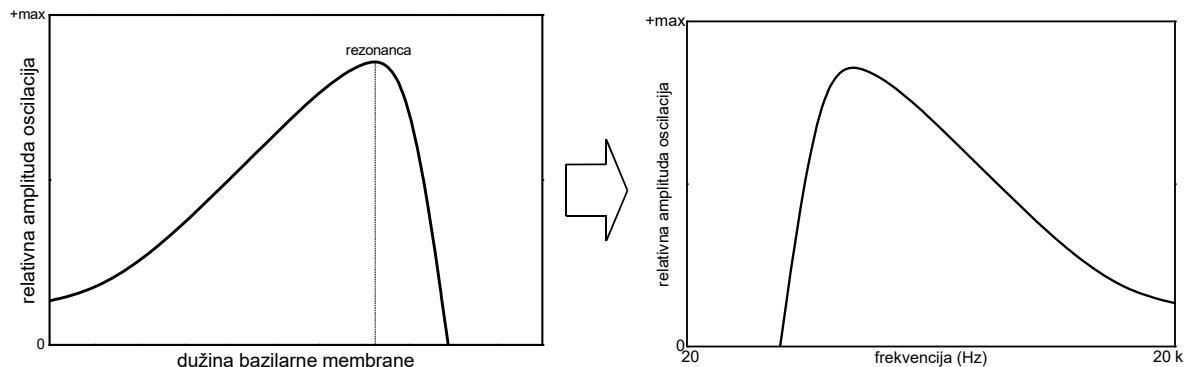
Slika 9.12 - Raspodela intenziteta vibracija bazilarne membrane pri pobudi čistim sinusnim tonom različitih frekvencija

Ova specifična selektivnost čula uvodi pojам kritičnog opsega. On odgovara pojmu propusnog opsega u elektrotehnici, samo što je definisan preko nekih perceptivnih efekata. Pod pojmom kritičnog opsega podrazumeva se širina frekvencijskog opsega u kome se dve frekvencijski bliske pobude na bazilarnoj membrani ne mogu u zvučnoj slici

razdvojiti kao dva nezavisna auditorna događaja. Ovo je simbolički ilustrovano na slici 9.13. Ako dva tona istovremeno deluju na uvo i imaju istu frekvenciju, oni se stapaju u jedinstven proces na bazilarnoj membrani i jedinstven doživljaj jednog jedinog tona. Ali ako se frekvencija jednog od ta dva tona menja, potrebno je napraviti frekvencijski pomak koji je veći od neke granice da bi se jasno percepiralo prisustvo dva nezavisna tona. Dok god je razlika između dve frekvencije manja od neke granične vrednosti subjektivni utisak ne ukazuje na postojanje dva tona već samo jednog, ali koga slušalac eventualno označava kao „hrapav“. Širina kritičnog opsega proizlazi iz mehanike bazilarne membrane, strukture receptorskih ćelija i nervnih puteva.



Slika 9.13 – Šematski prikaz dve bliske frekvencije naznačene vertikalnim linijama koje se ne mogu razlikovati jer upadaju u isti kritični opseg na bazilarnoj membrani

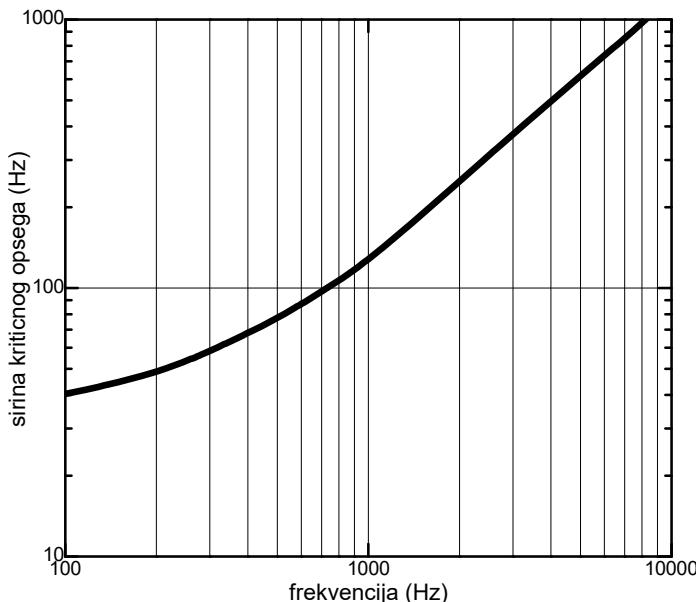


Slika 9.14 - Šematski prikaz obvojnica amplituda vibracija bazilarne membrane kada je pobuđena zvukom jedne frekvencije kao funkcija dužine membrane (levo) i kao funkcija frekvencije (desno).

Pošto položaj maksimuma vibracija bazilarne membrane zavisi od pobudne frekvencije, stanje na njoj može se prikazivati i u frekvencijskom domenu. Na slici 9.14 šematski je prikazan dijagram obvojnica amplitude vibracija bazilarne membrane za jedan slučaj pobude bazilarne membrane nacrtan na dva načina: kao funkcija dužine membrane i kao funkcija frekvencije (frekvencijska osa je baždarena u logaritamskoj razmeri). Početak membrane, neposredno uz ovalni prozor, ima rezonance na najvišim čujnim frekvencijama, a rezonance na najnižim frekvencijama su na njenom kraju. Zbog toga na dijagramu u funkciji dužine membrane leva strana odgovara najvišim, a desna najnižim čujnim frekvencijama. Preslikavanjem pobude bazilarne membrane iz domena njene

dužine u frekvencijski domen dobija se simetrična kriva kod koje su najniže čujne frekvencije na levoj strani dijagrama a najviše na desnoj.

Širina kritičnog opsega funkcija je frekvencije, a to znači mesta na bazilarnoj membrani na kome se javlja maksimum vibracija. Na slici 9.15 prikazana je dijagram koji predstavlja širinu kritičnog opsega u funkciji frekvencije. Vidi se da njegova širina raste s porastom frekvencija.

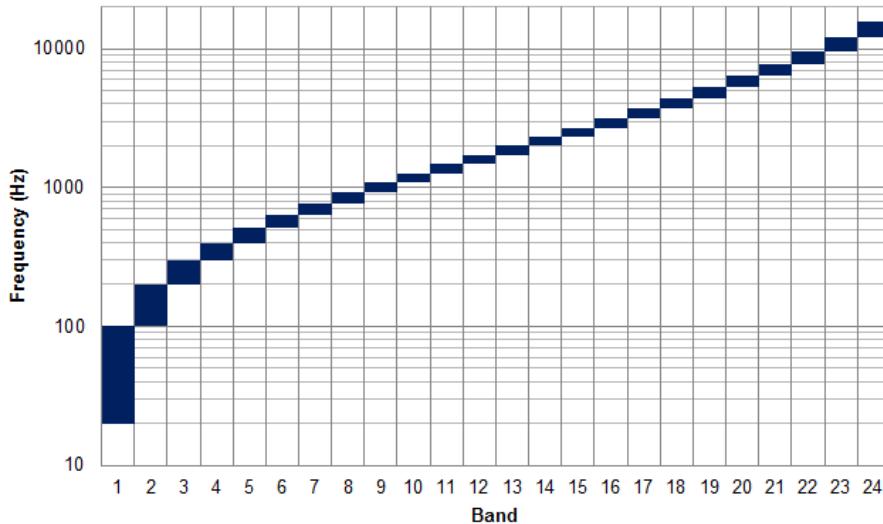


Slika 9.15 - Dijagram širine kritičnog opsega u funkciji frekvencije

Slika 9.12 pokazuje još jednu važnu osobinu uva – raspodela rezonantnih frekvencija duž bazilarne membrane nije linearна. Vidi se da se maksimum odziva na frekvenciji 1600 Hz nalazi približno u zoni sredine bazilarne membrane. Sa slike se takođe vidi da pomak od samo 25 Hz na najnižim frekvencijama (od 25 Hz do 50 Hz) znači pomeranje maksimuma pobude za približno 10% ukupne dužine bazilarne membrane. Pri tome, raspored senzorskih ćelija koje registruju kretanje duž bazilarne membrane približno je linearan, pa je njihova gustina jednaka po jedinici dužine membrane. U toj činjenici krije se objašnjenje logaritamske zavisnosti čula sluha po frekvencijama. Sa slike 9.12 se vidi da to ima fiziološko opravdanje, jer je pri pobudi frekvencijom u oblasti oko 1000 Hz maksimum vibracione pobude pozicioniran blisko sredini bazilarne membrane.

Bark skala

Postojanje kritičnih opsega je rezultat konačne selektivnosti bazilarne membrane u odzivu na zvučnu pobudu. Kritični opseg se formira oko svake pobuđene frekvencije, gde se manifestuje njegov uticaj. Sa spekta procesa slušanja ponekad postoji potreba da se frekvencijska analiza zvučnih signala vrši na način koji je analogan selektivnosti bazilarne membrane. Za takvu frekvencijsku analizu formirana je takozvana Bark skala. To je način podele skale frekvencija na podopsegove koji su svojom širinom usklađeni sa širinom kritičnih opsega. Na slici 9.16 prikazana je podela frekvencijske skale na Bark opsege i širina svakog od opega.



Slika 9.16 – Frekvencijski opsezi Bark skale sa naznačenom njihovom širinom u Hercima (zasenčena polja)

Koštana provodnost

Putanja zvučne energije kroz spoljašnje i srednje uvo svojim anatomske i funkcionalnim osobinama maksimalno je prilagođena efikasnom prenosu energije. To se obezbeđuje mehanizmom slušnih koščica, što je ranije objašnjeno. Međutim, zvučno polje deluje na čitavu površinu glave slušaoca, ali zbog razlike u impedansama kosti i vazduha efikasnost zvučne pobude kosti glave je mala. Impedansa koštanog sklopa glave je za više od tri reda veličine veća od impedanse vazduha. Zbog toga se najveći deo energije koji pogađa glavu reflektuje i samo vrlo mali deo prelazi u sklop glave.

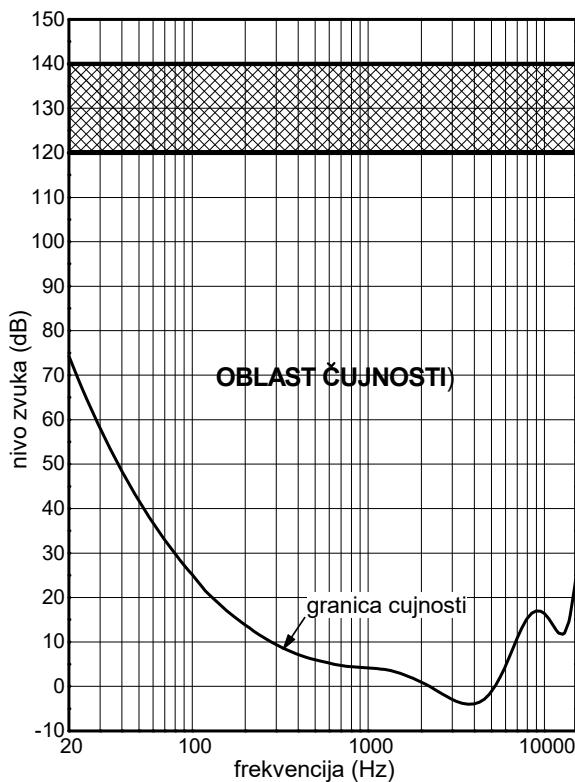
Iako postoji veoma mala efikasnost prelaska zvučne energije u koštani sklop glave, ukupna površina glave znatno je veća od površine otvora slušnog kanala. Zbog toga količina energije koja preko kosti stiže do unutrašnjeg uva ipak u ukupnoj sumi nije zanemarljiva. Pojava da zvuk iz spoljašnje sredine dospeva do tečnosti unutrašnjeg uva preko kostiju glave, paralelno putanjama kroz srednje uvo, naziva se koštana provodnost. Njen doprinos u nekim okolnostima može se primetiti. Na primer, koštana provodnost određuje maksimalne domete zaštite uva od buke kada se koriste zaštitni čepići postavljeni direktno u slušni kanal. Čak i kada bi oni unosili beskonačno slabljenje, ukupni rezultat zaštite sveo bi se na ono što se čuje preko koštane provodnosti.

Oblast čujnosti zvuka

Percepcija zvuka je funkcija dve fizičke dimenzije: frekvencije i nivoa zvučne pobude. Sa jedne strane, postoje perceptivna ograničenja po frekvencijama jer uvo reaguje na zvučne nadržaje samo u jednom intervalu frekvencija koje se nazivaju čujne frekvencije. Nominalne granice čujnog opsega frekvencija utvrđene su na 20 Hz (donja) i 20.000 Hz (gornja). Na skali intenziteta takođe postoji granica nadražaja ispod koje mehanizam čula

sluha ne reaguje. Ona se naziva "granica čujnosti". Potrebno je na uvo dovesti nadražaje koji su iznad te granice da bi se stvorila neka zvučna senzacija. Zbog toga je jasno da postoje široke oblasti zvučnih pojava koje čulo sluha ne može registrovati.

Fizičke granice mogućnosti percepcije čula sluha prikazuju se dvodimenzionalnim dijagramom koji je prikazan na slici 9.17. Označena površina se naziva oblast čujnosti. Neki autori je nazivaju i "slušno polje". Prikazana oblast čujnosti karakteriše zdravo ljudsko uvo. Osoba sa zdravim čulom sluha u literaturi se obično označava izrazom "otološki normalni subjekt" (otologija je deo otorinolaringologije koja se bavi čulom sluha). Postoji niz faktora koji tokom života mogu da promene granice oblasti čujnosti. To su preležane bolesti, prekomerni uticaj visokih nivoa zvuka, upotreba nekih lekova, proces starenja, itd.



Slika 9.17 - Oblast čujnosti zdravog ljudskog uva

Oblast čujnosti kao površina u ravni frekvencija - nivo zvuka jasno je ograničena sa svoje desne, donje i leve strane. S donje strane oblast čujnosti je ovičena granicom čujnosti, a sa leve i desne strane najnižom, odnosno najvišom čujnom frekvencijom. Sa slike 9.17 vidi se da je granica čujnosti veoma nelinearna. Razlika u nivou zvuka koji odgovara granicama čujnosti na 20 Hz i 1 kHz je oko 70 dB. To znači da je nivo najtišeg zvuka na najnižim čujnim frekvencijama oko 70 dB iznad nivoa najtišeg zvuka u centralnom delu čujnog frekvencijskog opsega.

Gornja granica oblasti čujnosti u fizičkom smislu ne postoji na način kako je definisana granica čujnosti. Zato je u toj zoni nacrtan pojas označen šrafurom. Pri pobudama vrlo

visokim nivoima zvuka amplitude oscilovanja pokretnih delova, pre svega bubne opne, pri velikim pobudama mogu premašiti granice njihovih anatomske mogućnosti. Kao rezultat, s povećanjem nivoa pobude nastaje prvo nelagodnost, a zatim i bol. U tom delu razlikuju se granica neprijatnosti, koja se u literaturi uobičajeno definiše na oko 120 dB, i granica bola definisana na oko 140 dB. To je zona veoma jake zvučne pobude pri kojoj se javljaju velike amplitude oscilovanja svih pomičnih delova (bubna opna, slušne koščice, ovalni prozor, bazilarna membrana, okrugli prozor). Prekoračenjem granice bola nastaje rizik mehaničkih oštećenja na pomičnim delovima i njihovim spojevima. Položaj ovih granica je krajnje individualan i razlikuje se od osobe do osobe.

Jedna od bitnih odlika čula sluha je da njegov rad zavisi od nivoa zvuka pri kome se vrši slušanje. Taj uticaj postoji i kada je reč o graničnim frekvencijama. Sa slike 9.17 se može zaključiti da se teorijski optimalne vrednosti nivoa, kada se dostižu maksimalne sposobnosti uha, nalaze u intervalu nivoa zvuka 80-90 dB, i tada se može govoriti o nominalnom intervalu opsega čujnih frekvencija 20-20.000 Hz. Pri nižim nivoima širina frekvencijskog opsega čujnosti se zbog oblika krive granice čujnosti sužava, pre svega u oblasti nižih frekvencija.

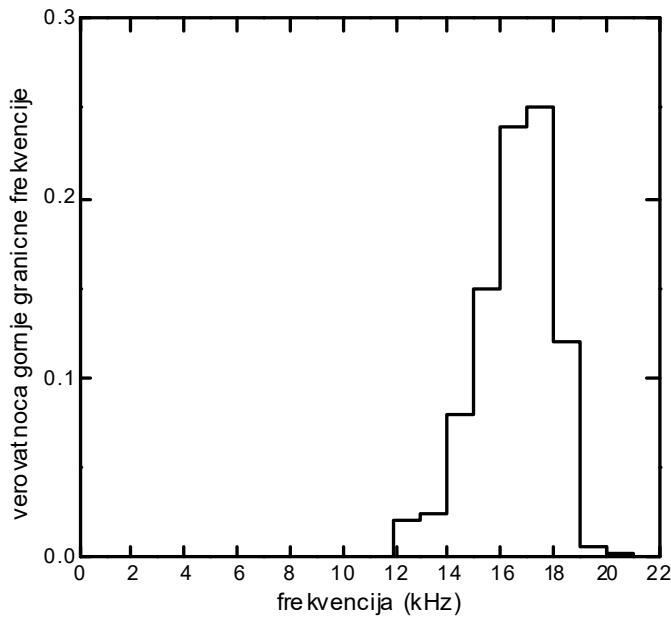
Granične čujnog opsega

Kao i sve drugo što se odnosi na čulo sluha, i granice čujnog opsega nisu konstante na način kako se u tehnici shvata taj pojam. Usvojene nominalne vrednosti granica označene na slici 9.17 treba razumeti kao statističke pokazatelje koji su dobijeni ispitivanjem na dovoljno velikom uzorku zdrave populacije. Podrazumeva se da kod raznih ljudi postoje individualne razlike, odnosno da su sasvim prirodna odstupanja tih vrednosti od osobe do osobe.

Gornja granična frekvencija, za koju se uobičajeno navodi nominalna vrednost 20.000 Hz, dobijena je kao statistički pokazatelj stanja kod zdrave populacije. Istraživanja radi pouzdanog utvrđivanja ovog podatka posebno su intenzivno rađena krajem sedamdesetih godina dvadesetog veka zbog definisanja parametara digitalnih sistema koji su tada uvođeni u upotrebu. Merenja na zdravoj populaciji uzrasta od 15 do 50 godine i statistička obrada rezultata pokazali su da se ova granica mora iskazati verovatnoćom. Rezultat takvog merenja pokazan je na slici 9.18. Dijagram na slici pokazuje verovatnoću sa kojom se može očekivati da neka zdrava osoba ima vrednost gornje granične frekvencije čujnog opsega. Sa dijagrama se vidi da najviše ljudi čuje zvuk do 17-18 kHz, odnosno najveća je verovatnoća da čovek ima tu vrednost gornje granice. Isti dijagram pokazuje da oko 99% osoba ima gornju graničnu frekvenciju u oblasti do 20 kHz. Zbog toga je ta vrednost frekvencije usvojena kao nominalna gornja granica čujnog opsega, smatrajući da je 99% slušalaca dovoljno velika ciljna grupa.

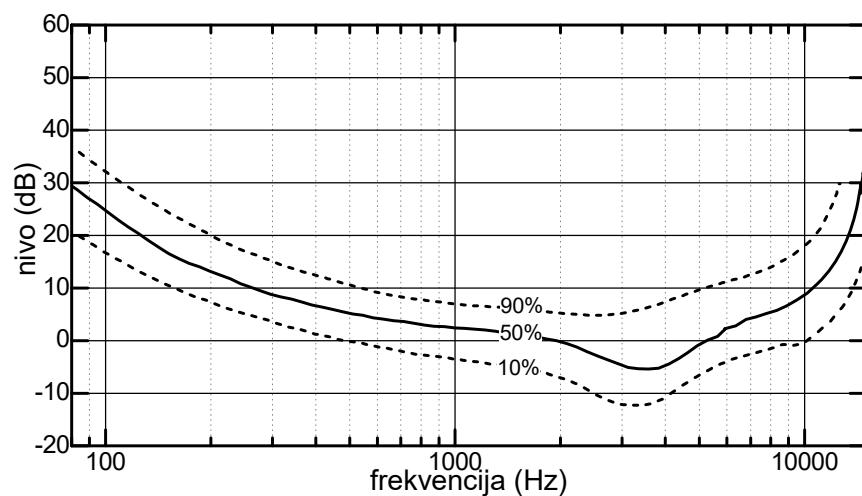
Oblik krive sa slike 9.18 takođe pokazuje da postoje malobrojne osobe koje mogu čuti zvukove čije su frekvencije iznad 20 kHz. Ovi podaci se odnose na ispitivanu grupu opsega starosti 15-50 godina. Novija istraživanja pokazala su da veoma mala deca mogu registrovati frekvencije čak do 25 kHz. To je posledica činjenice da su dimenzije bazilarne

membrane kod njih manje nego kod odraslih osoba, pa na njoj mogu postojati mehaničke rezonance i na frekvencijama iznad 20 kHz.



Slika 9.18 - Raspodela verovatnoće vrednosti gornje granične frekvencije čula sluha kod zdrave populacije

Donja granična frekvencija čula sluha nominalno je usvojena na 20 Hz, što je tačno tri dekade od usvojene gornje granice na 20 kHz. Specifičnost donje granice u tome što pri snižavanju frekvencije funkcija uha postepeno prestaje, a postaje sve izraženija vibraciona reakcija glave i ostalih delova tela. Vrlo precizna granica tog prelaza ne postoji, tako da usvojenu graničnu vrednost 20 Hz treba prihvatići kao nominalno određenu vrednost uslovljenu vrednošću gornje granice na 20 kHz. U starijoj literaturi kao donja granica rada čula sluha navođena je frekvencija 16 Hz, što na izvestan način odslikava relativnost ovog podatka. To je približno frekvencija tona C u najnižoj definisanoj muzičkoj oktavi i može se proizvesti na nekim velikim modelima orgulja.



Slika 9.19 – Statistika granice čujnosti u zdravoj populaciji

Granica čujnosti označena na slici 9.18 takođe je rezultat statističke analize stanja kod zdrave populacije. Granica koja se standardno prikazuje predstavlja stanje koje zadovoljava oko 50% populacije. Na slici 9.20 prikazane su granice koju zadovoljava 10% i 90% populacije, što jasno pokazuje varijabilnost granica čula sluha.

Promene granice čujnosti

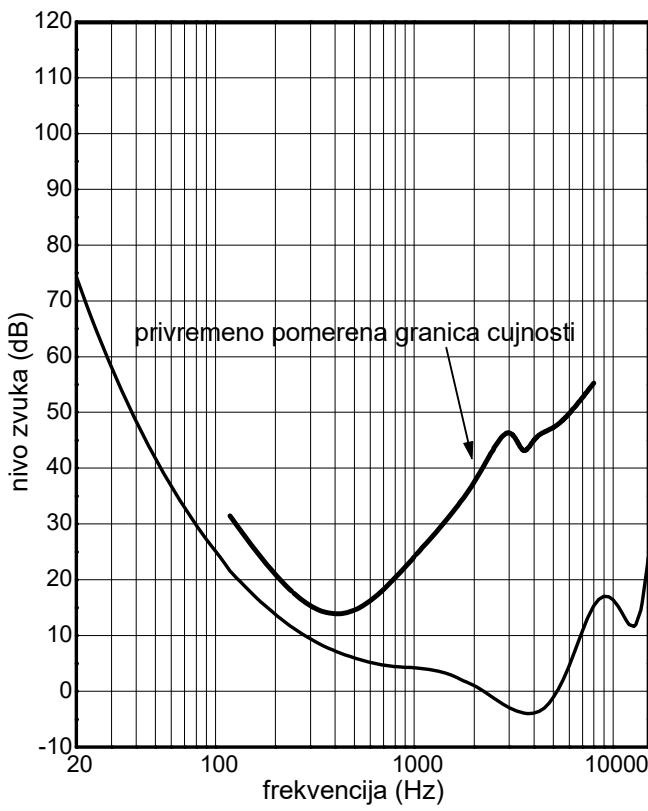
Granica čujnosti prikazana na slikama 9.17 i 9.19 (za 50% populacije) predstavlja prosečnu vrednost određenu na većem uzorku zdrave populacije. Međutim, dva su moguća načina da se granica čujnosti promeni i pomeri ka višim nivoima. To su:

- privremeni pomak nakon kraćeg dejstva visokih nivoa zvuka i
- trajni pomak usled starenja organizma, preležane bolesti ili zbog dugotrajne izloženosti visokim nivoima zvuka.

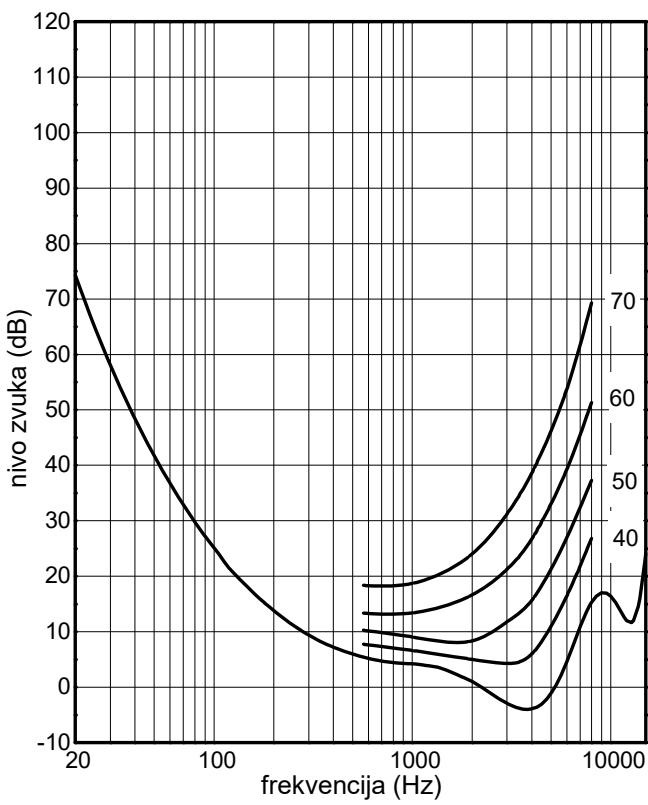
U okolnostima kada se zdravo čulo sluha izloži dejstvu visokih nivoa zvuka, bez obzira na njegov sadržaj (muzika ili šum), dolazi do zaštitnog delovanja srednjeg uva. Usled povećanog slabljenja na putu prenosa zvuka postignutog razdešavanjem mehanizma slušnih koščica, kao reakcija se postiže privremeno pomeranje granice čujnosti naviše. Na slici 9.20 prikazan je rezultat merenja ovakvog pomeranja nakon dvadesetominutnog boravka u ambijentu gde je reprodukovani beli šum ukupnog nivoa 115 dB. Merenje je izvršeno 30 sekundi nakon prestanka zvučne pobude.

Ovakva deformacija u osetljivosti čula sluha se po prestanku pobude smanjuje. Proces relaksacije uva i vraćanja u normalu odvija se veoma lagano i asimptotski teži početnom stanju. Pri dovoljno snažnoj zvučnoj pobudi, kao što je primenjena u slučaju čiji je rezultat prikazan na slici, izvesno odstupanje od normale osetljivosti može se registrovati čak i 24 sata nakon prestanka pobude.

Pomeranja granice čujnosti naviše može biti i trajno. Ono nastaje na različite načine: prirodnim procesom koji se odvija starenjem organizma, izlaganjem prekomernoj buci duže od bioloških granica izdržljivosti bez dovoljno dugih perioda relaksacije, kao i usled nekih oboljenja unutrašnjeg uva. Na slici 9.21 prikazan je jedan rezultat ispitivanja prosečne, dakle prirodne promene granice čujnosti sa godinama starosti. Krive pokazuju prosečan položaj granice čujnosti kod ljudi starosti od 40 do 70 godina. Prikazane su prosečne krive dobijene kao rezultat statističke obrade rezultata snimljenih na velikom broju subjekata. Sa slike se vidi da pojava trajnog pomeranja granice čujnosti praktično znači sužavanje čujnog opsega u oblasti nižih nivoa zvuka. Percepcija najviših frekvencija tada je moguća tek pri visokim nivoima zvučne pobude. U literaturi se može naći nekoliko ovakvih dijagrama dobijenih merenjem u različitim sredinama koji se u manjoj meri razlikuju, ali je njihova suština ista.



Slika 9.20 - Porast granice čujnosti izmeren 30 sekundi nakon što je čulo sluha bilo izloženo dejstvu belog šuma nivoa 115 dB u trajanju od 20 minuta



Slika 9.21 - Prosečne promene granice čujnosti sa godinama. (parametar na dijagramu je godina starosti)

Dijagram sa slike 9.21 pokazuje da sa nastalim promenama percepcija tiših zvukova postaje ograničena i da gubitak osetljivosti čula sluha ne ugrožava percepciju jačih zvukova. Takve promene se najlakše detektuju smanjenjem razumljivosti govora. Naime, u govoru konsonanti imaju relativno malu energiju, pa se promene granice čujnosti prvo manifestuju težim prijemom takvih glasova. U strukturi govora konsonanti nose razumljivost izgovorene reči, pa pomeranje granice čujnosti naviše donosi ugrožavanje njihovog prijema. Istovremeno vokali u govoru nose relativno veliku energiju, pa govor ostaje i dalje glasan, samo sa poremećajem percepiranog smisla.

9.2 Prostorne karakteristike čula sluha

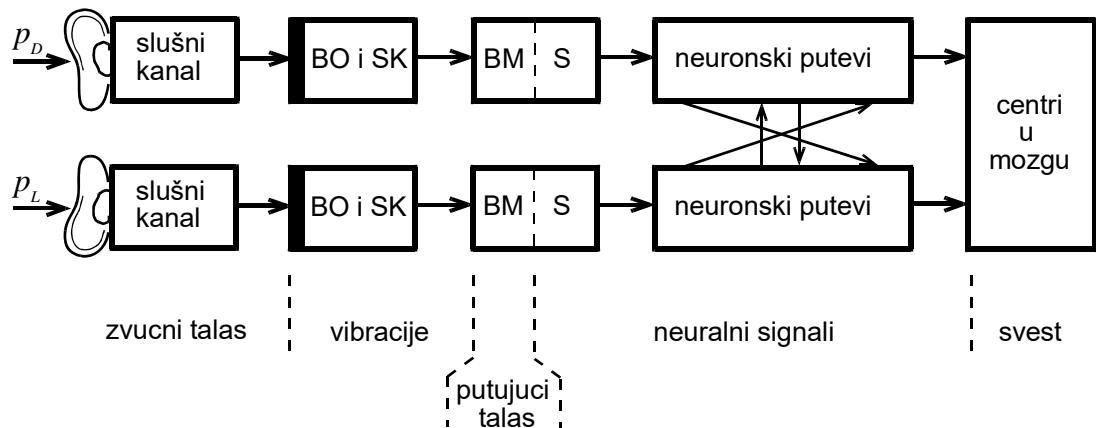
Čulo sluha je prijemnik prilagođen trodimenzionalnom zvučnom polju u kome se čovek kreće. Njega čine dva fizički razdvojena senzora: levo i desno uvo. Mehanizam percepcije sa dva uva naziva se binauralno slušanje. Takav sistem omogućava percepciju prostornih atributa zvučnog polja. Zbog toga se rad čula sluha, osim osetljivošću u domenu intenziteta zvučne pobude, opisuje i u domenu prostornih koordinata nailaska zvučne pobude.

Blok-šema čula sluha

Da bi se lakše razumele pojave koje utiču na složenost procesa slušanja, na slici 9.22 prikazana je pojednostavljena blok-šema čula sluha. Ono se sastoji od dva prostorno razdvojena prijemnika: levog i desnog uva. Uši su postavljene sa suprotnih strana glave, koja predstavlja simetričnu fizičku prepreku između njih. Prostorna razdvojenost ušiju čini da postoje razlike između zvučnih pritisaka $p_L(t)$ i $p_D(t)$ koji deluju na levo i desno uvo.

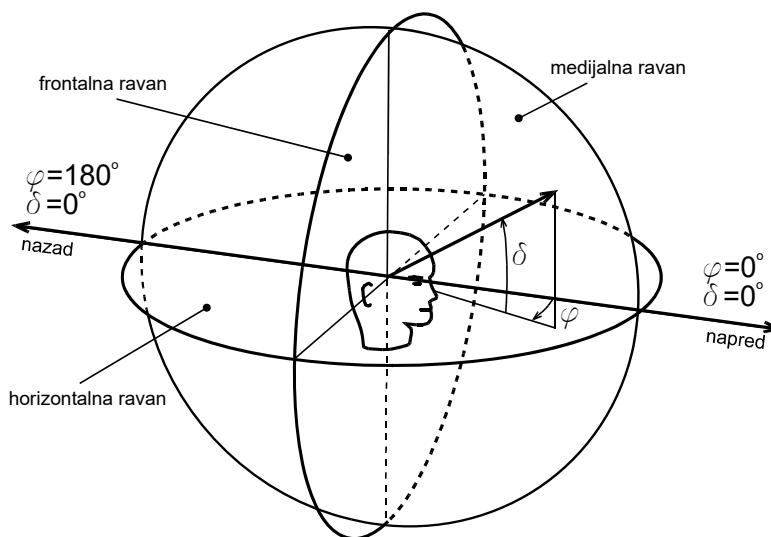
Na svom putu od spoljašnje sredine do centara u mozgu zvučni signal menja fizičke oblike. Kroz spoljašnje uvo signal je zvučni talas koji se prostire kroz vazduh, nastavlja u obliku mehaničkih vibracija bubne opne (BO) i slušnih koščica (SK), duž bazilarne membrane (BM) signal se prostire u vidu mehaničkog („putujućeg“) talasa i najzad poprima oblik neuralnih električnih signala u senzorskim ćelijama (S) i duž neuronskih puteva. Na nivou neuronskih puteva javlja se pojava međusobnih uticaja signala iz levog i desnog uva, što je na šemi simbolički označeno strelicama. Pristigne informacije obrađuju se u moždanim centrima gde se od dva signala formira jedinstvena zvučna slika. Prikazana šema ne obuhvata puteve povratnih sprega koji postoje između nekih delova sistema (na primer, pojava povratne sprege koja iz centra u mozgu deluje na srednje uvo radi zaštite od zvukova visokih nivoa).

Svaka faza prenosa signala sa slike 9.22 ima svoje karakteristike koje utiču na ukupne osobine čula sluha. Priroda fizičkih procesa prenosa je takva da sve te faze karakteriše neka specifična frekvencijska nelinearnost. Te nelinearnosti čine razliku između pobude koja deluje na senzore u unutrašnjem uvu slušaoca i pobude koja bi delovala na membranu mikrofona kada bi se postavio na isto mesto u prostoru.



Slika 9.22 - Opšta blok-šema uprošćenog prikaza procesa koji se odvijaju u čulu sluha pri zvučnoj pobudi; označke na slici su: BO – bubna opna, SK – slušne koščice, BM – bazilarna membrana, S – senzori.

Rad čula sluha odvija se u trodimenzionalnom prostoru u kome se svakom pojedinačnom fizičkom nadražaju može definisati pravac nailaska zvučnog talasa na glavu slušaoca. Za definisanje prostornih dimenzija percepције zvuka uvodi se koordinatni sistem glave kakav je prikazan na slici 9.23. Označeni su svi relevantni geometrijski pojmovi pomoću kojih se definišu pozicije zvučnih izvora u odnosu na slušaoca. Forma glave i njena pozicija u prostoru definišu horizontalnu, medijalnu i frontalnu ravan, kao i pravac napred-nazad. Svaki mogući pravac i smer nailaska zvučnog talasa na glavu slušaoca definiše se azimutom φ i elevacijom δ . Koordinatni sistem sa slike 9.23 vezan je za glavu i kreće se zajedno s njom.



Slika 9.23 - Prostorni koordinatni sistem glave u kome se odvija percepција zvuka

Zahvaljujući binauralnom slušanju čulo sluha ima mogućnost da odredi prostorne atribute zvučnih pojava. To pre svega podrazumeva sposobnost da se sa izvesnom

tačnošću odredi pravac iz koga zvučni talas nailazi na glavu slušaoca. Informacije o prostoru kodovane su razlikama koje postoje između pritisaka $p_L(t)$ i $p_D(t)$ na levom i desnom uvu. Ova dva pritiska potpuno su jednaka samo u slučaju kada ravanski talas u slobodnom polju nailazi na slušaoca u medijalnoj ravni ($\varphi=0$). U svim drugim slučajevima između ova dva signala postoje manje ili veće razlike.

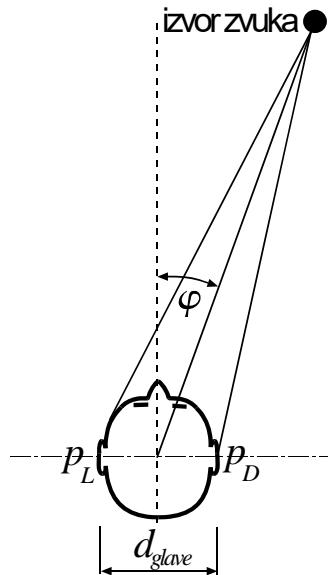
Glava u zvučnom polju

Razlike između signala zvučnog pritiska na levom i desnom uvu posledica su činjenice da su dva uva razmaknuta u prostoru i da glava predstavlja fizičku prepreku koja svojim prisustvom menja strukturu zvučnog polja oko nje. Ova pojava se može jednostavno ilustrovati na primeru masivne kugle koji je ranije prikazan na slici 7.9. Pojava principijelno opisana na primeru kugle dešava se i na glavi slušaoca kada se ona nađe na putu zvučnog talasa. Postoji strana bliža izvoru zvuka, na kojoj se superponiraju direktni i reflektovani talasi, i strana u zvučnoj senci. Razlike u odnosu na krive sa slike javljaju se kao posledica razlika u formi između idealne kugle i realne glave. Ušna školjka je takođe jedna fizička prepreka koja svojom složenom geometrijom u oblasti viših frekvencija dodatno utiče na stanje u zvučnom polju. Frekvencijska oblast uticaja ušne školjke određena je njenim dimenzijama i dimenzijama delova njenog reljefa. Najzad, izvestan uticaj na strukturu zvučnog polja ima i torzo slušaoca zbog pojave refleksija, pre svega od ramena. Svi ti uticaji zajedno stvaraju razlike između signala $p_L(t)$ i $p_D(t)$, a izraženost razlika zavisi od pravca nailaska zvuka na glavu (definisan sa φ i δ označeni na slici 9.23). Na osnovu tih razlika centri u mozgu detektuju pravac iz koga nailazi zvučni talas. Isti mehanizam omogućava da se u složenom zvučnom polju, na primer u prostorijama, primećuju razlike između različitih prostornih struktura polja.

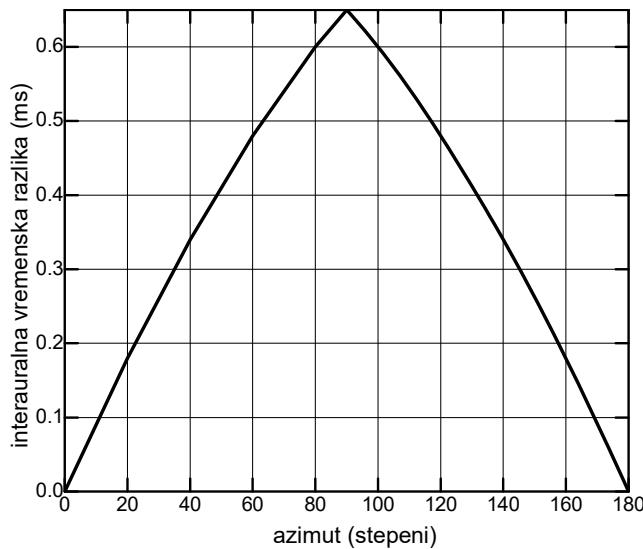
Mehanizam određivanja pravca nailaska zvuka – dupleks teorija

Kada zvuk nailazi iz pravca određenog nekim azimutom φ uvode se pojmovi bližeg i daljeg uva. Razlike između signala na njima javljaju se u vremenskom domenu i u domenu nivoa zvuka. Zbog činjenice da se mehanizam prostorne percepcije čula sluga zasniva na razlikama u ta dva različita domena, u literaturi se objašnjenje mehanizma određivanja pravca nailaska zvuka naziva „dupleks teorija“.

Vremenske razlike u signalima na bližem i daljem uvu nazivaju se interauralno kašnjenje. Kada je azimut pravca iz koga nailazi zvučni talas različit od nule, zvuk stiže do bližeg uva nešto ranije nego do daljeg uva zbog njihovog međusobnog rastojanja d_{gl} , što je šematski prikazano na slici 9.24. Za prosečne dimenzije glave zavisnost interauralnog kašnjenja u funkciji azimuta prikazana je dijagramom na slici 9.25. Vremenska razlika koja tako nastaje najveća je za azimut 90° , i za prosečnu glavu ona je oko 0,6 ms. Iako mala, ova razlika je dovoljna da se pod određenim okolnostima formira svesti o pravcu iz koga je naišao zvučni talas.



Slika 9.24 – Geometrija glave relevantna za razliku zvučnih pritisaka na levom i desnom uvu



Slika 9.25 Zavisnost interauralnog kašnjenja od veličine azimuta za prosečnu veličinu glave

Na frekvencijama gde je trajanje periode veće od interauralnog kašnjenja fazna razlika koja se javlja između signala na levom i desnom uvu jednoznačno je korelisana sa azimutom pravca nailaska zvučnog talasa, što daje dovoljno informacija za određivanje pravca iz koga nailazi zvučni talas. Međutim, s porastom frekvencije, kada trajanje periode signala postane manje od interauralnog kašnjenja, u procesiranju vremenske razlike nastaje konfuzija jer različita kašnjenja mogu dati istu faznu razliku. Ta granica je u oblasti oko 1 kHz ili nešto niže (što zavisi od prečnika glave d_g), pa na višim frekvencijama interauralna vremenska razlika nema značaja za određivanje pravca.

Na višim frekvencijama glava postaje prepreka koja je poredljiva ili veća od talasnih dužina. Zbog difrakcionih pojava tada se javljaju razlike između nivoa zvuka na bližem i daljem uvu (kao za slučaj kugle prikazan na slici 7.10). Stanje pobude na bližem i daljem uvu opisuje se veličinom koja se u literaturi naziva funkcija prenosa glave (*head related transfer function* – HRTF). Po svojoj definiciji, HRTF pokazuje promene u nivou zvuka na

ulazu u slušni kanal u odnosu na stanje koje postoji u zvučnom polju kada slušalac nije prisutan. HRTF se, po potrebi, prikazuje i u vremenskom domenu kao impulsni odziv. Za svaki definisani pravac nailaska pobude to su dva impulsna odziva ili dve funkcije prenosa registrovane na poziciji bližeg i daljeg uva. Kada se prikazuje u vremenskom domenu koristi se skraćenica HRIR (*head related impulse response*). Informacije o HRTF prave se kao banke impulsnih odziva snimljenih za različite vrednosti azimuta i elevacije.

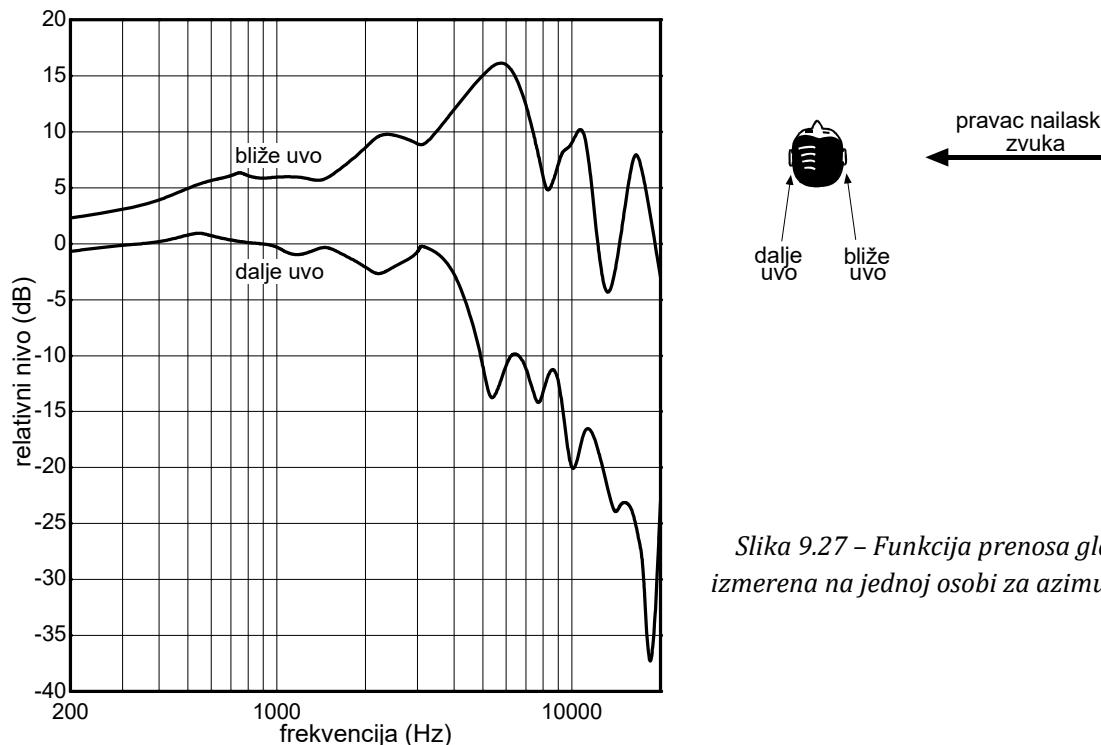
Pošto se u uobičajenim okolnostima slušanja zvučni izvori i slušalac po pravilu nalaze u horizontalnoj ravni, HRTF se najčešće prikazuje kao banka parova odziva snimljenih u malim koracima azimuta, najčešće 10° . Dobijaju se merenjem u anehoičnoj prostoriji uz menjanje pozicije izvora zvuka po krugu oko slušaoca. Oblik funkcije prenosa glave zavisi od azimuta i elevacije pod kojim nailazi zvučni talas. Za svaku vrednost ovih uglova funkcija prenosa ima drugačiji oblik. Funkcije prenosa glave se snimaju pomoću sistema sa dva mikrofona koji su postavljeni na veštačkoj glavi. Veštačka glava u fizičkom smislu zamenjuje slušaoca u zvučnom polju. To je uređaj koji se izrađuje od tvrde gume ili sličnih materijala, i u geometrijskom smislu ima sve attribute glave. Unutar veštačke glave na poziciji ušiju nalaze se mikrofoni čiji izlazni signali odslikavaju zvučne pritiske koji deluju na levo i desno uvo. Za snimanje HRTF koriste se takođe i minijaturni mikrofoni koji se postavljaju u ušne kanale, na način kao što se radi sa minijatirnim slušalicama. Oba ova načina su prikazana na slici 9.26.



Slika 9.26 – Veštačka glava (levo) i binauralni mikrofoni (desno)

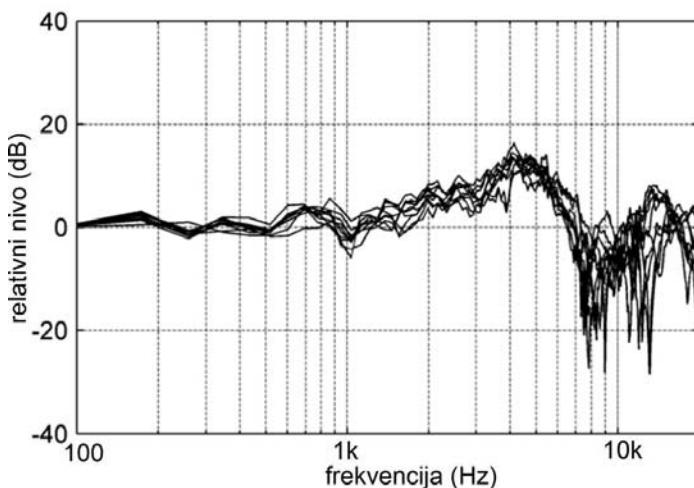
Kao ilustracija na slici 9.27 prikazan je izgled HRTF jedne osobe snimljen u horizontalnoj ravni za azimut 90° . Sabiranje direktnog i reflektovanog zvuka na bližem uvu i zvučna senka na daljem uvu čine da je kriva funkcija prenosa bližeg uva uvek iznad krive funkcije daljeg uva. Posmatranjem dijagrama sa slike može se zaključiti da glava u zvučnom polju deluje kao jedno promenljivo filtersko kolo.

Fluktuacije koje se vide u toku krivih posledica su raznih talasnih pojava koje nastaju koherentnim superponiranjem refleksija od pojedinih delova glave i energije koja oko glave prolazi različitim putevima. Postoje individualne razlike u oblicima HRTF kod raznih osoba. One su posledica razlika u veličini i obliku glava i razlika u dimenzijama bitnih fizičkih detalja na glavi. Zbog toga svaka osoba ima svoj specifičan oblik HRTF na koje je njen čulo sluha prilagođeno.



Slika 9.27 – Funkcija prenosa glave izmerena na jednoj osobi za azimut 90°

Zbog talasnih pojava koje se dešavaju na površini glave, čak i za azimut 0° , a to znači kada zvuk nailazi u pravcu ose glave, funkcija prenosa nije linearна. Na slici 9.28 prikazane su izmerene HRTF pri azimutu 0° za deset različitih osoba. Na slici se vidi karakteristična nelinearnost za slučaj kada se sluša izvor zvuka koji se nalazi u pravcu ose slušaoca, ali je uočljivo i rasturanje rezultata ovih subjekata usled individualnih razlika među njima u dimenzijama i obliku detalja glave.



Slika 9.28 – Snimljene HRTF deset različitih osoba pri azimutu 0°

9.3. Rad uva pri kompleksnoj zvučnoj pobudi

Sve što je do sada prikazano o ponašanju bazilarne membrane i efektima koje to ima na proces slušanja odnosilo se samo na pobude čistim sinusnim tonovima. Kada na uvo deluju zvukovi kompleksnog spektralnog sadržaja i složene vremenske strukture, kao što su govor, muzika ili šumovi iz okruženja, vibracioni odziv bazilarne membrane postaje mnogo složeniji od onog što je prikazano na slikama 9.11 i 9.12. Tada dolazi do međusobnih interakcija pobuda koje deluju na bliske delove bazilarne membrane, što čini da je proces percepcije kompleksnih zvukova složeniji.

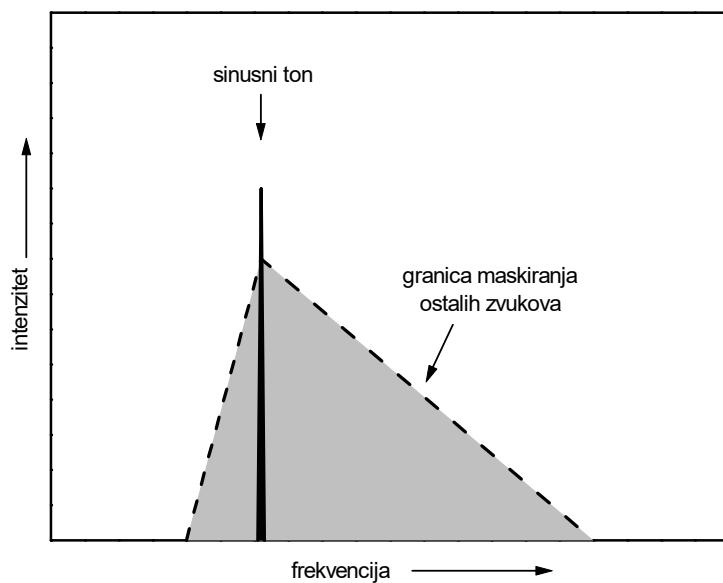
Najznačajnija pojava pri pobudi kompleksnim zvukovima jeste maskiranje. Maskiranje je pojava da čulo sluha ne može registrovati neki zvučni nadražaj zbog toga što istovremeno u uvo stiže neki drugi, konkurenčki zvuk koji ga na izvestan način „maskira“. Konkurenčija zvukova na membrani može biti između različitih spektralnih komponenti zvuka koje dolazi iz istog izvora, ili između zvukova koji potiču od različitih izvora (međusobno „rivalstvo“ zvukova treba posmatrati sa aspekta njihovog dejstva na bazilarnu membranu). Pojava maskiranja može se javiti zbog bliskosti maskirajućeg i maskiranog zvuka na skali frekvencija (frekvencijsko maskiranje) i zbog međusobne blizine po vremenu nailaska (vremensko maskiranje).

Frekvencijsko maskiranje

Frekvencijsko maskiranje je pojava da pri dejstvu jednog zvuka bilo koje frekvencije postoji jedna šira oblast bazilarne membrane koja će pri tome biti pobuđena na oscilovanje. Ovaj efekat je principijelno definisan obvojnicama sa slike 9.12, gde se vidi da pobuda bazilarne membrane zvukom jedne frekvencije podrazumeva vibracije na membrani u širokoj zoni oko njene rezonance. Neki drugi zvuk koji bi se istovremeno pojavio na susednim frekvencijama može biti percipiran samo ako pobudi membranu vibracijama koje su veće od već postojećih. Ako je intenzitet pobude tim drugim zvukom ispod postojećeg stanja vibracija membrane, on je za čulo sluha nečujan.

Frekvencijsko maskiranje principijelni se opisuje krivom čiji je oblik prikazan na slici 9.29. U prisustvu pobude sinusnim tonom nekog intenziteta, koji je na dijagramu označen debelom vertikalnom linijom, uvo ne može registrovati druge zvučne komponente koje se nalaze ispod ucrtane granice maskiranja. To znači da su zbog delovanja prisutnog tona svi zvukovi koji se na slici nalaze unutar šrafirane oblasti privremeno nečujni, iako fizički postoje jer bazilarna membrana u toj zoni frekvencija već osciluje nekim intenzitetom.

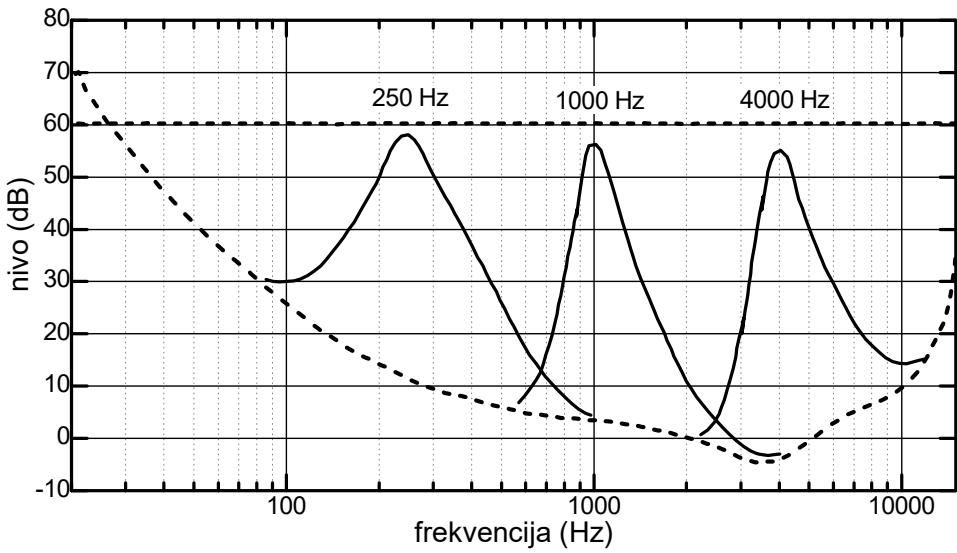
Kriva maskiranja svojim oblikom nije simetrična u odnosu na položaj frekvencije maskirajućeg tona. Ona je šira prema visokim frekvencijama i može se reći da, teorijski gledano, opada sve do najviših čujnih frekvencija. To je posledica činjenice da zvučna pobuda kada dospeva u unutrašnje uvo uvek pobuđuje zonu najviših frekvencija bez obzira na frekvenciju pobude. Oblik krive maskiranja menja se u izvesnoj meri u zavisnosti od frekvencije maskirajućeg tona i njegovog intenziteta, ali uvek zadržava asimetričan izgled prikazan na slici 9.29. Asimetrija je nešto izraženija pri pobudi najnižim čujnim frekvencijama.



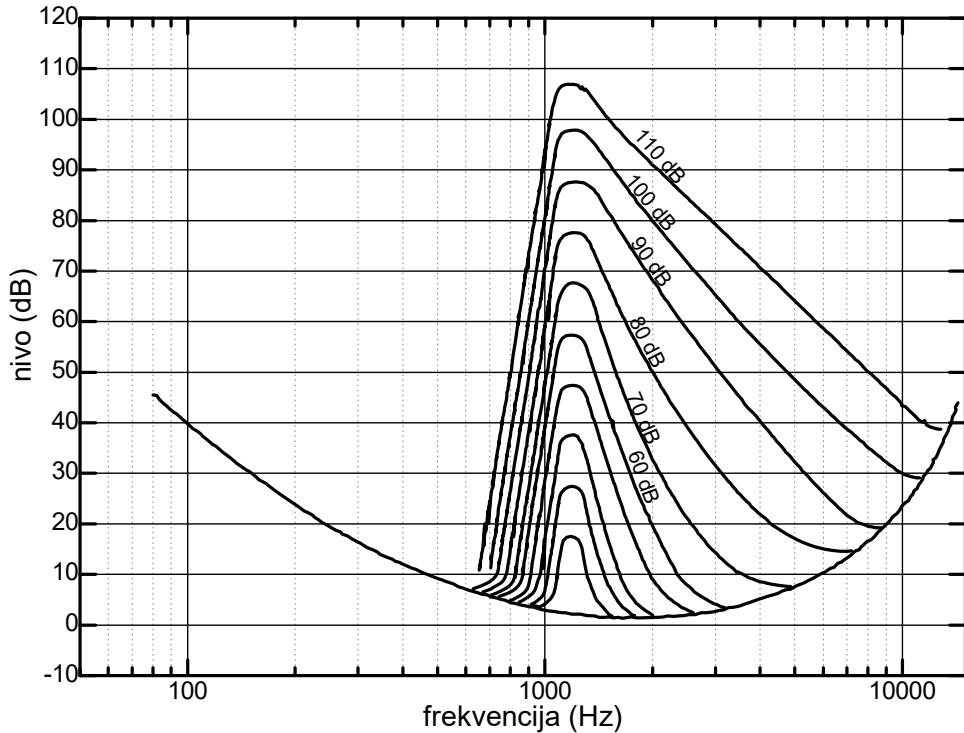
Slika 9.29 Principijelni izgled oblike krive frekvencijskog maskiranja

Realan izgled krive maskiranja pri pobudi čistim sinusnim tonom pri nivou pobude 60 dB na tri različite frekvencije (250 Hz, 1000 Hz i 4000 Hz) prikazan je na slici 9.30. Vidi se sličnost sa principijelnim izgledom sa slike 9.29. Pojava frekvencijskog maskiranja može se shvatiti kao specifična deformacija granice čujnosti, jer ono podrazumeva pomeranje granice čujnosti naviše u zoni oko pobudne frekvencije. Pri tome nesimetrija je izraženija na niskim frekvencijama.

Na slici 9.31 prikazana je familija krivih maskiranja pri pobudi jednim sinusnim tonom frekvencije 1200 Hz, ali sa različitim pobudnim nivoima od 20 dB do 110 dB. Na ovom dijagramu se jasnije vidi da maskiranje u svojoj suštini predstavlja privremeno pomeranje granice čujnosti. Pri najvišim nivoima pobude kriva maskiranja zahvata oblast sve do najviših čujnih frekvencija. Pošto pobuda bazilarne membrane, bez obzira na pobudnu frekvenciju, uvek dolazi preko zone gde su njene rezonance za najviše frekvencije, krive maskiranja pri višim nivoima zvuka zahvataju opseg čak do 20 kHz.



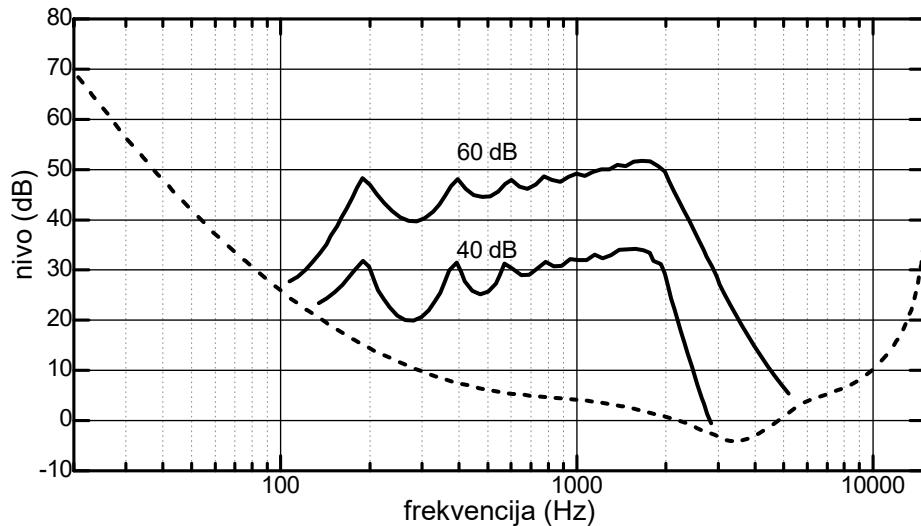
Slika 9.30 - Realne krive maskiranja u prisustvu maskirajućeg zvuka nivoa 60 dB za tri različite pobudne frekvencije



Slika 9.31 – Krive maskiranja pri pobudi sinusnim tonom 1200 Hz različitih nivoa od 20 dB do 110 dB

Krve maskiranja prikazane na slikama 9.30 i 9.31 pokazuju stanje pri pobudi jednim sinusnim tonom. Međutim, realni zvukovi uvek imaju kompleksan spektar, pa i pojava maskiranja podrazumeva složeniju strukturu krive. Kao ilustracija takvog slučaja na slici 9.32 prikazane su krive maskiranja koje se javljaju pri pobudi jednim muzičkim tonom koji sadrži osnovnu frekvenciju i više harmonike relativno velikih amplituda. Vidi se da

jedan muzički ton zbog svog spektralnog sadržaja unosi maskiranje u širem opsegu iznad svoje osnovne frekvencije.



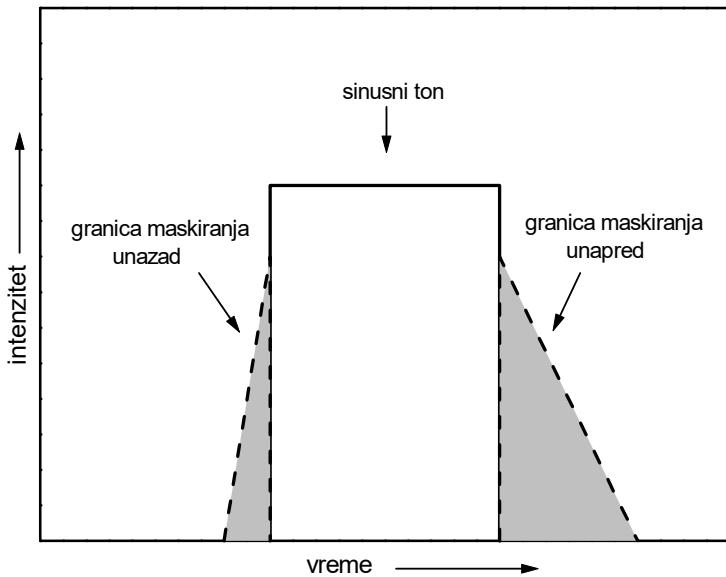
Slika 9.32 – Krive maskiranja pri pobudi jednim tonom koji sadrži više harmonike za pobudne nivoe 40 dB i 60 dB.

Vremensko maskiranje

Vremensko maskiranje podrazumeva da pri pobudi čula sluha nekim zvučnim stimulusom postoji izvestan period na vremenskoj osi pre i posle njegovog delovanja u kome drugi zvukovi ne mogu biti registrovani ako nemaju dovoljan intenzitet. Na slici 9.33 šematski je prikazan princip vremenskog maskiranja. Aktiviranje mehanizma čula sluha pri nailasku zvučne pobude stvara uslove da ono postaje neosetljivo na druge, slabije stimuluse koji su na vremenskoj osi naišli neposredno pre ili neposredno posle te pobude. Posebno je zanimljivo da se efekat maskiranja javlja i pre i posle maskirajućeg zvuka, što se naziva maskiranje unapred i maskiranje unazad.

Pojava maskiranja nakon prestanka pobude, označena kao maskiranje unapred, može se objasniti činjenicom da je nakon prestanka zvučne pobude potrebno izvesno vreme da se oscilacije bazilarne membrane smire, što se može shvatiti kao reverberacija uv). Da bi neka nova pobuda bila registrovana ona mora biti jača od trenutnog stanja vibracija bazilarne membrane u procesu smirivanja. Trajanje smirivanja oscilacija zavisi od intenziteta prethodne pobude i može biti reda veličine desetina milisekundi.

Pojava maskiranja unazad znači da dolazi do ometanja percepcije zvuka koji je u uvo stigao ranije, ako on nije bio dovoljnog intenziteta da se na putu do centara u mozgu „izbori“ s nadražajem koji je stigao nešto kasnije, ali je znatno jači. Ova pojava je posledica postojanja mehanizama delovanja „unapred“ u domenu neuronskih puteva, kao što je prikazano na blok-šemi sa slike 9.22. Na tom putu do mozga dolazi do „preticanja“ informacija. Interval u kome se javlja ova vrsta maskiranja reda je veličine nekoliko milisekundi.

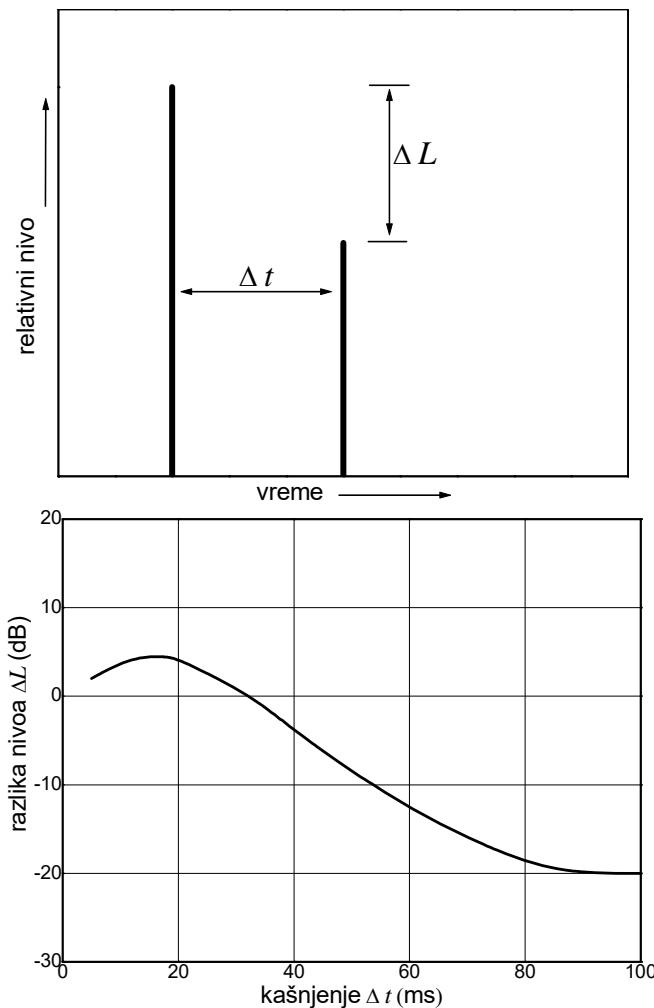


Slika 9.33 - Principijelni izgled oblika krive vremenskog maskiranja

Efekat prvenstva

Najjednostavniji slučaj kompleksnog zvučnog događaja javlja se u okolnostima kada dva koherentna signala istovremeno nailaze na slušaoca. To je slučaj koji se javlja kada iz jednog izvora do slušaoca pored direktnog zvuka dolazi i jaka refleksija od neke prepreke ili kada zvuk dolazi iz dva zvučnika razdvojena u prostoru koji emituju isti signal. Pojava dva koherentna signala na mestu slušaoca može se fizički opisati impulsnim odzivom koji je prikazan na slici 9.34. U odzivu se vidi da postoje dve nezavisne komponente. U opštem slučaju druga komponenta može kasniti u odnosu na prvu za interval vremena Δt , a njen nivo može se razlikovati od nivoa prve komponente za ΔL .

Auditorni događaj koji nastaje pri takvoj zvučnoj pobudi zavisi od detalja strukture impulsnog odziva. Ako veličine Δt i ΔL svojim vrednostima zadovoljavaju izvesne uslove, tada slušalac u zvučnoj slici konstatuje samo jedan auditorni događaj i njega određuje prva pristigla komponenta, bez obzira na to što iza nje fizički stiže još jedna ista takva, a to znači koherentna komponenta. Osobina čula sluha da pod određenim okolnostima percepciju složenih zvučnih događaja određuje samo komponenta pobude koja do uva stiže prva naziva se efekat prvenstva (*precedence effect*). U starijoj akustičkoj literaturi ova osobina je nazivana „zakon prvog talasnog fronta“, a u literaturi iz domena audio tehnologije ista osobina je nazivana „Hasov efekat“ (po istraživaču čije je ime Haas, i koji je tu pojavu prvi kvantifikovao za okolnost percepcije govornog signala). Ako veličine Δt i ΔL svojim vrednostima ne zadovoljavaju te uslove dve komponente odziva će stvoriti u zvučnoj slici dva nezavisna auditorna događaja. Ako su dve komponente dovoljno bliske u vremenu takva pojava se naziva „dupli zvuk“, a ako je vremenski razmak među njima duži, pojava se označava kao echo.



Slika 9.34 - Ilustracija efekta prvenstva: principijelna skica impulsnog odziva (gore) i granica eha (dole). Prikazana kriva dobijena je za slučaj govora

Koje uslove treba da zadovolje Δt i ΔL da bi se one usled efekta prvenstva stopile u jedan auditorni događaj ili bi se percepisale kao dva nezavisna događaja zavisi od vrste zvuka i pravaca iz kojih oni nailaze na slušaoca. Jedna ilustracija uslova koju treba da zadovolje Δt i ΔL da bi se ispoljio efekat prvenstva prikazana je dijagramom koji je takođe prikazan na slici 9.34. Dijagram je dobijen za slučaj govornog signala reprodukovanih iz dva zvučnika smeštena u prednjoj zoni ispred slušaoca, pri čemu se u signal jednog od zvučnika uvode kašnjenje Δt i slabljenje ΔL . Prikazana kriva definiše granicu dva moguća ishoda percepције. Ako je kombinacija relativnog kašnjenja i relativnog slabljenja na dijagramu ispod krive, slušalac u zvučnoj slici primećuje samo zvuk koji stiže prvi i registruje jedan auditorni događaj. Slušalac tada ima osećaj da mu zvuk dolazi iz izvora čiji zvuk stiže prvi. Ako je kombinacija relativnog kašnjenja i relativnog slabljenja iznad krive, slušalac tada čuje obe komponente kao dva nezavisna auditorna događaja od kojih drugi kasni u vremenu, i doživljava ga kao echo. Kriva granice dve vrste percepције u izvesnoj meri će se razlikovati u odnosu na krivu sa slike 9.34, kada dva zvučna izvora menjaju svoj relativni položaj u prostoru ili kada se umesto govora reproducuje neka druga vrsta zvučnog signala.

Efekat prvenstva ne znači da će auditorni događaj biti sasvim jednak onome koji se dobija kada nema zakasnele komponente. Iako se druga komponenta odziva ne percepira kao nezavisan događaj, ona utiče na promenu kvaliteta zvuka. Osnovna pojava je povećanje subjektivnog doživljaja jačine zvuka, jer se na bazilarnoj membrani dejstvo dve komponente energetski sabira. Pored toga prisutan je efekat superponiranja direktnе i zakasnele komponente u frekvencijskom domenu, što utiče na promene spektralnog sadržaja zvučnog događaja (efekat komb filtra).

Efekat prvenstva značajan je za razumevanje rada sistema za ozvučavanje u različitim okolnostima njihove praktične upotrebe. Na primer, kada se za reprodukciju istog signala koristi nekoliko prostorno razdvojenih zvučnika, pa su i rastojanja slušaoca od pojedinih zvučnika različita. Na mestu slušaoca tada se javlja različito kašnjenje i slabljenje signala koji u uvo stižu iz različitih zvučnika. Zvučni talas koji dolazi iz zvučnika najbližeg slušaocu proizvodi prvu komponentu u odzivu sa slike 9.34. Ako zakasnela komponenta iz nekog udaljenijeg zvučnika dovoljno kasni i pri tome ima relativni nivo iznad krive sa slike 9.34, slušalac će to doživljavati kao nezavisan auditorni događaj, to jest kao čujan echo. Ako se kašnjenje ili relativni nivo smanje tako da refleksija bude ispod krive sa dijagrama slušalac neće primećivati postojanje drugog zvučnika, već samo onog najbližeg. Iz zakonitosti prikazane dijagramom sa slike 9.34 izvedene su neke preporuke za postavljanje zvučnika u prostoru, na primer pri ozvučavanju šetališta.

9.4. Osnovni pojmovi psihoakustike

U inženjerskoj praksi prisutna je spontana potreba da se rad čula sluha predstavlja nekim jednostavnim i lako razumljivim modelima preuzetim iz drugih tehničkih oblasti. Pošto je spektralna analiza deo svakodnevnog inženjerskog iskustva uobičajeno je da se rad čula sluha, kao na primer doživljaj visine zvuka, opisuje jednostavnim modelom spektralnog analizatora. Ovakav pojednostavljen model samo delimično i samo u ograničenim uslovima pobude može biti indikator za ocenu kvaliteta prijema zvučnih informacija. Osim kompleksnosti pojave na bazilarnoj membrani opisanih ranije, ono što čini razliku između rada čula sluha i spektralnog analizatora jeste kompleksno procesiranje u moždanim centrima. Ti procesi se ne mogu opisati jednostavnim linearnim modelima sistema prenosa. Pojednostavljen se može reći da proces slušanja sadrži, između ostalog, elemente stohastike, fazi logike, povratne sprege na raznim nivoima, a postoje i neki sasvim neegzaktni elementi koji utiču na rezultat tog procesa, poput estetskih shvatanja, pa i raspoloženja slušaoca.

Doživljaj visine zvuka – teorija položaja

Doživljaj visine zvuka nastaje preslikavanjem frekvencijskog sadržaja pobude iz fizičkog prostora zvučnog polja u subjektivni prostor auditornih događaja. Doživljaj visine tona definiše se na skali „viši - niži“, gde su raspoređeni svi mogući doživljaji stimulusa, od najdubljeg do najvišeg. Više vrednosti frekvencija pobude stvaraju osećaj veće visine zvuka, i obrnuto.

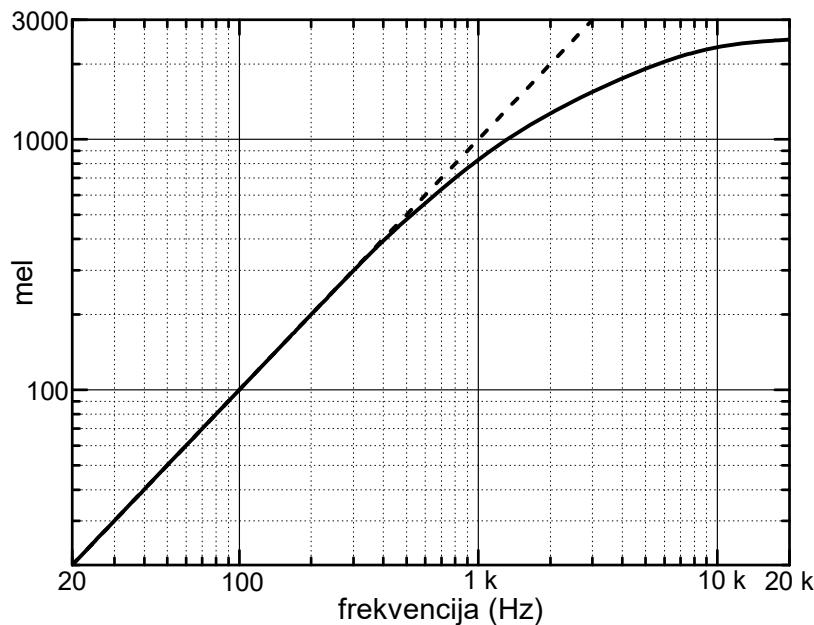
Opseg percepcije na skali visine i rezolucija koja se pri tome postiže dominantno su određeni osobinama unutrašnjeg uva. Prikaz reakcije bazilarne membrane na zvučnu pobudu sa slike 9.10 objašnjava da pri pobudi tonom jedne frekvencije postoji reakcija svih senzorskih ćelija od početka membrane do zone u kojoj se javlja rezonanca, s tim što je na mestu rezonance reakcija senzora najintenzivnija. Ovakav fizički odziv uveo je u objašnjenje percepcije visine zvuka takozvanu teoriju položaja. Pod položajem se podrazumeva mesto maksimuma odziva na bazilarnoj membrani. Za svaku pobudnu frekvenciju postoji jedan lokalizovani maksimum vibracije, pa je doživljaj visine tona određen položajem tog maksimuma. Prema tome, subjektivni doživljaj određuje maksimum oscilovanja bazilarne membrane koje pri tome nastaje. Ako pobudu čine zvukovi koji u sebi sadrže više sinusnih tonova, na skali visine tona moguće je istovremeno zapažati prisustvo najviše 5-6 različitih visina, bez obzira na njihovo rastojanje na frekvencijskoj osi. Osobe s takozvanim apsolutnim sluhom mogu da raspozna istovremeno prisustvo nešto većeg broja čistih tonova.

Skala visine tona - Mel skala

Iako je doživljaj visine zvuka subjektiva kategorija, postoji potreba da se ustanovi neka numerička skala na kojoj bi se izražavao intenzitet subjektivnog doživljaja visine tona. Jedan uobičajeni postupak analize rada čula sluha je naizmenično slušanje dva signala, pri čemu jedan služi kao referentni, a drugi se podešava prema nekom unapred postavljenom zahtevu. Takav eksperimentalni postupak može se primeniti i za upoređivanje subjektivnog doživljaja visine pri slušanju tonova. Na primer, slušaocu se pušta ton odabrane frekvencije f_1 , a naporedo mu se omogućava da sluša drugi ton, na primer niže frekvencije f_2 , pri čemu tu drugu frekvenciju može samostalno da podešava. Zadatak koji objašnjava mehanizam percepcije doživljaja visine tona je da u takvom eksperimentu menjajući frekvenciju f_2 slušalac podesi visinu tog tona tako da ga doživljava kao dvostruko nižu od referentnog. U takvom eksperimentalnom postupku na nižim frekvencijama se dobija da odnos frekvencija f_2 i f_1 treba da bude 2:1. To znači da se subjektivni doživljaj dvostruko nižeg tona dobija pri smanjenju frekvencije na polovinu. Na primer, ako se sluša frekvencija 440 Hz, subjektivno dvostruko niži ton imaće frekvenciju 220 Hz. Isti odnos važi i u suprotnom smeru, to jest kada se sluša ton referentne frekvencije i zahteva od slušaoca da podesi frekvenciju drugog tona tako da ga doživljava kao dvostruko viši. Ovakav rezultat je očekivan muzički edukovanim slušaocima, jer odnos 2:1 predstavlja oktavu, koja u muzici ima značaj kao dvostruko niži/viši ton.

Linearna zavisnost u odnosu 2:1 održava se na svim nižim frekvencijama. Međutim, pri višim frekvencijama taj odnos prestaje da bude 2, već se pojavljuju neke drugačije relacije. Na primer, ako se kao referentna frekvencija f_1 posmatra 8 kHz, subjektivno upola niži ton neće biti 4 kHz već oko 1300 Hz. Kao i u svemu drugom vezanom za proces slušanja, u tome postoje stanovalne razlike od osobe do osobe, ali će to kod svakog slušaoca biti negde oko 1300 Hz. Drugim rečima, postoji pojava da će pri frekvencijama iznad 1000 Hz odnos dvostruko viših/nižih tonova biti veći od 2:1.

Opisani eksperiment sa ocenom dvostruko višeg/nižeg tona pokazuje da se subjektivni doživljaj visine menja sa absolutnom vrednošću frekvencije. Zbog toga postoji potreba da se doživljaj visine tona opisuje na nekoj skali koja će biti prilagođena toj nelinearnosti doživljaja, gde će sve vrednosti na skali biti subjektivno na jednakom rastojanju. Tako je za doživljaj visine tone uvedena nova, subjektivna skala, koja se naziva mel skala. Naziv „mel“ dolazi od reči „melody“ čime se ukazuje na činjenicu da je skala formirana na osnovu poređenja doživljaja visine tona, a ne obektivnim merenjem frekvencije. Na slici 9.35 prikazan je dijagram kojim je definisan odnos skale frekvencija u Hz i skale subjektivne visine tona u melima (mel skala). Vidi se da na nižim frekvencijama postoji linearna zavisnost, dok na višim frekvencijama kriva odstupa od linearnosti.

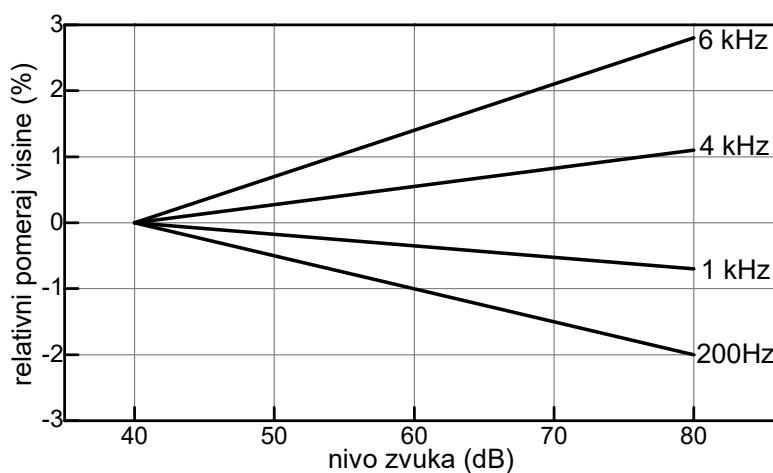


Slika 9.35 – Dijagram koji definiše odnos skale frekvencije i mel skale

Pošto je konstrukcija mel skale bazirana na subjektivom doživljaju, bilo je nužno da se konvencijom utvrdi neka referentna tačka na skali frekvencija u odnosu na koju se određuju sve druge vrednosti. Pri tome je pogodno da ta referentna tačka bude na nižim frekvencijama gde je odnos frekvencije i subjektivnog doživljaja linearan, a to znači do 500 Hz. Konvencijom je kao referentna frekvencija odabрано 125 Hz. Na niskim frekvencijama se objektivna skala u Hz i subjektivna skala u melima poklapaju, a na višim frekvencijama, kao što je nagovešteno u eksperimentu, one se razlikuju. Kao ilustracija, polazeći od frekvencije 1300 Hz dvostruko veća vrednost u melima je čak na frekvenciji 8000 Hz, a ne na 2600 Hz. U istoriji ove oblasti akustike definisano je nekoliko skala u melima koje se u izvesnoj meri međusobno razlikuju jer su se autori odlučivali za različite referentne tačke na frekvencijskoj osi, ali to ne menja suštinu. Skala sa slike se najčešće pojavljuje u novijoj literaturi, pa je zato ona odabrana da bude ovde prikazana kao primer mel skale.

Uticaj intenziteta zvuka na doživljaj visine tona

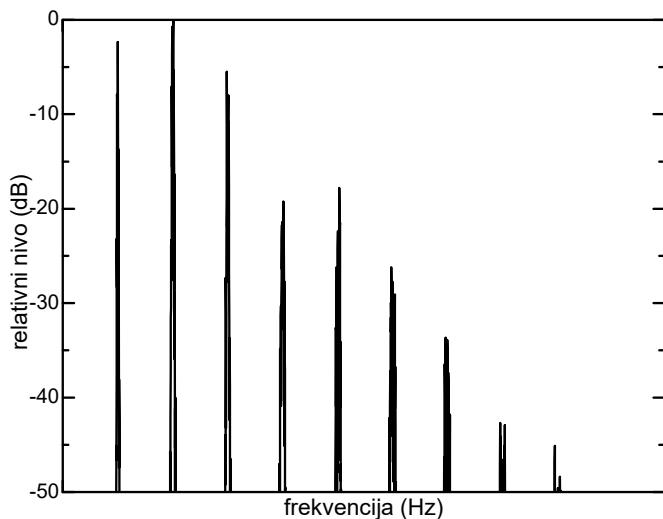
Subjektivni doživljaj visine jednog tona ne zavisi samo od njegove frekvencije, već i od drugih parametara. Jedan od njih je nivo zvučnog pritiska pri kome se sluša, to jest intenzitet pobude uva. Metodom poređenja moguće je utvrditi varijaciju frekvencije koja je potrebna da bi doživljaj visine tona bio isti za sve pobudne nivoe zvuka. Na primer, ako se ton frekvencije 200 Hz sluša sa nivoima 40 dB i 80 dB, pri višem nivou subjektivno će izgledati da je taj ton niži. Međutim, ako se isti eksperiment realizuje sa tonom neke više frekvencije, na primer 6 kHz, pri nivou 80 dB subjektivni doživljaj visine tona će biti viši nego pri nivou 40 dB. Zavisnost visine tona od nivoa zvučne pobude koja deluje na uvo ilustrovana je dijagramom na slici 9.36. Dijagrami su dobijeni usrednjavanjem rezultata testiranja na većem broju subjekata. Vidi se da su u opsegu nivoa od 40 dB do 80 dB varijacije u doživljaju visine tona do 3%.



Slika 9.36 – Dijagram zavisnosti subjektivnog doživljaja visine tona i nivoa pobude

Percepcija visine zvučnih događaja složene spektralne strukture

Kada na uvo deluje neki kompleksan zvuk, teorija položaja nije uvek adekvatno objašnjenje subjektivnog doživljaja njegove visine. Tipičan slučaj kompleksnog zvuka su muzički tonovi koji u sebi, pored signala na osnovnog frekvenciji, uvek sadrže manji ili veći broj harmonijskih komponenti. Pri takvoj pobudi utisak visine tona ne korespondira uvek s položajem maksimalne pobude bazilarne membrane. Auditorni događaj tada se formira složenim procesiranjem na višem nivou u moždanim centrima čula sluha i nije direktno korelisan sa stanjem vibracija na bazilarnoj membrani.

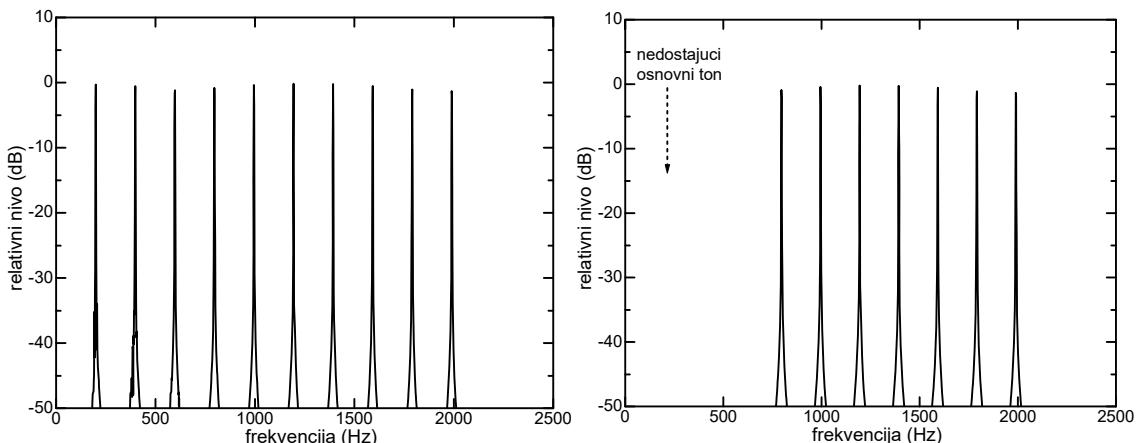


Slika 9.37 – Spektar jednog tona odsiranog na oboi; komponenta osnovnog tona u spektru, koji određuje doživljaj visine, nije najveća po amplitudi, već je to drugi harmonik

Jedan takav primer prikazan je na slici 9.37. To je izmereni spektar jednog tona odsiranog na oboi. Vidi se da harmonijska komponenta na osnovnom tonu nema najveću amplitudu u spektru, što znači da na toj osnovnoj frekvenciji nije najveća vibraciona pobuda bazilarne membrane. Međutim, to ne utiče na subjektivni doživljaj visine kada se taj ton sluša, jer čulo sluha pravilno detektuje kao odsiranog tona kao osnovnu komponentu spektra koja u ovom slučaju nije najjača. Primer oboe pokazuje da u slučaju pobude zvukom koji u sebi sadrži harmonijsku strukturu čulo sluha određuje doživljaj visine procesiranjem frekvencijske strukture spektra, a ne na osnovu intenziteta vibracione pobude bazilarne membrane.

Dobra ilustracija procesiranja koje u složenoj zvučnoj slici određuje utisak visine tona je fenomen takozvanog nedostajućeg osnovnog harmonika, takozvani „nedostajući fundamental“ (*"missing fundamental"*). Ako se slušaocu reprodukuje zvuk nekog muzičkog tona koji u sebi sadrži harmonijski niz, subjektivni doživljaj njegove visine uvek je određen frekvencijom osnovnog harmonika, takozvanog fundamentala. Ilustracija toga je slučaj prikazan na slici 9.38. To je signal u kome su svi harmonici podjednake amplitute, kao što je prikazano na levoj strani slike. Ako se filtriranjem ukloni spektralna komponenta osnovne frekvencije, pa čak i nekoliko narednih harmonijskih komponenti, kao što je prikazano na desnoj strani slike, izmenjen ton će kod slušaoca i dalje stvarati potpuno isti doživljaj visine iako komponenta na toj frekvenciji objektivno fizički ne postoji. Slučalac će pri tome samo registrovati značajnu promenu boje zvuka, ali ne i visine.

Efekat nedostajućeg fundamentala stalno je prisutan pri slušanju muzike reprodukovane malim zvučnicima koji ne mogu da proizvedu niske frekvencije. Kada se preko takvog uređaja reprodukuje, na primer, sviranje kontrabasa sasvim je sigurno da u zvučnom sadržaju koji nastaje nema osnovnih frekvencijskih komponenti njegovog zvuka, već ono što se čuje sadrži samo više harmonike. Međutim, čulo sluha i tada precizno prepoznaće koje tonove svira kontrabas, iako na tim frekvencijama u spektru zvuka koji deluje na uvo nema energije.



Slika 9.38 – Ilustracija efekta nedostajućeg fundamentala: spektri dva tona koji daju subjektivni utisak iste visine – osnovni signal (levo) i isti signal u kome su uklonjene komponente na osnovnoj frekvenciji i prva dva harmonika (desno).

Sličan fenomen se sreće u subjektivnom prepoznavanju visine tona kod nekih crkvenih zvona. Zvono je instrument za koji je karakteristično da spektralne komponente ne stoje u harmonijskom odnosu kao kod klasičnih muzičkih instrumenata. Međutim, kod većih zvona postoji mogućnost da se u spektru njihovog zvuka javljaju dve ili tri spektralne komponente čije su frekvencije u celobrojnom odnosu, na primer, 3:4:5. Čulo sluha će to prepoznati i u zvučnoj slici rekonstruisati osnovni ton koji bi u takvom nizu bio njihov osnovni harmonik. Subjektivni doživljaj visine tona takvog zvona poklapa se sa izračunatom početnom frekvencijom niza, iako na toj frekvenciji u spektru objektivno ne postoji nikakva energija.

Nivo glasnosti

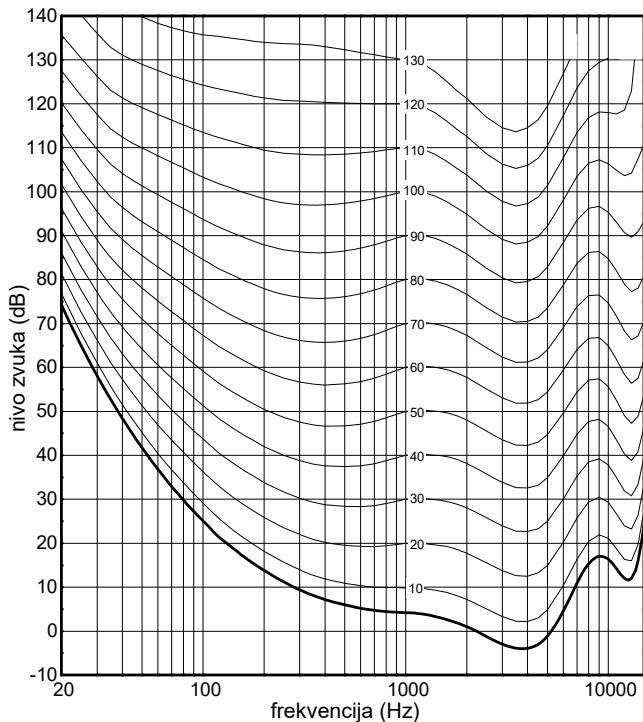
Subjektivni doživljaj jačine zvuka nastaje preslikavanjem intenziteta pobude iz fizičkog prostora zvučnog polja u subjektivni prostor. Kada na uvo deluje čist sinusni ton, subjektivni doživljaj jačine zvuka nije linearna funkcija nivoa zvuka, odnosno intenziteta zvučne pobude. Ta osobina se može naslutiti iz oblika krive granice čujnosti sa slike 9.17, koja pokazuje da je najtiši zvuk koji se još može čuti promenljivog nivoa sa frekvencijom. Takva nelinearnost osetljivosti uslovljena je fizičkim i fiziološkim karakteristikama uva u svim njegovim delovima.

Zbog toga se subjektivni doživljaji jačine čistog sinusnog zvuka jedne frekvencije izražava vrednostima na posebno definisanoj skali. Veličina kojom se izražava subjektivni doživljaj jačine takvog zvuka naziva se nivo subjektivne jačine zvuka ili nivo glasnosti (*loudness level*). Češće se koristi skraćeni naziv jačina zvuka. Za njeno izražavanje u literaturi koriste se oznake Λ ili L_N , a jedinica je *fon*.

Nivo subjektivne jačine zvuka pri slušanju sinusnih tonova utvrđen je eksperimentalno testiranjem na zdravoj populaciji. Na početku je konvencijom usvojeno da se skala nivoa subjektivne jačine zvuka u fonima na frekvenciji 1000 Hz poklapa sa skalom objektivno merenog nivoa zvuka u decibelima koji spolja deluje na uvo. Zbog činjenice da je

izjednačena sa skalom nivoa zvuka, makar to bilo samo na jednoj frekvenciji (1000 Hz), skala u fonima ima odlike logaritamske veličine.

Za tonove čije su frekvencije niže ili više od 1000 Hz podaci o nivou subjektivne jačine zvuka utvrđeni su metodom slušnog poređenja dva zvuka različitih frekvencija: jednog koji je predmet ocene subjektivne jačine i drugog, referentnog, na 1000 Hz. Slušaocima je u takvom testu omogućeno da samostalno podešavaju nivo zvuka koji je predmet ocene i vrše poređenje subjektivnog doživljaja njegove jačine sa referentnim zvukom na 1000 Hz. Cilj testa je da slušalac podesi nivo tona koji sluša tako da taj ton i referentni ton na 1000 Hz budu subjektivno iste jačine, što znači da odgovaraju istom broju fona. Sukcesivnim ponavljanjem ovakve procedure za razne frekvencije i ucrtavanjem rezultata u dijagram oblasti čujnosti dobija se linija iste subjektivne jačine, takozvana izofonska linija. Svi tonovi koje se u prostoru frekvencija-nivo nalaze na jednoj izofonskoj liniji imaju subjektivno istu jačinu zvuka koja je jednaka onoj na 1000 Hz. Ponavljajući merenje pri raznim nivoima referentnog zvuka dobijena je familija izofonskih krivih kakve su prikazane na slici 9.39. Na slici su ucrtane krive u koracima od po 10 fona. Svaka kriva odgovara jednoj vrednosti subjektivne jačine zvuka u fonima.



Slika 9.39 – Dijagram izofonskih linija (brojevi na linijama označavaju fone)

Sa dijagraoma izofonskih linija detaljnije se može sagledati nelinearnost čula sluha. Na primer, sa dijagraoma se može očitati da subjektivnu jačinu od 70 fona na frekvenciji 4 kHz, gde je uvo najosetljivije, ima zvuk nivoa oko 60 dB, a na frekvenciji 20 Hz za istu subjektivnu jačinu potreban je nivo zvuka od preko 100 dB. Promene zakriviljenosti izofonskih linija pokazuju da se nelinearnost čula sluha po frekvencijama u izvesnoj meri smanjuje sa povećanjem nivoa zvuka. To ne znači da njegov rad pri bilo kom nivou postaje linearan, već pri višim nivoima zvuka samo dolazi do izvesnog smanjenja te nelinearnosti.

Subjektivni doživljaj jačine složenih zvukova – glasnost

Pri dejstvu složenih zvukova koji se sastoje od više diskretnih komponenti ili koji imaju kontinualan spektar subjektivni doživljaj jačine zvuka postaje složen fenomen. Subjektivni doživljaj jačine zvuka pri takvoj pobudi predstavlja rezultat superponiranih uticaja raznih anatomske i fiziološke karakteristika (maskiranje, vremenska integracija, širina kritičnih opsega itd.), ali i nekih psiholoških faktora koje deluju u kompleksnom procesu stvaranja zvučne slike. U odnosu na doživljaj jačine prostih sinusnih tonova, subjektivni doživljaj jačine kompleksnih zvukova mnogo je složenija pojava i ne može se izvesti linearnom transformacijom iz skupa podatke o nivoima zvuka pojedinačnih spektralnih komponenti koje deluju na uvo. Čak i pri dejstvu zvukova koji se sastoje od manjeg broja spektralnih komponenti subjektivni doživljaj jačine nije linearna kombinacija nivoa glasnosti pojedinačno prepoznatih komponenti. Može se reći da ne postoji potpuni model za određivanje subjektivnog doživljaja jačine složenih zvukova, ali se u praksi koristi nekoliko algoritama prilagođenih okolnostima pimene.

Za kvantifikovanje subjektivnog doživljaja jačine složenih zvukova konvencijom je utvrđena veličina koja se naziva glasnost (*loudness*). Jedinica glasnosti je *son*, a uobičajena oznaka je *s*. Glasnost je u potpunosti subjektivna veličina i podatak o glasnosti nekog zvuka može se dobiti samo slušnim poređenjem s nekim drugim, referentnim zvukom. U takvim okolnostima skala glasnosti je morala da se veže za jednu referentnu tačku u slušnom polju. Kao i za skalu nivoa glasnosti koja se odnosi na doživljaj jačine sinusnih tonova, i ovde je u definiciju uvedena početna konvencija kojom je usvojeno da glasnosti od 1 *sona* odgovara jačina zvuka 40 *fona*. Na frekvenciji 1 kHz ovaj subjektivni nivo je egzaktno definisan i odgovara pobudi nivoa zvučnog pritiska 40 dB.

U definiciji glasnosti postavljen je zadatok da skala te veličine ima linearu prirodu. To znači da udvostručavanje glasnosti, to jest udvostručavanje subjektivnog doživljaja jačine zvuka, podrazumeva dvostruku vrednost u sonima (zbog logaritamske prirode skale fona dvostruko viši nivo subjektivne jačine čistih tonova ne znači dvostruku vrednost u fonima). Testovima je utvrđeno da subjektivni osećaj dvostruko jačeg zvuka zahteva povećanje jačine zvuka za oko 10 *fona*.

Prema tome, skala sona je definisana tako da glasnost 1 *son* odgovara jačini zvuka 40 *fona* i promena 10 *fona* odgovara udvostručavanju broja sona. To omogućava da se ustanovi analitička veza između glasnosti i jačine zvuka pri slušanju čistih tonova. Izraz koji definiše ovaku njihovu vezu je:

$$S(\text{sona}) = 2^{\frac{\Lambda(\text{fona}) - 40}{10}} \quad (9.5)$$

Zavisnost određena gornjim izrazom predstavlja samo jedan matematički model i ne odsljekava u potpunosti ponašanje uva, pogotovo za veoma niske nivoe zvučne pobude. Ipak, izraz je upotrebljiv za mnoge praktične aplikacije.

Ne postoji precizan matematički model koji bi opisivao rad čula sluha i kojim bi se mogla određivati subjektivna jačina složenih zvukova na osnovu objektivnih pokazatelja. U

praksi se koristi nekoliko algoritama čija je tačnost dovoljno prihvatljiva za određene situacije. Najčešće je korišćena takozvana Cvikerova metoda. Ona polazi od 1/3 oktavnog spektra i omogućava određivanje glasnosti i kada je spektar zvuka neregularan, čak i s pojedinačnim diskretnim komponentama. Danas na tržištu postoje softverski paketi koji služe za ocenu subjektivne jačine zvuka na osnovu signala registrovanog mikrofonom. U radiodifuziji se koristi jedan pojednostavljen metod za određivanje glasnosti da bi se olakšalo ujednačavanje jačine zvuka na mestu slušanja kod slušalaca kada se smenjuju različiti programi.

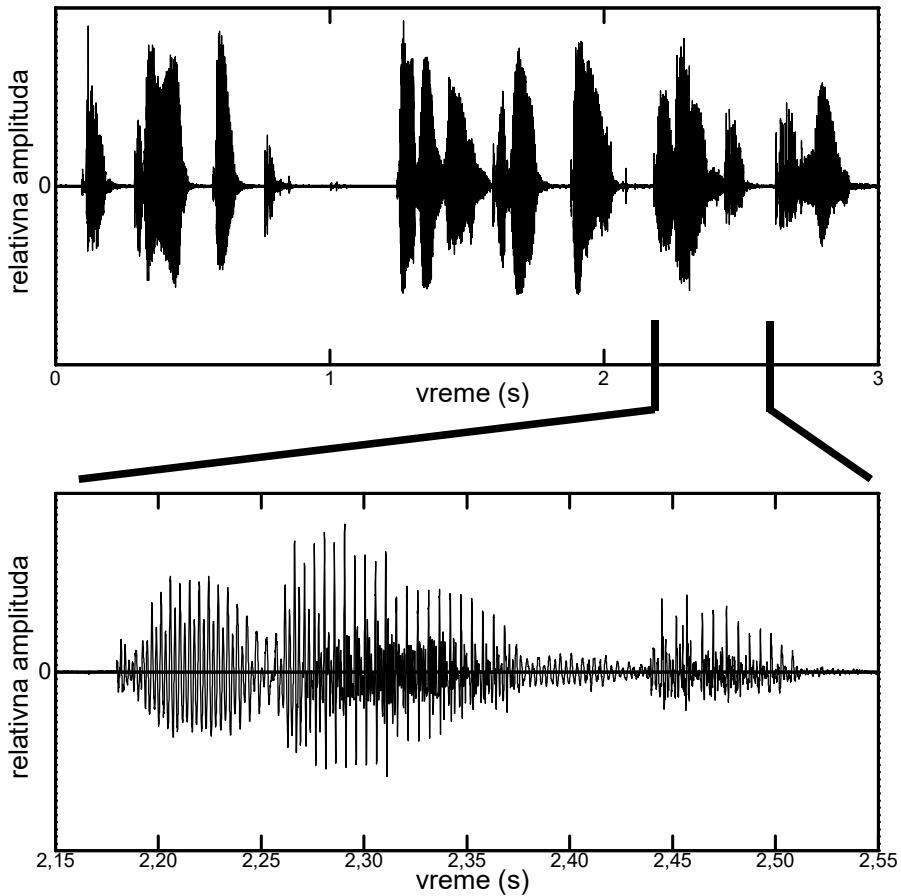
10. PERCEPCIJA GOVORA

Govor je specifična zvučna pojava jer predstavlja zvukom kodovan skup jezičkih simbola. U procesu percepcije govora formira se specifičan auditorni događaj koji se po svojoj suštini razlikuje od događaja nastalih slušanjem ostalih zvukova. Naime, prijem govornih informacija jeste proces prepoznavanja pojedinačnih zvučnih simbola, ali i čitavih reči i rečenica kao celina izgovorenih u nekom rečeničkom kontekstu. U takvom procesu značajnu ulogu ima iskustvo, preciznije ukupan memorisani fond govora. Sve to pomaže u detekciji pojedinačnih izgovorenih jezičkih simbola, posebno kada su pojedini segmenti govornog signala oštećeni tokom prenosa od izvora do slušaoca ili maskirani nekim parazitskim signalima. Zbog svega toga govor i njegova analiza se izdvajaju od ostalih vrsta akustičkih signala i predstavljaju oblast za sebe.

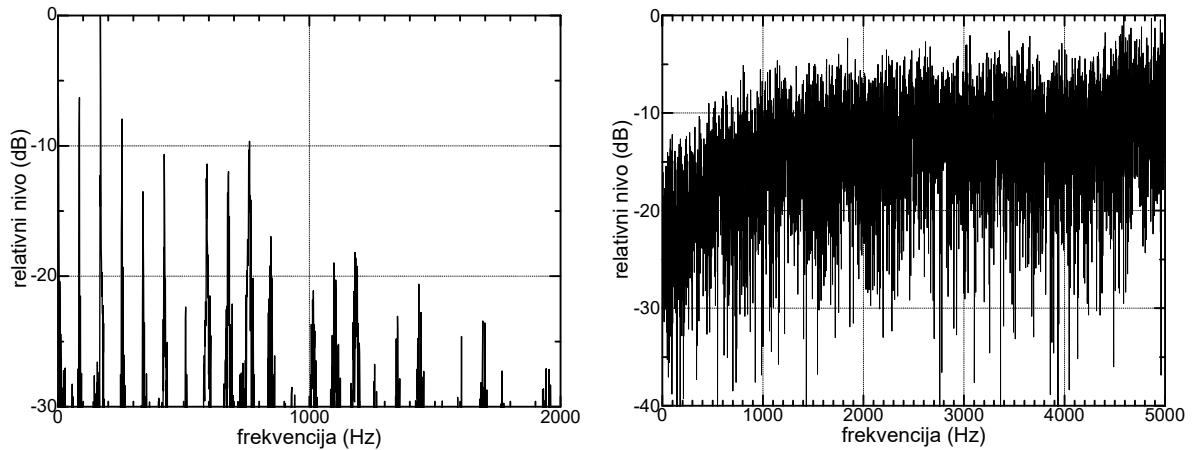
Osobine govornog signala značajne za njegovu percepciju

Za percepciju govora, a posebno za okolnosti njegove degradacije u prenosnim kanalima, od značaja su neke specifičnosti govornog signala u vremenskom i frekvencijskom domenu. Njegove karakteristične odlike u vremenskom domenu ilustrovane su jednom primeru talasnog oblika prikazanom na slici 10.1, gde je nacrtan talasni oblik signala koji obuhvata jednu izgovorenu rečenicu u trajanju od oko 3 s. U donjem delu slike uvećan je segment u kome se nalazi signal samo jedne izgovorene reči u trajanju oko 0,5 s gde se detaljnije sagledava njegova struktura. Na ovom primeru se vidi da govorni signal odlikuju velike dinamičke promene intenziteta u vremenu. U njemu se naizmenično smenjuju segmenti koji imaju relativno veliku energiju i delovi relativno niskog nivoa. Govorni signal ima maksimume energije u toku izgovora vokala, a minimumi se javljaju u obezvučenim delovima tokom izgovora konsonanata i eventualno obezvučenih delova vokala. Energetski nivo čini važnu razliku među glasovima jer je problem percepcije govora u tome što delovi sa nižim nivoom energije imaju veći značaj za tačnost prijema i pravilno razumevanje izgovorenog sadržaja. U govoru takođe postoje kraće ili duže pauze između reči koje tako postaju sastavni deo govornog signala.

Kad se detaljnije pogleda talasni oblik govornog signala može se videti da u njemu postoje delovi sa periodičnom strukturom, to su vokali, i delovi sa aperiodičnom strukturom, i to su konsonanti. U nekim delovima talasnog oblika signala izgovorene reči prikazanom na donjem delu slike 10.1 može se prepoznati periodičnost. U frekvencijskom domenu razlika između periodičnih i aperiodičnih delova ilustrovana je na slici 10.2, gde su prikazani spektri jednog izgovorenog vokala i jednog karakterističnog konsonanta.



Slika 10.1 – Talasni oblik jednog segmenta govornog signala: gore - izgovorena jedna rečenica; dole - izdvojen deo signala u kome se nalazi samo jedna reč



Slika 10.2 – Primer spektara pojedinačnih glasova: levo – spektar jednog vokala, desno – spektar jednog konsonanta (Spektri su normalizovani za svaki glas posebno pa spektralni nivoi nisu međusobno poređljivi)

U poglavlju 8.5 je pokazano da signal vokala ima svoju osnovnu frekvenciju koju određuje brzina oscilovanja glasnica, a talasni oblik koji pri tome nastaje obezbeđuje bogatstvo harmonika. Takav signal prolazi kroz filterski sistem vokalnog trakta u kome se

spektralno uobičjava i gde nastaju istaknute oblasti formanata. Spektar vokala opada sa frekvencijom, pa se u pokazanom primeru sa slike vidi da je već na 2 kHz spektralni nivo opao za skoro 30 dB u odnosu na najjaču spektralnu komponentu.

Najniža spektralna komponenta sa slike 10.2 je osnovna frekvencija ljudskog glasa. U normalnom govoru ta frekvencija predstavlja individualnu odliku čoveka i menja se u nekim relativno uskim granicama, što daje određenu melodiju izgovorenim rečenicama. Uobičajeno se navodi da je srednja vrednost osnovne frekvencije muškog glasa oko 130 Hz. Kod ženskog glasa ona se kreće u rasponu od 180 Hz do 230 Hz, a kod dečijeg glasa od 230 Hz do 300 Hz. Karakteristično je da se osnovna frekvencija glasa u izvesnoj meri smanjuje sa godinama usled promena na glasnicama. Poznato je da tom efektu može doprineti pušenje (takozvani „pušački glas“).

Čovekov vokalni trakt može da proizvede znatno širi opseg osnovnih frekvencija od onog koji se koristi u govoru, i to se ispoljava pri pevanju. Tada se uglavnom koristi maksimalno mogući opseg promena osnovne frekvencije. U Tabeli 10.1 prikazane su uobičajene granične frekvencije pevanog glasa po kategorijama muzičke podele na sopran, alt, tenor i bas. Pošto pri pevanju osnovna frekvencija glasa mora biti podešena na frekvenciju tona koji se peva, prikazane granice su izvedene iz vrednosti frekvencija muzičkih tonova koji se od pojedinih glasova zahtevaju u najvećem delu muzičke literature. Prirodno je da postoje individualne varijacije, pa prikazane vrednosti frekvencija ne predstavljaju i maksimalne granice.

Tabela 10.1 – Uobičajeno zahtevane granične vrednosti frekvencije pevanog glasa

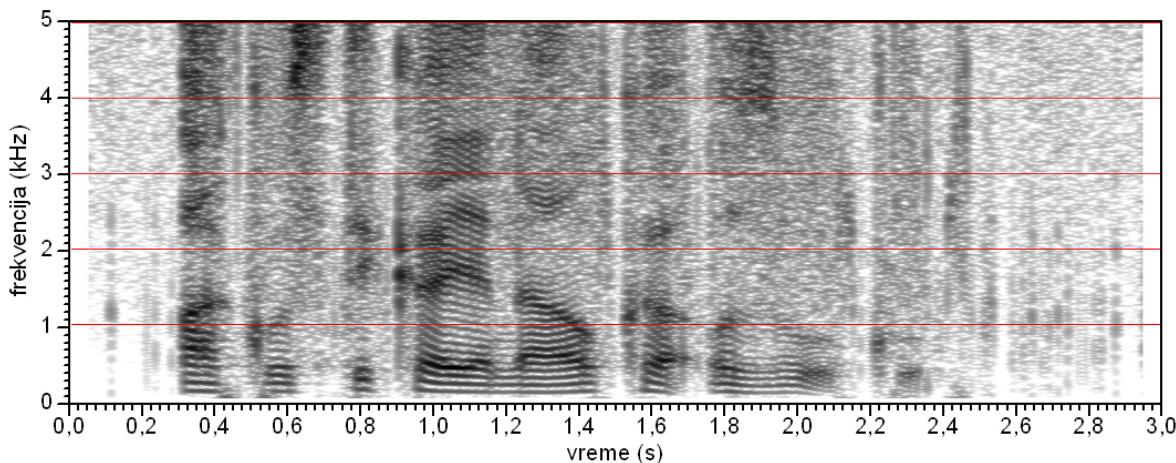
	osnovna frekvencija (Hz)	
	donja	gornja
bas	82	349
tenor	89	392
alt	131	494
sopran	247	1175

Signal konsonanata ima stohastičku prirodu. Na slici 10.2 se vidi da je spektar prikazanog konsonanta kontinualan i širokopojasan. Njegov maksimum je na višim frekvencijama, u prikazanom slučaju iznad 2 kHz. Spektri glasova prikazani na slici normalizovani su nezavisno, svaki za sebe prema, svojoj najvećoj vrednosti. Zbog toga dva prikazana spektra sa slike 10.2 nisu međusobno poredljivi po spektralnom nivou. U realnosti spektralni nivo konsonanata je značajno niži od vokala jer je njihova ukupna energija niža.

Prikaz vremenskih i spektralnih karakteristika govora sa slike 10.1 i 10.2 pokazuje da se u kontinualnom govoru dinamično menjaju i obvojnica i njegov spektar. U takvim okolnostima kompleksnost sadržaja govornog signala može se jasnije sagledati samo pomoću spektrograma. Takav način prikazivanja govora osnova je alatka u njegovoj analizi jer dobro odslikava varijacije i u vremenu i po frekvencijama. Interesantno je da

se nauka o govoru počela intenzivno razvijati tek kada je šezdesetih godina dvadesetog veka napravljen komercijalno dostupan uređaj koji je u analognoj tehnologiji pravio spektrogram prethodno snimljenog govora.

Na slici 10.3 prikazan je spektrogram jedne izgovorene rečenice. Pojava harmonijske strukture signala pri izgovoru vokala predstavljena je horizontalnim tamnjim linijama. Svaka tamnija linija predstavlja jedan harmonik osnovne frekvencije. U nekim glasovima, kao na primer u onom koji je na slici pozicioniran u vremenu oko 1 s, harmonici idu do vrlo visokih frekvencije preko čitave visine spektrograma. Na njima se vidi i formantna struktura pojedinih glasova koja je predstavljena zonama intenzivnije zacrnjenosti harmonika. Promene osnovne frekvencije pri govoru manifestuju se talasanjem linija harmonika. Pojava ploziva u izgovoru predstavlja impuls koji se manifestuje širokim spektrom, kao na primer onaj koji je na slici pozicioniran u vremenu oko 0,9 s.



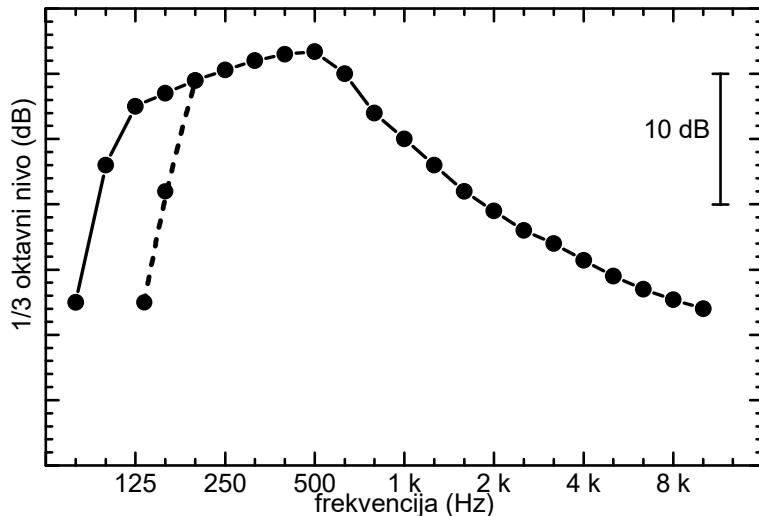
Slika 10.3 – Spektrogram jedne izgovorene rečenice

Aperiodične komponente u signalu konsonanata predstavljene su u spektrogramu sivim površinama različite zatamnjenoštvi. U prikazanom primeru takođe se primećuje aperiodična komponenta koja prati izgovorene vokale, to jest intervale sa harmonijskom strukturu. To pokazuje da kod analiziranog govornika postoji komponenta šuma u izgovoru (na primer promuklost).

Usrednjavanjem spektra govora raznih govornika u dužem vremenskom intervalu dobija se dugovremeneni spektar govornog signala. Njegov principijelni izgled je prikazan na slici 10.4. To je dugovremeneni spektar po opsezima $1/3$ oktava koji se dobijen analizom snimljenog govora 18 osoba koje su čitale tekst na svojim jezicima. U analizu je uključeno 12 različitih jezika. Na slici je naznačena razlika u spektru muških i ženskih glasova.

Sa slike 10.4 se vidi da je maksimum energije govornog signala u oblasti 300-500 Hz, i da njegov spektar od tog maksimuma opada ka višim frekvencijama. Oblik spektra pokazuje da osnovna frekvencija govora nije najjača komponenta signala, već samo određuje prepoznatljivu visinu, a maksimum intenziteta određen je istaknutošću pojedinih formantnih oblasti. Oblik ovog spektra je značajan jer se pojavljuje kao faktor u

definisanju nekih mernih signala za ocenu kvaliteta prenosa govora, što je objašnjeno u nastavku.



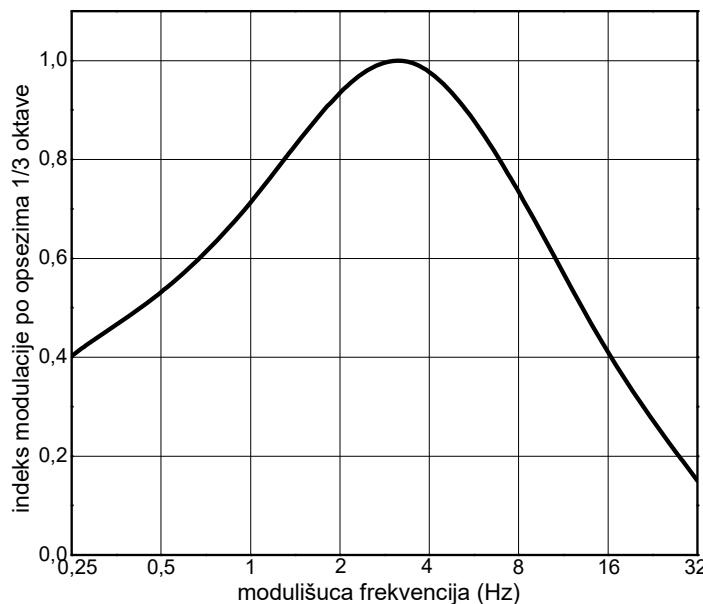
Slika 10.4 – Dugovremeni spektar govora dobijen usrednjavanjem za 13 govornika na isto toliko jezika: puna linija – muški govornici, isprekidana linija – ženski govornici

Osobine govornog signala koje su ovde prikazane čine da je percepcija govora u realnim okolnostima delikatan proces koji lako može biti ugrožen spoljašnjim faktorima iz okruženja, a zatim i nekim subjektivnim osobinama slušaoca. Spektar konsonanata dominantno smešten na višim frekvencijama i sa niskim spektralnim nivoom lako može biti prekriven raznim parazitskim zvukovima. To otežava prepoznavanje govora jer su konsonanti od bitnog značaja za razmevanje izgovorenog. Pri tome je ukupna energija govora, a time i njegova čujnost, određena energijom vokala, pa subjektivni doživljaj jačine govora neće biti ugrožen, već samo njegova razumljivost. Zbog toga eventualnu maskiranost konsonanata nije lako primetiti. S druge strane, promene koje se dešavaju sa čulom sluha tokom ljudskog života, opisane u prethodnom poglavlju, donose smanjenje osjetljivosti na visokim frekvencijama, upravo tamo gde se nalaze spektralne komponente konsonanata. Zbog toga se u poznjem životnom dobu javlja otežana percepcija konsonanata, a time i govora u celini.

Modulacione osobine govornog signala

Na slici 10.1 se vidi da je obvojnica koja se intenzivno menja u vremenu dominantna osobina govornog signala. On se može posmatrati kao amplitudski modulisani signal dobijen tako što je neki noseći signal amplitudski modulisan jednim sporo promenljivim signalom koji proizvodi prikazanu obvojnici. Noseći signal može biti periodični signal generisan glasnicama ili šum nastao nekim turbulencijama u vokalnom traktu. Njihov spektralni sadržaj je prikazan na slici 10.2. Kao nosilac može se pojaviti i kombinacija periodičnog i stohastičkog signala, što se vidi iz spektrograma sa slike 10.3.

U fizičkom smislu amplitudska modulacija govornog signala nastaje procesom artikulacije pri izgovoru u kome se uskcesivno smenjuju glasovi. Na osnovu brzine kojom se na slici 10.1 obvojnica signala menja u vremenu može se zaključiti da su modulišuće frekvencije govora vrlo niske, reda Herca. Spektralna svojstva tog modulišućeg signala funkcija su brzine izgovora (broj glasova u sekundi). Zbog toga je indeks modulacije, to jest dubina amplitudske modulacije govornog signala, jedan od parametara koji opisuje govor. Srednji indeks modulacije za kontinualan govor određen po opsezima 1/3 oktave prikazan je na slici 10.5. Vidi se da je maksimalna dubina modulacije, a to znači indeksa modulacije, u oblasti frekvencija 2-4 Hz. Položaj ovog maksimuma važi za prosečnu brzinu izgovora. Na modulaciju govornog signala u izvesnom smislu utiče i način izgovora. U tom smislu, sigurno je da se ova kriva malo razlikuje za različite svetske jezike, jer u njima uobičajeni način svakodnevnog govora može biti brži ili sporiji. Kao ilustracija varijabilnosti modulacije govornog signala na slici 10.6 je prikazan modulacioni spektar govora istog sadržaja, ali izgovaran na dva načina: u dijalogu sa drugom osobom i pri slobodnom izgovoru u vidu monologa. Vidi se da dijalog u izvesnoj meri ubrzava govor, što kao rezultat smanjuje nivo modulišućeg spektra na nižim frekvencijama.

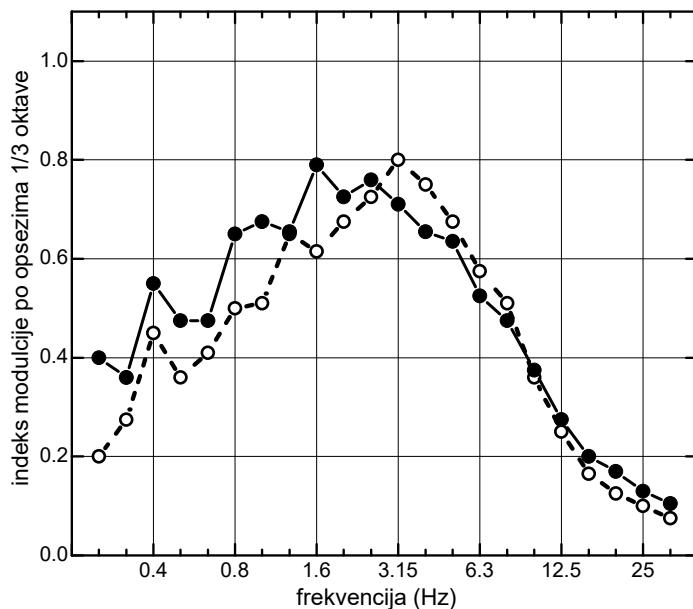


Slika 10.5 – Srednja vrednost indeksa modulacije govornog signala

Analiza auditornih događaja – auditorni tok

Pri slušanju zvukova u moždanim centrima se odvija kompleksan proces stvaranja zvučne slike. U njemu se vrši analiza auditorne scene u kojoj čulo sluha organizuje zvukove u smislene elemente. Kada se neki pristižući zvukovi organizuju u jedan kontinualni auditorni događaj izdvojen od ostalih istovremeno prisutnih zvukova, svest o tako registrovanoj zvučnoj sekvenци naziva se auditorni tok (*auditory stream*). U procesu slušanja takav auditorni tok postaje jedinica percepcije koja se obrađuje nezavisno od ostatka auditorne scene. Posledica toga je da se nailazeće informacije o individualnim

zvukovima grupišu u jedinstvenu mentalnu prezentaciju. Da bi se formirao auditorni tok potrebno je prepoznavanje nekog jasnog zvučnog šablonu koji traje u vremenu.



Slika 10.6 – Izmereni indeks modulacije istog govora kada se realizuje kroz konverzaciju sa drugom osobom (isprekidano) i kada se slobodno izgovara u vidu monologa (puna linija)

Prema tome, auditorni tok podrazumeva proces u kome se neke pojedinačne pristigle zvučne informacije procesiraju kao jedna celina, što u procesu slušanja donosi neke posebne sposobnosti. Razne su okolnosti u kojima razdvojene zvučne elemente čulo sluha može povezati u vremenu čineći auditorni tok. Na primer, kada se sluša serija koraka ili sviranje na nekom instrumentu pojava se sastoji od niza individualnih zvučnih događaja, ali se doživljava kao jedan auditorni događaj. Međutim, govor predstavlja najbolji primer auditornog toka što značajno utiče na njegovu percepciju, a to znači i razumljivost primljene govorne poruke.

Postoje različiti principi na kojima čulo sluha u procesu percepcije organizuje i grupiše auditorne tokove. Oni se mogu kategorisati u dve osnovne vrste: na sekvenčalne znake koji se nižu u vremenu i stvaraju neki primetan vremenski kontinuitet i na simultane znake koji stvaraju neki primetan kontinuitet u frekvencijskom domenu. Sekvenčalni znaci se prepoznaju na osnovu postojanja kontinuiteta zvučnog signala, to jest neprekinutosti talasnog oblika u vremenu. Simultani znaci se prepoznaju po kontinuitetu neke spektralne karakteristike. Na primer, kada se sluša jedan govornik kod njega postoji konstatnost osnovne frekvencije glasa. Greške tokom slušanja govora koje se na neki način isprovociraju u procesu grupisanja auditornog toka vode ka gubljenju percepcije informacija od značaja. Uzrok grešaka u grupisanju može biti vremenski prekid, nagla promena visine ili boje zvuka.

Značajan faktor koji doprinosi percepciji govora su memorisane šeme govora bazirane na iskustvu. Na tome se zasniva analiza verovatnoće koja omogućava predikciju sekvence reči i rečenica u celini. Ulogu ovakvog procesiranja auditornog toka ilustrije fenomen koji se često označava kao efekat „šta si rekao?“. Radi se o pojavi da kad neko nešto izgovori slušalac u prvom trenutku ne razume šta je rečeno i zato odmah postavi navedeno pitanje.

Međutim, još pre nego što je dobio odgovor, to jest ponovljen iskaz, razjasni mu se šta je rečeno. To znači da je samo bilo potrebno neko vreme za procesiranje auditornog toka da bi se razumeo izgovoren i skaz.

Koktel efekat

Efekti auditornog toka u percepciji govora ispoljavaju se u pojavi koja se naziva koktel efekat. Tako se naziva sposobnost čula sluha koja se manifestuje kada više osoba raspoređenih u prostoru oko slušaoca govori istovremeno, i kada dodatno postoji neka ambijentalna buka. Otuda i naziv koktel efekat. Slušalac u takvim otežavajućim okolnostima može da izdvoji i prati šta govori jedna osoba, to jest da u takvom okruženju izdvoji u zvučnoj slici jednog govornika i dekoduje govornu poruku, dok će ostali auditorni događaji u svesti biti u izvesnoj meri potisnuti. Prema tome, koktel efekat se može shvatiti i kao sposobnost selektivne pažnje auditornog sistema. Ovakva osobina je od velikog značaja za percepciju govora u otežanim uslovima, ali se ispoljava i u nekim drugim okolnostima. Na primer, muzičari mogu da u orkestarskom zvuku prate zvuk jednog instrumenta. U svim takvim slučajevima čulo sluha izdvaja jedan zvuk i njega obrađuje kao auditorni tok.

Kada bi se na mestu gde se nalazi slušalac u istim uslovima mikrofonom registrovao signal i zatim taj snimak preslušao, razumljivost snimljenog govora bila bi znatno manja. To pokazuje da pri neposrednom slušanju postoje faktori koji olakšava procesiranje formiranog auditornog toka, a koja se redukuje pri preslušavanju snimka istog govora. Taj faktor je binauralno slušanje koje u procesiranju auditornih događaja daje dva nezavisna signala sa prostorno razdvojenih ušiju, kao što je objašnjeno u poglavljju 9.2. Može se reći da čulo sluha u trodimenzionalnom prostoru analizira zvučno polje u dve različite tačke. Time se dobijaju dva nezavisna signala koji stižu u moždane centre, što omogućava da se u procesiranju postigne određeno prostorno usmeravanje slušaoca na jedan izvor smešten u prostoru, to jest postiže se prostorna separacija izvora zvuka.

Ako se slušanje posmatra kao proces detekcije u kome postoji korisni signal, a to je govor jedne osobe koji se prati, i maskirajući šum koji čine svi ostali prisutni zvukovi, onda se može reći da binauralno slušanje unosi efekat demaskiranja. Takvo binauralno demaskiranje omogućava snižavanje granice detekcije korisnog zvuka za više od 20 dB. Ako se zvučni ambijent zapiše kao snimak i zatim reprodukuje, nestaje mogućnost prostorne separacije jer svi zvukovi, i koristan signal i šum, dolaze iz iste tačke. Zbog toga je uvek snimljen govor teže razumljiv od neposrednog slušanja, posebno ako je praćen nekim ometajućim faktorima.

Zanimljivo je da su prva istraživanja u ovoj oblasti inicirana problemom kontrolora leta u ranim pedesetim godinama dvadesetog veka. U to vreme u kontrolnom tornju kontrolori su primali poruke od pilota preko zvučnika. U početku je to bio jedan zvučnik za sve glasove, pa je postojao problem razumevanja „svog“ pilota. Ozbiljnost situacije zahtevala je uvođenje nauke u rešavanje tog problema, i tada je definisan pojam koktel efekta.

10.1. Ocena kvaliteta prenosa govora

U inženjerskoj praksi postoji potreba da se na neki način oceni i kvantifikuje kvalitet prenosa govora kroz razne fizičke prenosne kanale. To podrazumeva da se dobije neki numerički parametar koji pokazuje razumljivosti govora na mestu slušaoca koji taj govor sluša. Takav zahtev se javlja, na primer, u testiranju kvaliteta telefonskih i govornih internet komunikacija (*Skype* i slično), oceni kvaliteta sistema za ozvučavanje, kvaliteta akustičkog dizajna amfiteatara i učionica, itd. U svim takvima okolnostima značajno je pitanje stepena degradacije govora pri prenosu koja se ocenjuje na mestu slušaoca. Na osnovu toga se otvara pitanje načina kvantifikovanja i merenja (ili proračuna) stepena te degradacije.

Preciznosti primljenih zvučnih informacija – razumljivost govora

Kada se sluša govor stepen prepoznavanja njegovog sadržaja definiše se pojmom „razumljivosti govora“. Taj pojam podrazumeva tačnosti s kojom slušalac prima sadržaj govora koji sluša. U opštem slučaju to je kompleksna karakteristika jer razumljivost ne zavisi samo od kvaliteta prenosa govornog signala kroz fizički sistem prenosa, akustički ili telekomunikacioni, već i od raznih nematerijalnih faktora izvan domena procesa prenosa fizičkog signala. Najvažniji nematerijalni faktori koji u nekim zadatim okolnostima utiču na razumljivost, to jest tačnost prijema govornog sadržaja, su:

- sadržina govora (familijarnosti slušaoca s temom),
- koncentracija slušaoca pri slušanju govora,
- preciznost izgovora glasova i diktacija govornika.

Ovi faktori otežavaju postupak pouzdanog kvantifikovanja uticaja prenosnog kanala. Sa tehničkog aspekta posmatrano takvi faktori unose nekontrolisani varijabilnost kada je potrebno izmeriti i oceniti kvalitet prenosa govora.

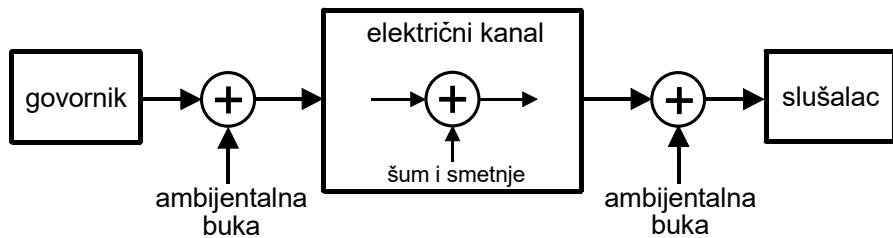
Uticaji familijarnosti slušaoca sa temom znači da isti govor može biti različito razumljiv različitim osobama. Najbolji primer je govor koji se koristi u specifičnim strukama, jer se koristi karakteristična terminologija koja nije svakom poznata. Za onoga ko tu terminologiju ne poznaje razumevanje izgovorenog postaje otežano jer se koriste nepoznate reči. Tada svaka mala degradacija govora čini taj govor nerazumljivim. Koncentracija slušaoca kao faktor utiče da ista osoba u različitim okolnostima može imati različite rezultate koje postiže u tačnosti prijema govora. Naime, svako smanjenje koncentracije na govor koji se sluša isključuje neke auditorne mehanizme značajne za proces percepcije. Rezultat toga je nepotpuno razumevanje izgovorenih rečenica. Najzad, govor može biti degradiran i pri samom nastanku zbog lošeg izgovora govornika. Suština je u tome da nabrojane pojave otežavaju objektivno sagledavanje uticaja fizičkih kanala i ocenu kvaliteta prenosa govora jer nisu predvidive.

Fizički uticaj kanala na razumljivost govora može se manifestovati na dva načina: prekrivanjem delova govornog signala nekim istovremeno prisutnim parazitskim signalima i promenama njegovog talasnog oblika. Pojava prekrivanja je karakteristična

za prenos govora u osnovnom opsegu kroz linearne sisteme, što znači kroz akustičke sisteme prenosa (prostorije, sistemi za ozvučavanje), radiodifuziju i telefoniju. Promene strukture talasnih oblika javljaju se u okolnostima različitih vrsta kodovanja govornog signala koje se koriste u savremenim telekomunikacijama.

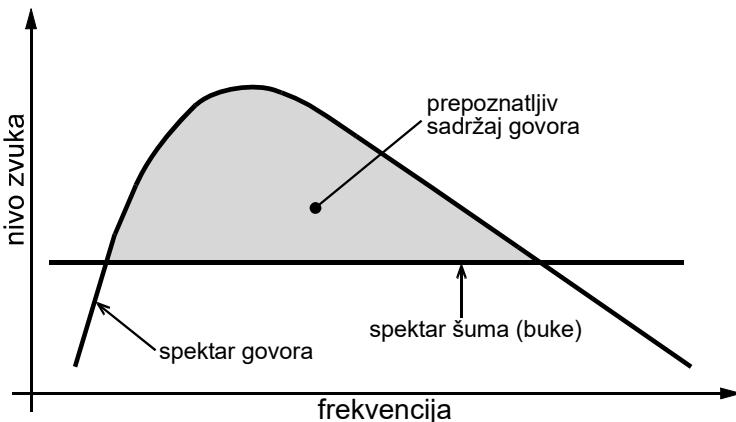
Degradacija govora prekrivanjem delova signala

Razumljivost govora pri prenosu kroz neki fizički kanal smanjuće se kada neki parazitski signali prekrivaju delove govornog signala manjih amplituda. Pojava takvih uticaja ilustrovana je na slici 10.7. U električnom domenu parazitski signal koji prekriva govorni signal može biti aditivni šum ili neke smetnje, a u akustičkom domenu to je ambijentalna buka na mestu govornika i u okruženju slušaoca. Električni šum i ambijentalna buka mogu se okarakterisati kao signali bez informacionog sadržaja, pa kao takvi ne privlače pažnju. Zbog toga pojava prekrivanja govornog signala postaje primetna za slušaoca tek ako nivo parazitskog signala postane suviše visok. Pri nižim nivoima oni ostaju neprimetni za slušaoca, iako prekrivaju delove govornog signala i smanjuju razumljivost.



Slika 10.7 – Ilustracija uticaja parazitskih signala koji prekrivaju govorni signal

Zbog složenog spektralnog sadržaja glasova opisanog na početku ovog poglavlja prekrivanje delova govornog signala može se u frekvencijskom domenu objasniti na način koji je principijelno ilustrovan na slici 10.8. Za ilustraciju je uzet srednji spektar govora i neki prepostavljeni spektar parazitskog signala. Degradacija govora nastaje tako što parazitski signal pokrije delove njegovog spektra koji zbog toga u percepciji postaju nedostupni čulu sluha („utonu“ u šum). Sa slike se vidi da u takvima okolnostima čulu sluha ostaje dostupno samo ono što se nalazi iznad spektralnog nivoa parazitskog signala (šrafirana površina), a to može biti nedovoljno za prepoznavanje izgovorenog. Stanje razumljivosti zavisiće od veličine nepokrivene zone između dva spektra koja je na slici šrafirana.



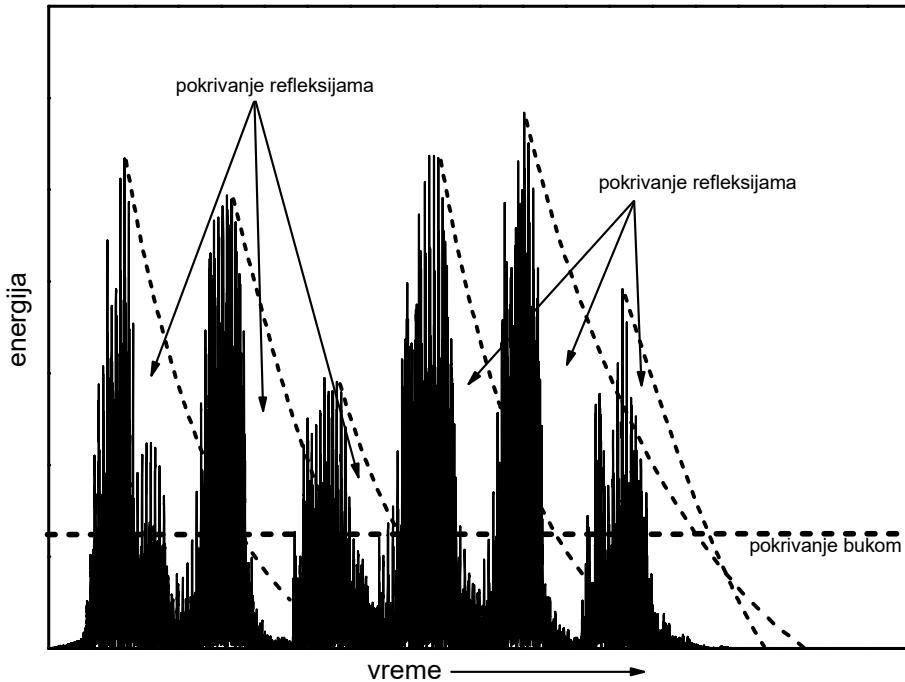
Slika 10.8 – Principijelni prikaz u frekvencijskom domenu prekrivanje spektra govora parazitskim šumom (bukom)

Koliko će aditivni šum ili buka ugroziti percepciju govora zavisi od toga koji deo spektra govornog signala prekriva spekter parazitskog signala. Pri tome je karakteristično da najjači delovi govornog signala ostaju nepokriveni, pa subjektivni doživljaj govora ostaje podjednako glasan bez obzira da li je parazitski signal prisutan ili ne. Promena nastaje samo u njegovoj razumljivosti. U praksi je najugroženiji deo spektra govora na višim frekvencijama gde je njegov spektralni nivo relativno nizak, što se vidi sa slike 10.4. Problem sa razumljivošću nastaje zbog toga što se u toj oblasti nalazi najveći deo energije konsonanata, a oni nose značenje reči. Zbog toga se može reći da je „tajna“ razumljivosti govora prevashodno u tišini oko govornika i slušaoca, kao i dovoljnoj potisnutosti električnog šuma i smetnji. Najčešći izvor ambijentalne buke su razni mašinski uređaji, pre svega ventilacija i klimatizacija, a ponekad i ventilatori uređaja prisutnih u prostoriji kao što su projektori, računari i slično. Zbog toga su propisani maksimalno dozvoljeni nivoi buke u ambijentima gde ljudi treba da komuniciraju govorom. U projektima takvih prostora zahteva se analiza buke i preduzimanje mera da se ona potisne ispod praga kojim se obezbeđuje dobra razumljivost govora.

Pojave pokrivanja govora aditivnim šumom mogu se detaljnije objasniti u vremenskom domenu. Na slici 10.9 su ilustrovani mogući efekti prekrivanja na primeru talasnog oblika jedne kratke rečenice. Na dijagramu je ucrtana energija govornog signala, pa je dijagram unipolaran. Vide se delovi koji imaju relativno veliku energiju (vokali) i oni koji su značajno slabiji (konsonanti). Prekrivanje tiših delova govornog signala može nastati na dva načina:

- kao vremenski uniformno pokrivanje aditivnim šumom i
- kao vremenski ograničeno pokrivanje refleksijama u prostoriji (reverberacijom) koje stižu sa kašnjenjem nakon jačih delova govornog signala (vokala).

Oba načina prekrivanja principijelno su prikazana na slici 10.9. Ovo drugo prekrivanje može se označiti kao „samomaskiranje“, jer pri tome govor sam sebe maskira svojim refleksijama koje neminovno postoje u prostoriji. Sa slike se vidi da će svaki jači deo govora na mestu slušaoca iza sebe vući „rep“ koji prekriva tiše delove istog govora. Samo refleksije koje dolaze dovoljno brzo nakon jakih delova neće ugrožavati razumljivost jer neće prekriti konsonante. Razumljivost ugrožavaju kasnije refleksije, i što više kasne, to je prekrivanje tiših delova govora veće.



Slika 10.9 – Ilustracija načina prekrivanje delova govornog signala aditivnim šumom (bukom) i refleksijama

10.2. Mere kvaliteta prenosa govora

Da bi se ocenio kvalitet prenosa govora kroz neki prenosni kanal potrebno je definisati adekvatan numerički parametar kojim se taj kvalitet iskazuje, a takođe i raspolažati s metodologijom za njegovo merenje i eventualno za predikciju, to jest proračun. Jedini apsolutni pokazatelj razumljivosti dobija se eksperimentalno tako što se na ulazu u prenosni kanal emituje neki govor, a na njegovom izlazu slušaoci beleže ono što čuju. Upoređivanjem emitovanog i zabeleženog može se utvrditi procenat grešaka u prijemu. Ocena kvaliteta mogao bi biti, na primer, procenat tačno primljenih reči. Međutim, u takvom postupku postoji problem objektivizacije dobijene ocene razumljivosti govora zbog redundanse u sadržaju svakodnevnog govora i složenih mehanizama njegove percepcije koji su objašnjeni ranije, a koji združeno omogućavaju da se govorne poruke, reči i rečenice, ispravno detektuju čak i kada je govorni signal do izvesne mere fizički degradiran. To znači da rezultat dobijen u opisanom eksperimentu ne bi tačno odslikavao stanje prenosnog kanala.

Zahtevi inženjerske prakse uticali su da se način ocenjivanja kvaliteta prenosa govora razvije u dva pravca. Prvi pravac je subjektivni, i zasniva se opisanom eksperimentalnom postupku u kome grupa ljudi sluša neki govor i svako beleži šta čuje, nakon čega se određuje postignuta tačnost prijema. Međutim, neophodan uslov pri tome je da se na neki način eliminiše uticaj redundansnosti govora, kao i da se nekako isključi sposobnost čula da nadoknadi eventualne nedostajuće delove signala. Drugi pravac je objektivni, što podrazumeva metode zasnovane na emitovanju kroz prenosni kanal pogodnih

determinističkih signala koji nisu govor, a iz razlike poslatog i primjenog signala određuje se neki numerički parametar kojim se kvantificuje degradacija pri prenosu. Činjenica je da subjektivni metod daje absolutnu ocenu kvaliteta prenosa govora, ali je prilično zahtevan za realizaciju zbog potrebe da se uključi dovoljan broj slušalaca i sluša dovoljno dugačak segment govora kako bi se obezbedila statistička regularnost dobijenog rezultata. Sa druge strane, prednost objektivnog koncepta je što omogućava brzo i jednostavno merenje bez potrebe za angažovanjem ljudi. Takav parametar daje i potencijalnu mogućnost da se na neki način proračunava pogodnim analitičkim postupcima. Ta osobina je od esencijalnog značaja za proces projektovanja i predikciju kvaliteta prenosa govora. Međutim, za ocenu kvaliteta nekom objektivnom metodom neophodno je prethodno utvrditi korelaciju između vrednosti objektivnog parametra i vrednosti razumljivosti koja bi se postigla slušanjem govora kao jedinom absolutnom merom.

Tokom vremena su u oba navedena pravca razvijane razne metode za kvantifikovanje kvaliteta prenosa govora jednobrojnim parametrom. Danas su u inženjerskoj praksi preovladala dva pristupa:

- subjektivna mera koja se naziva logatomska razumljivost, i ona predstavlja apsolutni pokazatelj kvaliteta koji se dobija neposrednim slušanjem emitovanog govora i pokazuje tačnost primljenog govornog sadržaja, i
- objektivne mere razumljivosti izvedene iz merenja impulsnog odziva (funkcije prenosa) prenosnog kanala i merenja odnosa signal/šum, među kojima je najznačajniji indeks prenosa govora (*STI – Speech Transmission Index*) koji se može meriti i proračunavati.

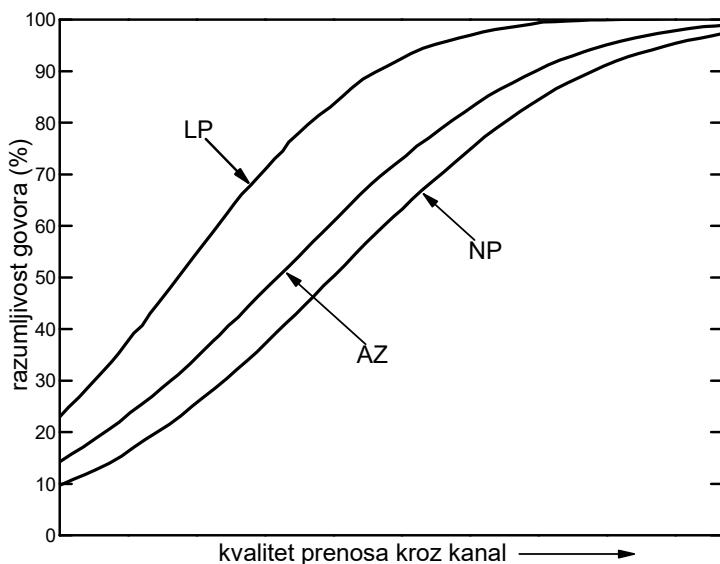
Logatomska razumljivost govora

Osnovna mera kvaliteta prenosa govora kroz prenosni kanal jeste njegova razumljivost na mestu prijema koju postižu slušaoci. Kvantifikovanje razumljivosti govora je, po definiciji, ocena tačnosti primljenog govornog sadržaja. To se iz praktičnih razloga svodi na tačnost primljenih reči, shvatajući reči kao osnovne jedinice govora. Predstavljanje tačnog prijema reči može biti na skali od 0 do 100%, pri čemu razumljivost 100% znači da su sve izgovorene reči na mestu prijema tačno primljene, a 0% da ni jedna reč nije tačno primljena. Za prikazivanje ocene kvaliteta može se koristi i skala od 0 do 1.

Kada se pristupi realizaciji takvog ocenjivanja kvaliteta prenosa govora pojavljuje se teškoća u objektivizaciji dobijenog rezultata. Uzroci toga su uvek prisutna redundansa u sadržaju govora, ali pre svega sposobnosti čula sluha da prepozna izgovoreni tekst na osnovu ranije naučenog, čak i ako je govorni signal na pojedinim glasovima ili rečima oštećen. Na taj način dobijeni rezultat ne odslikava fizičko stanje prenosnog kanala, jer je ono maskirano čovekovom sposobnošću rekonstrukcije nedostaućih delova govornog signala. Da bi se ilustrovala suština ovog mehanizma percepcije, na slici 10.10 prikazan je rezultat merenja razumljivosti izgovorenog teksta u funkciji kvaliteta prenosa signala za

tri različita slučaja govornog sadržaja. Prikazani rezultat je dobijen za slučaj slušanja jedne rečenice formirane od četiri reči, ali sa različitim značenjima. To su:

- potpuno ispravna rečenica sa lako predvidivim sadržajem (LP),
- rečenica gramatički ispravna, ali nižeg nivoa predvidivosti sadržaja jer ima semantičku anomaliju manifestovanu neočekivanim i nelogičnim značenjem (AZ),
- rečenica iste dužine ali bez predvidivosti jer je formirana slučajnim ređanjem reči, što znači bez ikakvog smisla (NP).



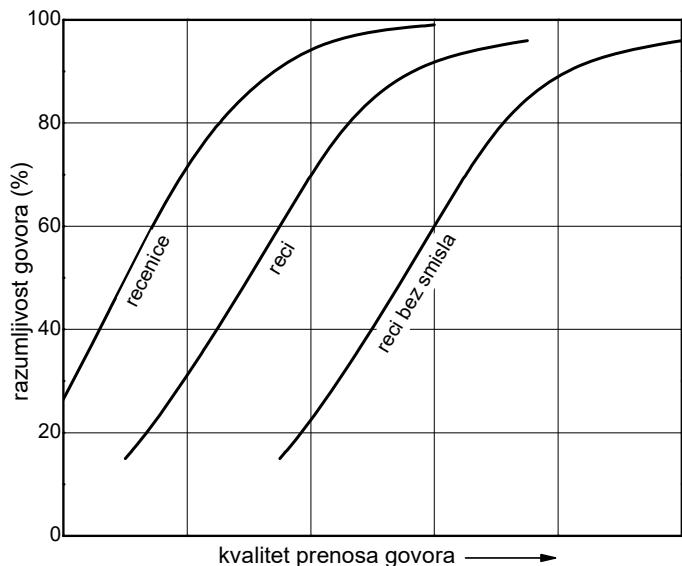
Slika 10.10 – Uticaj ispravnosti sadržaja rečenice na njenu razumljivost:

LP – rečenice sa lako predvidivim sadržajem, AZ – rečenice sa izvesnom anomalijom u značenju, NP – rečenice koje nemaju nikakvu predvidivost jer se napravljene slučajnim ređanjem reči

Dijagrami pokazuju uticaj mehanizama percepcije govora na njegovo prepoznavanje u slučaju degradacije u prenosu. Vidi se da pri slušanju logički ispravne rečenice slušaoci detektuju izgovoren sadržaj pri nižem kvalitetu prenosa nego u slučaju rečenice formirane bez ikakvog smisla. Rezultat pokazuje sposobnost mehanizma prepoznavanja da u izvesnoj meri nadoknaditi fizičke nedostatke u govornom signalu na bazi sagledavanja ukupnog smisla izgovorenog. Prepoznavanje konteksta izgovorenog teksta donosi određeni dobitak u procesu percepcije govora, čak i ako svi glasovi u govornom signalu nisu tačno prepoznati. Dijagram pokazuje da se rečenica koja je ispravna, ali sa nelogičnim značenjem, teže prepozna nego rečenica sa logičkim smislom. Na primer, u eksperimentu čiji je rezultat prikazan ta rečenica sa neočekivanim smislim (na dijagramu označena sa NP) bila je „Patke jedu staru traku“.

Na mehanizam percepcije i kvalitet razumljivosti utiče i globalna forma govora. Jedna ilustracija toga prikazana je na slici 10.11. Kada se slušaju rečenice za njihovu visoku razumljivost dopuštena je izvesna degradacija govornog signala pri prenosu, jer se na osnovu prepoznatog smisla lako mogu prevazići nedostaci u detekciji pojedinačnih

glasova, ali i celih reči. Međutim, u slučaju prenosa izolovanih reči za istu razumljivost potrebno je obezbediti viši kvalitet prenosa, to jest manju degradaciju signala. Izolovane reči se mogu prepoznati kada je neki od glasova u njima oštećen jer one postoje memorisana kod slušaoca. Najzad, u slučaju izgovora reči bez smisla prepoznavanje izgovorenog teksta je moguće samo u okolnostima kada je omogućeno prepoznavanje svakoj pojedinačnog glasa, a za to je potreban dovoljno visok nivo kvaliteta prenosa. Iz toga dalje sledi da samo reči bez smisla mogu dati izvesnu objektivnost u oceni kvaliteta prenosnog kanala bez uticaja sofisticiranih mehanizama percepције koji nadoknađuju nedostatke u govornom signalu.



Slika 10.11 – Uticaj forme govora na razumljivost izgovorenog sadržaja

Metoda koja se koristi za merenje kvaliteta kanala za prenos govora i kvantifikovanje razumljivosti zasnovana je na emitovanju posebno sastavljenih reči bez smisla koje se nazivaju logatomi. Proces merenje se zasniva na emitovanju logatoma na ulazu u prenosni kanal i beleženju onoga što se čuje na mestu prijema. Nakon tога se utvrđuje procenat tačno primljenih logatoma i taj podatak izražen u procentima predstavlja ocenu kvaliteta prenosa govora koji se naziva „logatomska razumljivost“.

Logatomi se posebno dizajniraju za potrebe merenja razumljivosti na svakom jeziku ponaosob i obično se sastoje od tri ili četiri glasa u redosledu konsonant - vokal - konsonant (CVC) ili konsonant - vokal - konsonant - vokal (CVCV). Na primer: „vava“, „daga“, „depu“, „đače“, „rora“, itd. Logatomi se prave u grupama od po 50 ili 100. Pri tome se grupe tako formiraju da budu fonetski balansirane (PB word – Phonetically Balanced word), što znači da je u jednoj grupi logatoma koju čini 50 ili 100 reči statistika zastupljenosti pojedinih glasova ista kao u običnom govoru. Testiranje razumljivosti prenosnih kanala kao što su amfiteatri ili sistemi za ozvučavanje vrši se sa 5-10 takvih grupa da bi se omogućila statistička regularnost rezultata.

Logatomska razumljivost je apsolutni pokazatelj kvaliteta prenosa govora jer se dobija neposrednim slušanjem, ali se njena primena u praksi suočava s nekoliko problema. Prvo, za merenje je neophodna dovoljno velika grupa ljudi koji su voljni da budu slušaoci, što

zahteva da se u dovoljno dugom trajanju obezbedi njihovo prisustvo i učešće u merenju. Drugi problem je što takvo merenje relativno dugo traje. Na primer, ako se koristi deset grupa sa po 50 logatoma merenje razumljivosti traje oko jedan sat. Toliko vremena je potrebno da se pročita 500 logatoma sa dovoljno dugim pauzama između njih kako bi slušaoci zapisali ono što su čuli. Treće, takvo duže angažovanje slušalaca uglavnom podrazumeva da oni budu plaćeni za taj trud. To su sve razlozi zbog kojih se merenje logatomske razumljivosti u praksi primenjuje vrlo retko. Šta više, može se reći da predstavlja izuzetak, to jest specijalni slučaj. Najzad, nije zanemarljivo ni to što ne postoji metod za predikciju logatonske razumljivosti na osnovu poznatih fizičkih osobina prenosnog kanala, to jest za njen proračun, pa zbog toga ona nije primenjiva u projektovanju.

Indeks prenosa govora (STI)

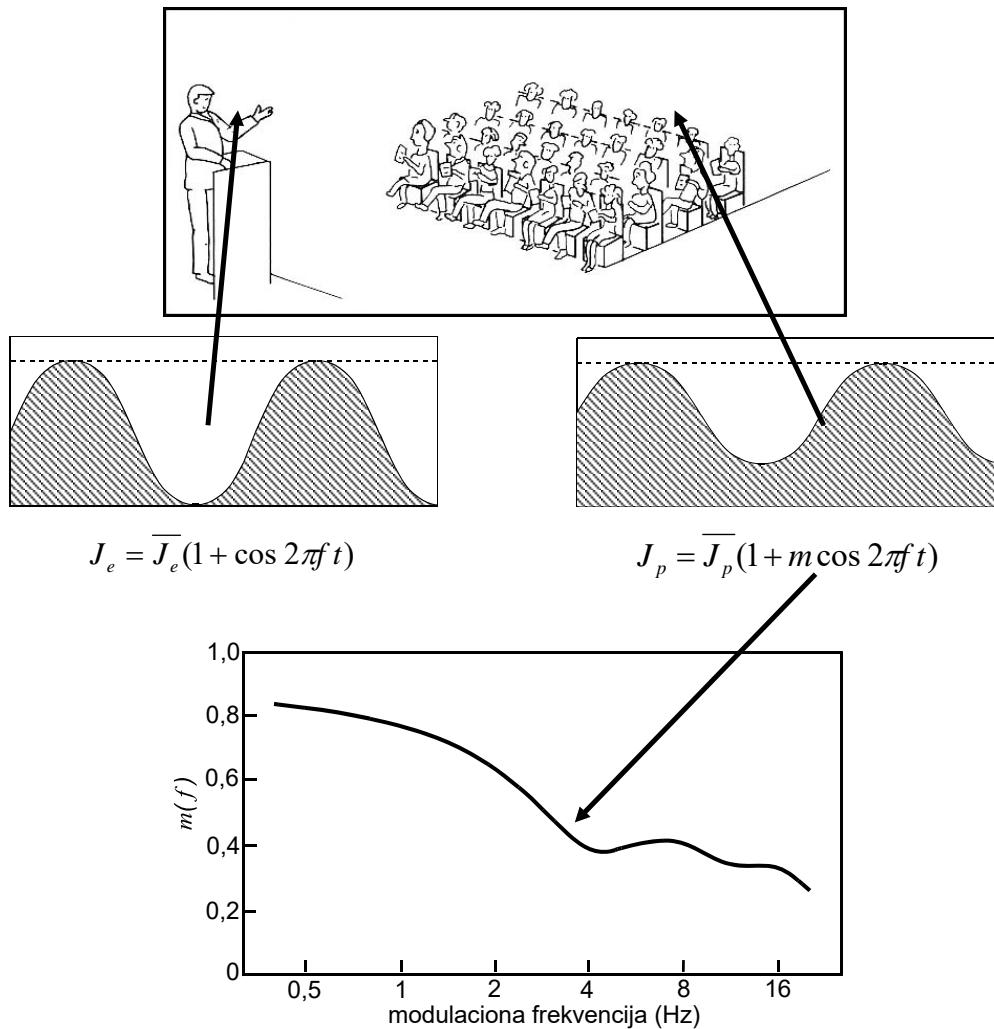
Složenost merenja logatomske razumljivosti iniciralo je traganje za nekim drugim numeričkim parametrom koji je dovoljno dobro korelisan sa njom da se može koristiti za ocenu razumljivosti govora. To podrazumeva da se vrednost tog parametra dobija emitovanjem kroz prenosni kanal nekog veštačkog signala i upoređivanjem poslatog i primljenog signala.

U analizi govornih signala pokazano je da za razumljivost govora bitno da se očuva njegova obvojnica, a da je osnovni signal ispod te obvojnice od manjeg značaja. Jedan dokaz toga je činjenica da postoji šapat kao oblik govora, kod koga je noseći signal samo šum, a podjednako je razumljiv. To pokazuje da priroda signala koji služi kao nosilac u procesu amplitudske modulacije nije od presudnog značaja za sadržaj govornih informacija i da se i pri drastičnim promenama nosećeg signala održava prepoznatljiv govorni sadržaj.

Prekrivanje govornog signala refleksijama i šumom (bukom) prikazano na slici 10.9 prevashodno donosi degradaciju obvojnice. Sa aspekta govornog signala to znači smanjenje amplitudske modulacije koju taj signal ima. U tom smislu može se posmatrati spektar modulišućeg signala koji je amplitudskom modulacijom formirao obvojnicu i pratiti njegove promene u prenosnom kanalu. Zbog toga se u kvantifikovanju stepena degradacije govora pokazala potreba za veličinom koja je indikator degradacije amplitudske modulacije prenošenog govornog signala. U teoriji je definisana modulaciona funkcija prenosa (MFP), koja opisuje izobličenje obvojnica amplitudsko modulisanog signala nakon prolaska kroz kanal. Ona predstavlja karakteristiku prenosnog kanala i pokazuje smanjenje dubine modulacije koje nastaje pri prenosu. MFP može imati vrednosti u intervalu od 0 do 1, pri čemu vrednost 1 znači potpuno očuvanje modulacije, a 0 njenu potpunu degradaciju.

Da bi se MFP kao funkcija prenosa mogla uvesti, neophodno je da sistem bude linearan sa aspekta prenosa obvojnica signala. U akustičkim sistemima prenosa takav uslov linearnosti je u akustičkom domenu zadovoljen za intenzitet zvuka, a u električnom domenu za energiju signala. Zbog toga se ispitivanje MFP može realizovati tako što bi se

prenosni kanala pobuđivaо signalom kod koga je energija sinusno modulisana. Ako se pri tome uvede modulacija 100%, na priјemu se direktno može sagledati smanjenje dubine modulacije, a to je vrednost MFP.



Slika 10.12 – Ilustracija uz objašnjenje smanjenja indeksa modulacije pri prenosu govora na primeru jedne slušaonice

Ovaj princip je šematski prikazan na slici 10.12 za slučaj jedne slušaonice u kojoj je naznačena promena MFP pri prenosu govora od govornika do slušaoca. Ako se na mestu govornika emituje signal koji stvara sinusoidalno promenjivi intenzitet, onda se emitovani intenzitet može prikazati izrazom:

$$J_e = \overline{J}_e(1 + \cos 2\pi f t) \quad (10.1)$$

gde je \overline{J}_e srednja vrednost emitovanog intenziteta, a f je modulišuća frekvencija. Podrazumeva se da je modulišuća frekvencija u opsegu frekvencija koje su prisutne u obvojnici govornog signala sa slike 10.4, odnosno 10.5.

Na mestu prijema će usled raznih fizičkih uticaja tokom prenosa dubina modulacije smanjiti, što je simbolično prikazano na slici. Za intenzitet je svojstveno da će se i nakon različitih fizičkih uticaja zadržati sinusoidalni oblik obvojnice jer nema promena u spektralnom sadržaju zvuka. Takva osobina je direktna posledica linearnosti sistema. Prijemni intenzitet sa smanjenim stepenom modulacije može se predstaviti izrazom:

$$J_p = \overline{J_p} (1 + m \cos 2\pi f t) \quad (10.2)$$

gde je $\overline{J_p}$ srednja vrednost intenziteta na mestu prijema.

Vidi se da je u izrazu (10.2) degradacija modulacije nakon prenosa definisana veličinom m koja ima vrednosti u opsegu (0,1). Vrednost 0 znači da je „izbrisana“ svaka amplitudska modulacija, a vrednost 1 da je ona potpuno očuvana. Veličina m u izrazu (10.2) karakteriše prenosni kanal u pogledu kvaliteta prenosa obvojnica, i to je MFP prenosnog kanala. Činjenica da smanjenje dubine modulacije na prijemnom mestu znači da će biti degradiran govorni sadržaj ugrađena je u definiciju parametra koji se naziva indeks prenosa govora (STI – *Speech Transmission Index*). Samo je pitanje matematičke konstrukcije kojom se od vrednosti MFP sa slike 10.12 dolazi do numeričkog parametra koji je indikator razumljivosti govora. Prema tome, ocena kvaliteta prenosa govora može se zasnovati na emitovanju zvuka amplitudsko modulisanog intenziteta i merenju smanjenja dubine modulacije.

Vrednost m u opštem slučaju predstavlja funkciju modulišuće učestanosti kao što je naznačeno na slici 10.12. U opštem slučaju degradacija obvojnica uvek će biti veća na višim modulišućim frekvencijama. Za objašnjenje takve pojave može poslužiti prikaz sa slike 10.9. Što je brža promena amplitude obvojnica, to je veća promena usled prekrivanja zakasnelim refleksijama.

Kada su refleksije jedini izvor degradacije obvojnica, što je slučaj u tihim prostorijama, MFP je monotono opadajuća funkcija modulišuće frekvencije. Takav oblik je naznačen i na slici 10.12. Za razliku od refleksija, uticaj ambijentalne buke nije frekvencijski zavistan, što je jasno sa slike 10.9, već je samo funkcija odnosa signal/šum. Prekrivanje delova manjih amplitude je u tom slučaju jednak, bez obzira na modulišuću frekvenciju. U takvom slučaju je MPF:

$$m = \left[1 + 10^{-\frac{(S/N)}{10}} \right]^{-1} \quad (10.3)$$

MFP se u prostoriji može izraziti i preko impulsnog odziva. Za slučaj kada je nivo ambijentalne buke dovoljno nizak pa se ometanje vrši samo reflektovanim zvukom, ona je:

$$m(f) = \frac{\left| \int_0^\infty h^2(t) e^{j2\pi ft} dt \right|}{\int_0^\infty h^2(t) dt} \quad (10.4)$$

gde je $h(t)$ impulsni odziv prostorije. Izraz u imenocu je konstanta koja predstavlja ukupnu energiju impulsnog odziva, a u brojiocu je moduo Furijeove transformacije kvadrata impulsnog odziva. Prema tome, MFP je Furijeova transformacija impulsnog odziva normalizovana na njegovu ukupnu energiju. Ako u prostoriji postoji i buka koja stvara poznati odnos signal/buka, onda je na osnovu izraza (10.3) i (10.4):

$$m(f) = \frac{\left| \int_0^\infty h^2(t) e^{j2\pi ft} dt \right|}{\int_0^\infty h^2(t) dt} \left[1 + 10^{-\frac{(S/N)}{10}} \right]^{-1} \quad (10.5)$$

Prema tome, u svim okolnostima u kojima se za neki prenosni kanal mogu meriti ili izračunati impulsni odziv i odnos signal/šum moguće je odrediti i MFP.

Na osnovu toga utvrđena je procedura kojom je izvedena jednobrojna vrednost indeksa prenosa govora. Naime, sve degradacije govornog signala koje se javljaju u prostorijama, bez obzira na vrstu, deluju u istom smislu tako što smanjuju njegovu dubinu modulacije, kao što deluju u istom smislu smanjujući razumljivost govora. Na osnovu toga je uvedena pretpostavka da se u svim okolnostima uticaja nekih smetnji to može svesti na neki ekvivalentni odnos signal/šum koji bi stvarao istu degradaciju obvojnica. Za utvrđenu vrednosti MFP taj ekvivalentni odnos je:

$$(S/N)_{ekv} = 10 \log \left[\frac{m(t)}{1-m(t)} \right] \quad (10.6)$$

Pošto je MFP u prostorijama frekvencijski zavisna, njena analiza se vrši po opsezima 1/3 oktave modulišuće frekvencije. Podatak o jedinstvenoj vrednosti MFP se dobija kao srednja vrednost za sve te opsege u rasponu frekvencija koje su od značaja za obvojnicu govornog signala. Sa slikama 10.5 i 10.6 vidi se da takvih opsega ima 14, i to od 0,63 Hz do 12,5 Hz. Tako je srednja vrednost ekvivalentnog odnosa signal/šum:

$$\overline{(S/N)_{ekv}} = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} (S/N)_{ekvi} \quad (10.7)$$

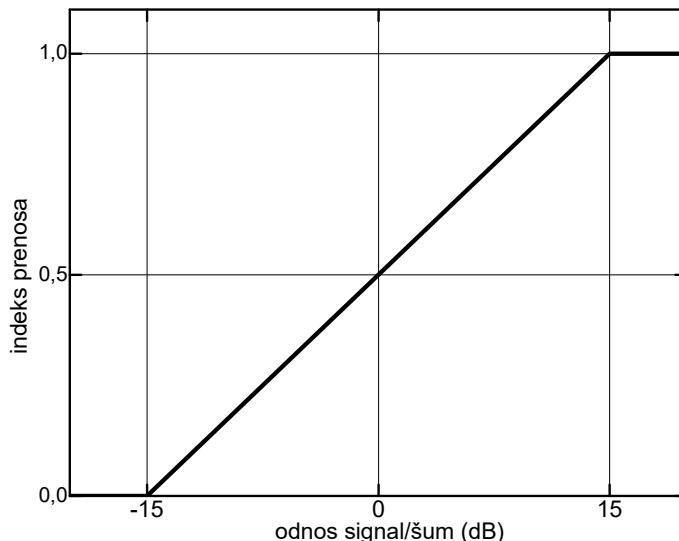
Dinamika govornog signala se uobičajno kreće u opsegu ± 15 dB oko njegove efektivne vrednosti (za razliku od muzičkih signala kod kojih je dinamički opseg mnogo veći). To znači da se uticaj smetnje na govorni signal menja samo kada se odnos signal/šum kreće u intervalu ± 15 dB. Kada je taj odnos bolji od 15 dB, smetnja više nema uticaja na kvalitet govornog signala. S druge strane, ako je odnos signal/šum lošiji od -15 dB govor postaje

sasvim nerazumljiv i dalje pogoršanje tog odnosa nema uticaja na kvalitet njegovog prijema. Zbog toga i ekvivalentni odnos signal/šum dobijen izrazom (10.7) ima smisla samo u intervalu ± 15 dB. Zbog toga se u procesu dobijanja vrednosti indeksa prenosa govora vrši ograničavanje ekvivalentnog odnosa signal/šum na taj interval.

Koristeći ograničenu vrednost odnosa signal/šum definisana je veličina koja se naziva indeks prenosa (IP) koja je:

$$IP = \frac{\overline{(S/N)_{ekv}} + 15}{30} \quad (10.8)$$

Ovim izrazom je opseg vrednosti ekvivalentnog odnosa signal/šum koji je ± 15 dB sveden na opseg indeksa prenosa (0,1). Ova zavisnost je prikazana i dijagramom na slici 10.13.



Slika 10.13 – Indeks prenosa u funkciji ekvivalentnog odnosa signal/šum

Pošto su uticaji prostorije na MFP frekvencijski zavisni, indeks prenosa prema izrazu (10.8) mora se posmatrati po oktavnim opsezima nosećeg signala. Za govorni signal relevantni su oktavni opsezi od 125 Hz do 8 kHz. Ako se vrednost IP odredi za sve ove oktavne opsege, dobija se opšta slika o uticajima koji smanjuju kvalitet prenosa govora. Sa tom idejom izvedena je konačna definicija indeksa prenosa govora. On predstavlja zbirni podatak o vrednostima IP po oktavama uzimajući pri tome u obzir težinske faktore koji odsliskavaju značaj svake od oktava u razumljivosti govora. Tako je po definiciji indeks prenosa govora:

$$STI = \sum_{i=1}^7 W_i (IP)_i \quad (10.11)$$

gde su W_i težinski faktori oktava. Usvojene vrednosti težinskih faktora su prikazane u Tabeli 10.2. Vidi se da najveće težinske faktore imaju oktave na 2 kHz i 4 kHz.

Tabela 10.2 – Težinski faktori po oktavama za izračunavanje STI

Hz	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
W_i	0,13	0,14	0,11	0,12	0,19	0,17	0,14

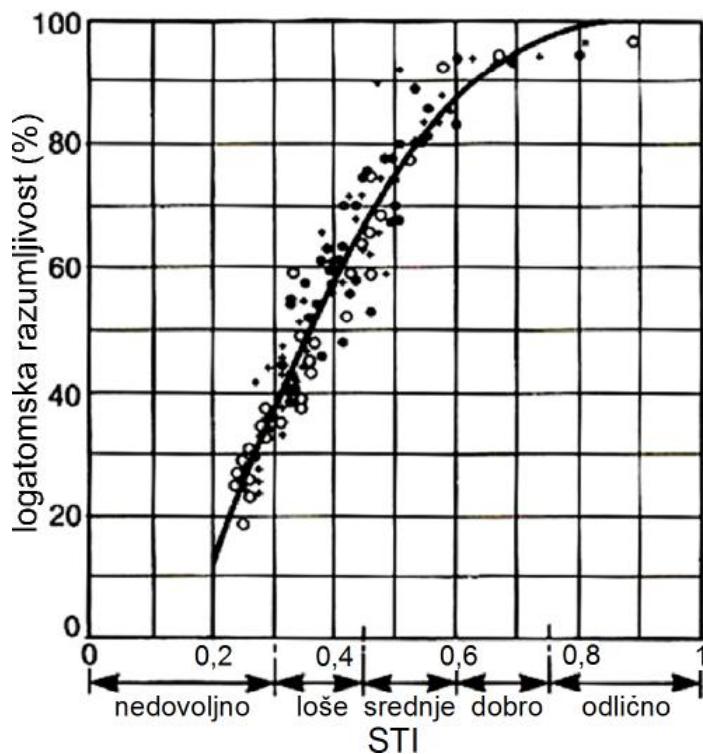
Prema tome, da bi se opisanom metodologijom odredila vrednost STI potrebno je u sedam oktava na 14 modulišućih frekvencija odrediti vrednosti MFP. Zbirni pregled svih frekvencija prikazan je u Tabeli 10.3. Iz tabele se vidi da izračunavanje STI zahteva prethodno određivanje 98 vrednosti MFP.

Tabela 10.3 – Pregled modulišućih frekvencija po oktavnim opsezima za koje se mora odrediti MFP da bi se dobila vrednost STI

modulišuće frekvencije	oktavni opsezi						
	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
0,63 Hz							
0,8 Hz							
1,0 Hz							
1,25 Hz							
1,6 Hz							
2,0 Hz							
2,5 Hz							
3,15 Hz							
4,0 Hz							
5,0 Hz							
6,3 Hz							
8,0 Hz							
10,0 Hz							
12,5 Hz							

Uporedno merenje STI i logatomske razumljivosti u različitim okolnostima i sa različitim prenosnim kanalima pokazalo je da postoji dobra korelacija između ove dve veličine. Rezultat takvih testova prikazan je na slici 10.14. Zahvaljujući toj činjenici STI je postao standardna veličina za merenje i ocenu kvaliteta prenosa govora. Mogućnost merenja impulsnog odziva u svim praktičnim okolnostima i metode simulacije kojim se impulsni odziv može proračunati omogućili su da se STI koristi za ocenu realnih kanala i za predikciju u fazi projektovanja. Za svaku izmerenu ili izračunatu vrednost STI moguće je sa dijagrama sa slike 15 odrediti vrednost logatomske razumljivosti koja se može očekivati u posmatranim okolnostima. Na osnovu toga su utvrđeni opsezi vrednosti STI označeni na dijagramu duž ose za pojedine nivoje kvaliteta prenosa govora. Vidi se da

odlična razumljivost govora, što zahteva preko 95% logatomske razumljivosti, nastaje kada je u kanalu vrednost STI veća od 0,75.



Slika 10.14 – Korelacija između vrednosti STI i logatomske razumljivosti izmerenih u različitim okolnostima i sa različitim prenosnim kanalima

Da bi se u nekim okolnostima pojednostavila procedura merenja definisan je jedan skraćeni postupak koji kao rezultat daje parametar nazvan RASTI (*RApid Speech Transmission Index*). RASTI podrazumeva pojednostavljenje tako što se uzimaju vrednosti MFP samo u oktavama na 500 Hz i na 2 kHz, i to u redukovnom broju terci modulišuće frekvencije prikazanim u Tabeli 10.4. U oktavi na 500 Hz to su modulišuće frekvencije 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz, 8 Hz, a u oktavi na 2 kHz to su 0,7 Hz, 1,4 Hz, 2,8 Hz, 5,6 Hz i 11,2 Hz, što je ukupno 9 vrednosti. Težinski ideo dve korišćene oktave uzet je u obzir tako što se koriste različiti pobudni nivoi signala, pa se tako u oktavi na 2 kHz signal pri merenju MFP podešava da bude za 9 dB niži od signala na 500 Hz.

RASTI parametar se pojavio osamdesetih godina dvadesetog veka i tada je imao značaja zbog toga što je najveći deo mernog lanca bio u analognoj tehnologiji. Svođenjem čitave procedure merenja na softver u nekom računaru jednostavnost izračunavanja RASTI u odnosu na STI je izgubila na značaju.

Tabela 10.4 – Pregled modulišućih frekvencija i oktavnih opsega za koje se određuje MFP da bi se dobila vrednost RASTI

modulišuće frekvencije	oktavni opsezi						
	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
0,63 Hz							
0,8 Hz							
1,0 Hz							
1,25 Hz							
1,6 Hz							
2,0 Hz							
2,5 Hz							
3,15 Hz							
4,0 Hz							
5,0 Hz							
6,3 Hz							
8,0 Hz							
10,0 Hz							
12,5 Hz							

11. ZVUČNO POLJE U PROSTORIJAMA

Akustički pojam prostorije podrazumeva fizički ograničenu formu vazdušnog prostora. Prostorna ograničenost posledica je postojanja građevinskih pregrada sa svih strana: zidova, plafona, poda. Bez obzira na vrstu materijala od kojih su te pregrade napravljene, sve površine u prostoriji predstavljaju veliki diskontinuitet impedanse u odnosu na impedansu vazduha. Zbog toga se pri prostiranju zvuka kroz prostoriju dešavaju sukscesivni procesi refleksija na graničnim površinama. Pri svakom nailasku na granične površine zvučna energija se vraća reflektujući se nazad u prostoriju. Pri tome postoji energetski gubitak koji se kvantifikuje vrednostima koeficijenta apsorpcije graničnih površina.

Postojanje reflektovane zvučne energije koju čine brojne refleksije predstavlja osnovnu odliku prostorije kao akustičkog prenosnog sistema. Upravo reflektovana zvučna energija glavna je tema kojom se bavi oblast nazvana akustika prostorija. Predmet interesovanja je vremenska struktura reflektovane energije koja stiže u prijemnu tačku (impulsni odziv) i ukupni nivo reflektovane energije koja predstavlja energetski zbir svega što stiže do prijemne tačke u prostoriji (nivo reflektovanog zvuka). Akustika prostorija se bavi merenjem i modelovanjem impulsnih odziva i nivoa reflektovanog zvuka.

Može se reći da je prostorija u akustičkom domenu suprotnost slobodnom prostoru. Kada u slobodnom prostoru radi zvučni izvor, u njemu su geometrijske granice zvučnog polja određene samo procesima slabljenja zvuka pri udaljavanju od izvora. Prostorni gabariti zvučnog polja određeni su dometima izvora, odnosno njegovom snagom. Za razliku od slobodnog prostora, kada zvučni izvor radi u prostoriji energija ostaje prostorno zarobljena u okviru graničnih površina, odnosno unutar zidova prostorije. Zbog toga su prostorni gabariti zvučnog polja u njih uvek isti, bez obzira na zvučni izvor i njegovu snagu.

Zvučno polje u prostorijama i njegove specifičnosti značajni su jer one predstavljaju mesto gde čovek živi i obavlja svoje profesionalne aktivnosti. Akustičke specifičnosti prostorije posebno su značajne kada ona ima ulogu prenosnog sistema između zvučnih izvora i čula sluha slušaoca. Zbog toga se karakteristike zvučnog polja u prostorijama moraju vrednovati i sa aspekta čovekovog čula sluha. Prostорије су takoђе место где се звук користи као израžајно средство уметности, па се зvučno полje у њима повремено вреднује и са аспекта естетике зvučне слике. Питање естетике nameće у инженерском домену један специфичан аспект, јер се физичке карактеристике зvučног полja анализирају

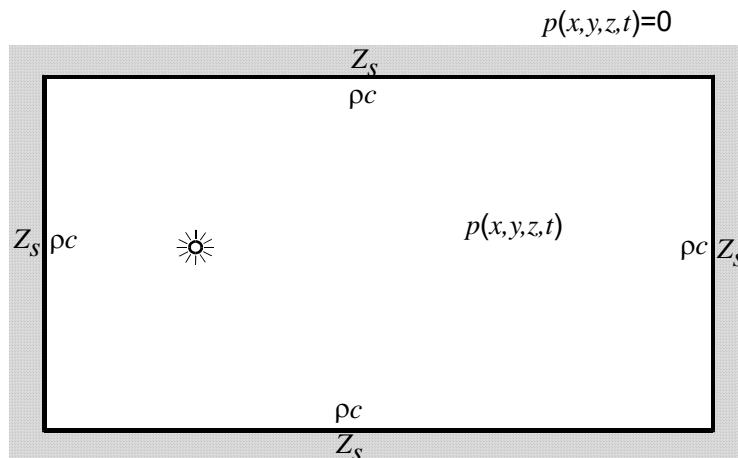
kroz prizmu čovekovog subjektivnog doživljaja zvuka, što izlazi izvan okvira objektivnog fizičkog sveta.

11.1 Akustički odziv prostorije

Šematska ilustracija akustičkog pojma prostorije prikazana je na slici 11.1. U unutrašnjosti prostorije je vazduh, pa na svim graničnim površinama važi:

$$\rho c \ll Z_s \quad (11.1)$$

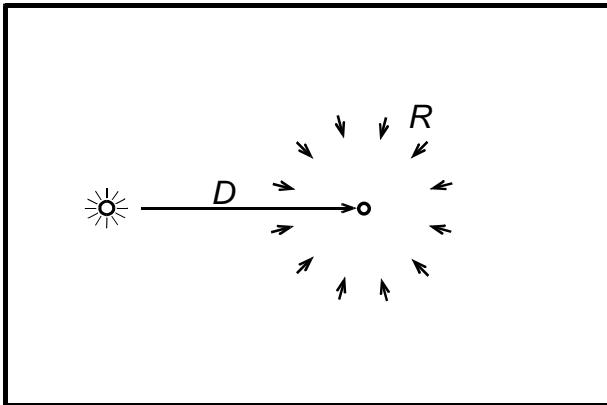
Granice zvučnog polja u prostoriji uvek su unapred zadate geometrijom njenih graničnih površina. Zbog toga važi relacija $p(x,y,z) = 0$ za svaku tačku (x,y,z) izvan vazdušnog volumena prostorije. Moguće referentne tačke posmatranja zvučnog polja u prostoriji uvek se nalaze u njenoj unutrašnjosti. Eventualni prodori zvučne energije van prostorije, kada energija dospeva u tačke izvan koordinata prostorije, smatruju se zanemarljivim. Za posmatrača u prostoriji takvi gubici imaju isti smisao kao i svaki drugi energetski gubitak nastao nekim disipativnim mehanizmima (apsorpcija pri refleksijama, disipacija u vazduhu).



Slika 11.1 - Ilustracija uz objašnjenje pojma prostorije.

Kada u prostoriji radi zvučni izvor u njoj se mogu prepoznati dve komponente zvučnog polja. Prva je direkstan talas, to jest direkstan zvuk, a druga je sva ostala energija koja dospeva u prijemnu tačku prethodno se reflektujući jednom ili više puta i koja se zbirno naziva reflektovan zvuk. Priroda direktnog (D) i reflektovanog zvuka (R) šematski je ilustrovana na slici 11.2. Direkstan talas je onaj koji najkraćim putem dolazi od izvora do prijemne tačke. On je po svojim osobinama isti kao zvuk koji bi dolazio do prijemnika kada bi se izvor nalazio u slobodnom prostoru. Zbog toga za direkstan zvuk važe ranije pokazani zakoni prostiranja zvuka u slobodnom prostoru.

Direkstan talas slabi sa udaljavanjem od izvora po zakonu "6 dB", pa je intenzitet direktnе komponente zvučnog polja u prostoriji:



Slika 11.2 – Simbolički prikaz direktnog (D) i reflektovanog zvuka (R) u prostoriji.

$$J_D = \frac{P_a}{4\pi r^2} \quad (11.2)$$

a pritisak:

$$r_D = \sqrt{\frac{P_a \rho c}{4\pi r^2}} \quad (11.3)$$

U gornjim izrazima P_a je zvučna snaga izvora, a r je rastojanje između izvora i prijemne tačke. Gornji izrazi se mogu prevesti u nivo direktnog zvuka:

$$L_D = L_w - 20 \log r - 11 dB \quad (11.4)$$

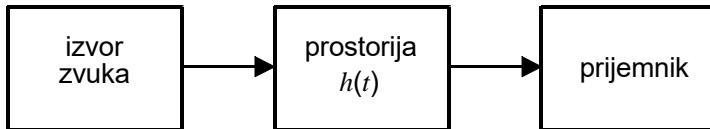
Prema tome, nivo direktnog zvuka koji u prostoriji stiže do prijemne tačke promenljiva je komponenta zvučnog polja koja se smanjuje sa porastom rastojanja od izvora. Promena intenziteta i nivoa direktnog zvuka ranije su prikazane na slici 2.5.

Pojam reflektovanog zvuka podrazumeva svu onu zvučnu energiju koja stiže u prijemnu tačku zato što joj zidovi ne dozvoljavaju da ode dalje već se refleksijama vraća i ostaje u prostoriji kružeći po njoj. Zbog konačnosti brzine prostiranja zvuka komponente koje se reflektuju od graničnih površina pre nego što stignu u prijemnu tačku manje ili više kasne u odnosu na direktan zvuk, pa odziv prostorije karakteriše "razvlačenje" energije u vremenu. Za razliku od direktnog zvuka, reflektovana zvučna energija stiže u prijemnu tačku sa svih strana zbog stohastičnosti kretanja refleksija kroz prostor, što je na slici 11.2 simbolički označenom strelicama.

Impulsni odziv prostorije

Odziv prostoje na zvučnu pobudu posmatra se preko njenog impulsnog odziva $h(t)$, pri čemu se prostorija posmatra kao sistem prenosa čiji je ulaz na mestu zvučnog izvora, a izlaz na mestu prijemnika. Na slici 11.3 šematski je prikazana prostorija kao sistem prenosa. Za razliku od električnih sistema prenosa u telekomunikacijama gde su ulaz i izlaz jasno definisani i ne zavise od prostornih koordinata, ovde su i ulaz i izlaz sistema prenosa zadate svojim koordinatama kao tačke u prostoru. Zbog toga je impulsni odziv

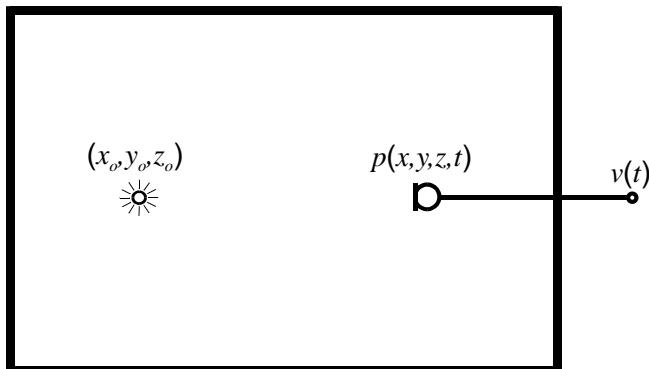
funcija položaja predajne i prijemne tačke, pa se često koristi oznaka $h(r | r_0, t)$, gde je r vektor položaja prijemnika, a r_0 vektor položaja izvora. Time se odziv vezuje za tačno određeni par tačaka za koje je definisan.



Slika 11.3 – Šematski prikaz prostorije kao prenosnog sistema sa njenim impulsnim odzivom.

U jednoj prostoriji mogu se formirati različiti sistemi prenosa menjajući samo koordinate ulaza i izlaza, odnosno menjanjem položaja zvučnog izvora i prijemnika. Za svaki odabrani par ovih tačaka u istoj prostoriji impulsni odzivi se u izvesnoj meri razlikuju. Zbog statističkih osobina reflektovanog zvuka razlike u impulsnim odzivima koje nastaju pri promenama koordinata izvora i prijemnika u okviru jedne prostorije globalno nisu velike. Razlike se uglavnom ispoljavaju u detaljima, ali ipak postoje.

Uobičajeni način posmatranja impulsnog odziva prostorije je postavljanjem zvučnog izvora i mikrofona u prethodno definisane tačke. Odziv prostorije se posmatra analizom dobijenog električnog signala na izlazu iz mikrofona kada se ona iz izvora pobudi Dirakovim impulsom. Ovakav postupak je šematski prikazan na slici 11.4. Odziv prostorije je definisan zvučnim pritiskom na mestu mikrofona $p(x, y, z, t)$, a analiza se vrši posmatranjem signala $v(t)$ koji se javlja na izlazu mikrofona kada na njega deluje taj pritisak.



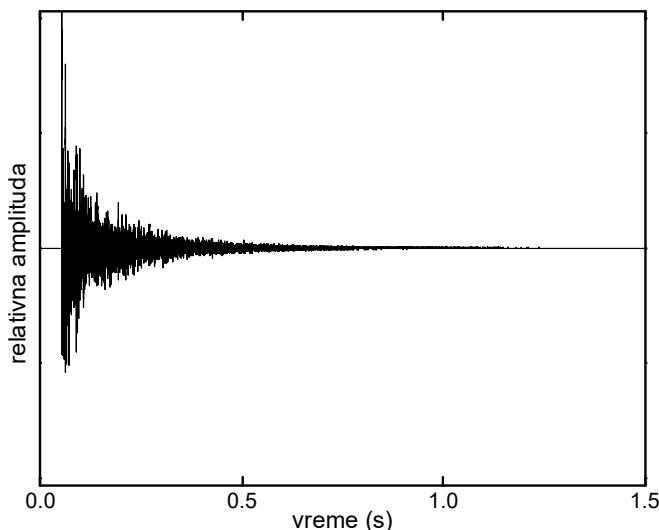
Slika 11.4 - Odziv prostorije i registrovani odziv u mikrofonskom signalu.

Trodimenzionalna priroda zvučnog polja u prostoriji i jednodimenzionalnost napona kao signala čine da uvek postoji razlika između električnog odziva na izlazu mikrofona i realnog odziva u zvučnom polju. Zvučni pritisak p koji deluje na mikrofon funkcija je komponenti polja koje dolaze sa raznih strana. Potpuna slika impulsnog odziva prostorije podrazumeva i pridružene informacije o pravcima nailaska pojedinih komponenti zvučne energije. Međutim, izlaz mikrofona svodi trodimenzionalno zvučno polje na jednodimenzionalni električni signal. Taj signal prikazuje vremenski i energetski odnos komponenti odziva, ali ne i prostorni. Činjenica je da čulo sluha čoveka može do izvesne

mere da percepira trodimenzionalnost zvučnog polja. To znači da signal iz mikrofona ne može da pokaže sve karakteristike zvučnog polja u prostoriji relevantne za subjektivni doživljaj pri slušanju.

Činjenica je da ne postoje dovoljno precizne metode detekcije pravaca nailaska zvučne energije na merni mikrofon. Pored toga, ne postoji način da se u dvodimenzionalnom prikazu u okviru jedne slike jasno predstave takve prostorne informacije. Unošenje prostornih koordinata pravaca nailaska komponenti odziva u nekakav jedinstven prikaz u ravni crteža, uz očuvanje čitljivosti tog crteža, predstavlja u opštem slučaju nerešiv problem. Zbog toga se analiza zvučnog polja u prostorijama zasniva na redukovanim zapisima odziva kao vremenske promene zvučnog pritiska u tački gde je postavljen mikrofon. U okolnostima kada je važno da se dobije neka informacija o prostornoj strukturi komponenti u odzivu razvijane su razne sofisticirane metode snimanja sa više mikrofona, kao na primer veštačkom glavom prikazanom na slici 9.26.

Tipičan izgled jednog impulsnog odziva prostorije prikazan je na slici 11.5. On počinje trenutkom stizanja direktnog zvuka u prijemnu tačku. U odzivu se na tom mestu na vremenskoj osi pojavljuje impuls koji predstavlja direktan zvuk. Sa aspekta posmatrača koji se nalazi u prijemnoj tački vreme koje je bilo potrebno da direktan zvuk stigne od izvora nije relevantno, pa je početni vremenski trenutak u impulsnom odzivu uvek startovan stizanjem direktnog zvuka. Sve ostale komponente koje se u odzivu vide nakon njega predstavljaju razne refleksije koje su stizale s manjom ili većom gustinom u vremenu i s manjim ili većim kašnjenjem u odnosu na direktan zvuk. Broj takvih komponenti koje postoje u impulsnom odzivu prostorije veoma je veliki, što se može jasno videti i na slici 11.5. Fizički proces formiranja sukscesivnog niza refleksija zvuka koje ispunjavaju impulsni odziv duž vremenske ose naziva se reverberacija. Reverberacija je osnovna karakteristika zvučnog polja u prostorijama.



Slika 11.5 - Jeden primer impulsnog odziva prostorije (snimljeno u sali "Beogradske filharmonije")

Kao što se vidi na slici 11.5, karakteristična osobina impulsnog odziva u prostorijama je obvojnica koja ima prepoznatljivi monotono opadajući tok koji asymptotski teži nuli. Konstantno smanjenje intenziteta komponenti odziva u vremenu posledica je činjenice

da se energija svakog zvučnog talasa pri prostiranju kroz prostoriju smanjuje delovanjem širenja talasnog fronta, gubicima usled apsorpcije pri svakoj refleksiji na graničnim površinama i delovanjem disipacije u vazduhu. Sa slike 11.5 se vidi da je oblik obvojnice približno eksponencijalan.

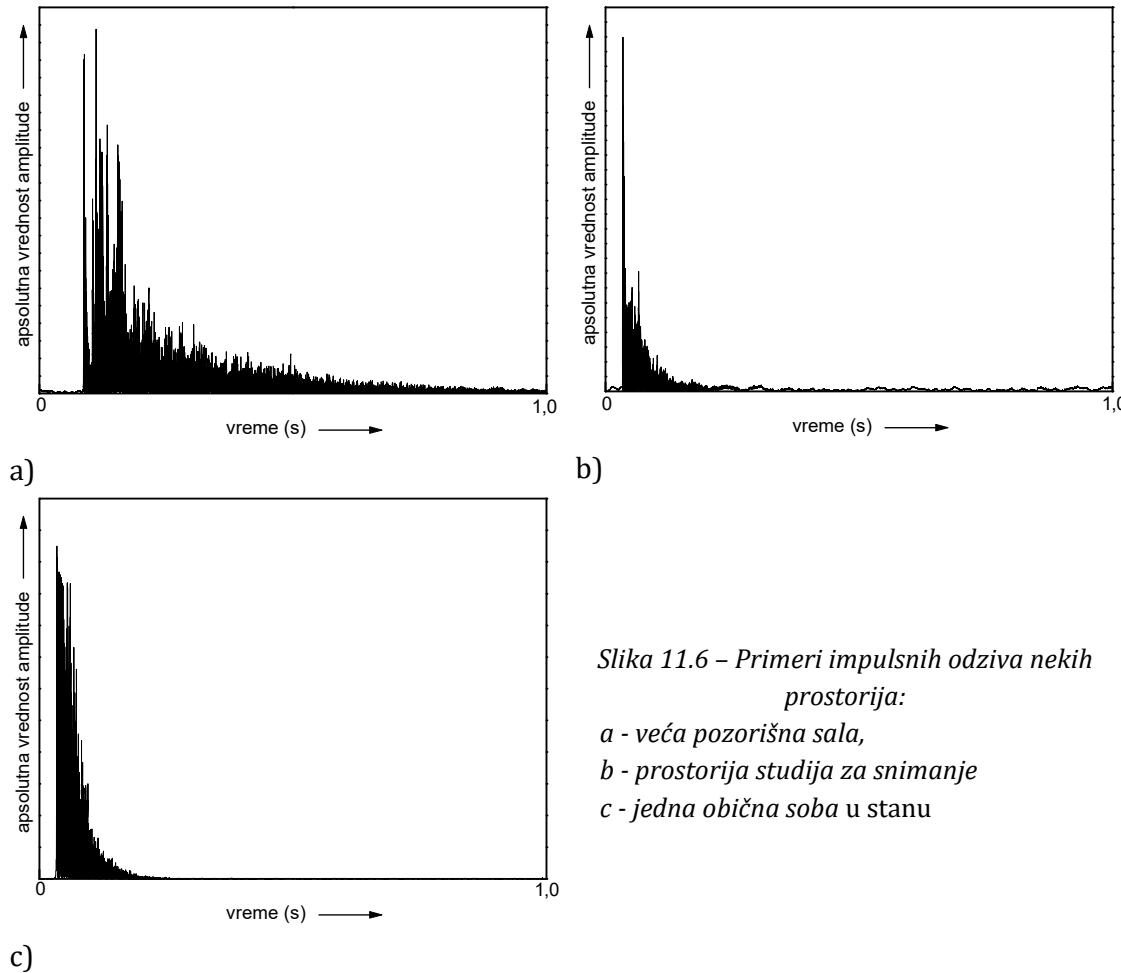
Prikaz impulsnog odziva kakav je na slici 11.5 predstavlja uobičajeni način prezentacije, i dobija se kao dijagram talasnog oblika signala sa izlaza mikrofona pri pobudi prostorije Dirakovim impulsom. Akustički impuls dirakovog tipa se subjektivno doživljava kao pucanj. Snimanje impulsnog odziva prostorija vrši se s pobudom pomoću raznih sredstava koja proizvode pucnjeve, kao što je startni pištolj, petarda, bušenje naduvanog balona, električna varnica itd. Za eventualne brze provere odziva moguće je prostoriju pobuditi i pljeskanjem rukama, ali je zvučna snaga takvog impulsa mala i sa neujednačenim spektralnim sadržajem pri ponavljanju. Postoje i sofisticirane metode merenja impulsnog odziva koje se zasnivaju na emitovanju kompleksnih signala (sekvenca maksimalne dužine, sinsuni signal čija frekvencija prebrisava čujni opseg) a impulsni odziv se izračunava odgovarajućom obradom signala snimljenog u prostoriji.

Brzina opadanja obvojnice impulsnog odziva diktirana je veličinom prostorije i sposobnostima površina da apsorbuju zvučnu energiju, što znači od materijalizacije njenih unutrašnjih površina. Najveće varijacije u formi impulsnog odziva od prostorije do prostorije javljaju se u njegovom trajanju, koji mogu biti kraći ili duži u vremenu, i u početnoj strukturi komponenti odmah nakon stizanja direktnog zvuka, što zavisi od veličine i drugih geometrijskih osobina prostorije. Na slici 11.6 prikazana su tri karakteristična oblika impulsnih odziva snimljenih u tri prostorije različite po veličini, nameni i materijalizaciji unutrašnjih površina. Pokazani primeri ilustruju realne varijacije u trajanju impulsnog odziva i u strukturi komponenti koje nailaze neposredno posle direktnog zvuka. Razmere na vremenskoj osi dijagrama izjednačene su da bi se omogućilo njihovo međusobno poređenje.

Na slici 11.6a prikazan je impulsni odziv snimljen u jednoj pozorišnoj sali sa pobudom na bini i prijemom na sredini gledališta (snimak je iz Jugoslovenskog dramskog pozorišta u Beogradu). Vidi se da odziv u sali relativno sporo opada u vremenu, što je karakteristično za velike prostorije. U njegovom početnom delu prepoznaje se više diskretnih komponenti koje predstavljaju pojedine relativno jake refleksije od zidova i plafona okobine. Na slici 11.6b prikazan je impulsni odziv snimljen u jednom studiju, što znači u prostoriji koja je prilagođena kvalitetnoj reprodukciji zvuka pomoću zvučnika. Ta prostorija je akustički obrađena, sa većim površinama pokrivenim materijalima koji apsorbuju zvuk. Zbog toga u njoj obvojnica impulsnog odziva, bez obzira na veličinu prostorije, brzo opada u vremenu. Direktan zvuk je ovde po svom relativnom nivou značajno iznad svih ostalih komponenti, što se uobičajeno zahteva u prostorijama takve namene.

Najzad, na slici 11.6c prikazan je impulsni odziv snimljen u jednoj običnoj boravišnoj sobi stana. Izvor zvuka je bio zvučnik prosečnog sistema za reprodukciju muzike, a prijemna tačka je bila na uobičajenoj poziciji slušaoca. I u ovom slučaju obvojnica impulsnog odziva

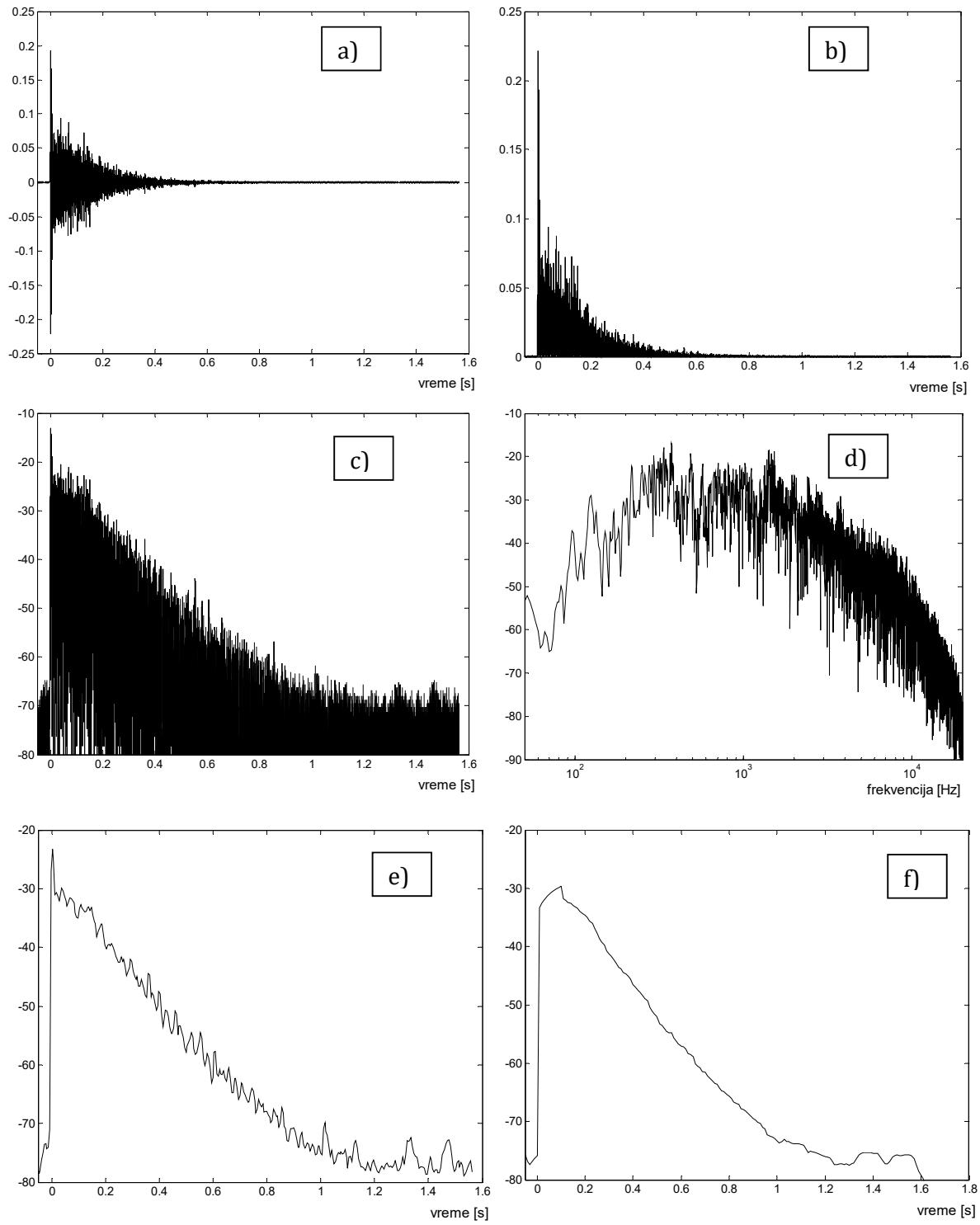
opada relativno brzo, što je karakteristično za male prostorije kao što su sobe u stanovima. Međutim, za razliku od akustički obrađenog studija, u ovom slučaju posle direktnog zvuka brzo stiže mnoštvo relativno jakih refleksija koje dolaze od akustički neobrađenih zidova i tavanice. Može se reći da te refleksije koje stižu neposredno nakon direktnog zvuka čine razliku između odziva u akustički obrađenoj prostoriji studija i neobrađenoj prostoriji stana.



*Slika 11.6 – Primeri impulsnih odziva nekih prostorija:
a - veća pozorišna sala,
b - prostorija studija za snimanje
c - jedna obična soba u stanu*

Načini prikazivanja impulsnog odziva prostorije

U akustičkoj analizi prostorija postoji nekoliko različitih opštih osobina impulsnog odziva koji se mogu prepoznati u njegovom obliku. Da bi se te osobine učinile vidljivijim, lakše prepoznale i kvantifikovale, u praksi je neophodno izvesno prilagođavanja grafičkog prikaza impulsnog odziva. Zbog toga se u procesu akustičke analize prostorije impulsni odziv uobičajeno grafički prikazuje na nekoliko načina koji se dobijaju određenim transformacijama. Osnovni oblik impulsnog odziva i standardni oblici njegovih transformacija ilustrovani su na slici 11.7.



Slika 11.7 - Načini prikazivanja impulsnog odziva prostorije: a - osnovni prikaz bipolarnog signala odziva, b - unipolarni prikaz kao apsolutna vrednost signala, c - isto kao b, samo sa logaritamskom razmerom po ordinati, d - spektralna karakteristika odziva, e - prikaz nivoa signala dobijenog usrednjavanjem 10 ms, f - isto kao e, samo sa usrednjavanjem 100 ms.

Osnovni prikaz impulsnog odziva kao bipolarnog signala dat je na slici 11.7a. To je isti odzv kao na slici 11.5. Prvi mogući oblik njegove transformacije je unipolarni prikaz. On se predstavlja u dve moguće razmere po ordinati: u linearnoj razmeri, kao na slici 11.7b, i u logaritamskoj razmeri, to jest kao relativni nivo, što je prikazano na slici 11.7c. Unipolarna predstava omogućava lakše sagledavanje strukture refleksija, njihovog relativnog odnosa i položaja na vremenskoj osi. Vidi se da korišćenje logaritamske razmere omogućava uvid u strukturu impulsnog odziva u mnogo većem rasponu amplituda.

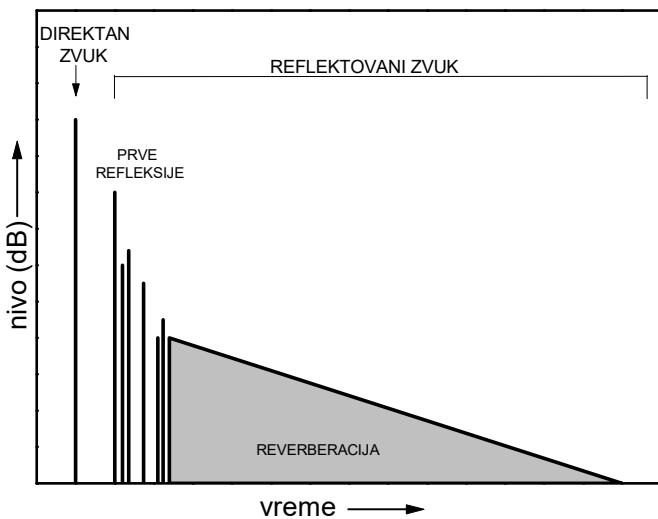
Furijeovom transformacijom osnovnog signala sa slike 11.7a dobija se prikaz odziva u frekvencijskom domenu, što je prikazano na slici 11.7d. Najzad, impulsni odziv se iz domena signala može transformisati u domen nivoa zvuka, pa se dobijaju prikazi kao na slikama 11.7e i 11.7f. Oblik odziva koji se tako dobija određen je primjenjenom periodom usrednjavanja koje se vrši pri izračunavanju efektivne vrednosti. Prikaz na slici 11.7e dobijen je s kratkim vremenom usrednjavanja 10 ms, a slika 11.7f sa usrednjavanjem 100 ms. Vidi se da povećavanje vrednosti perioda usrednjavanja kao rezultat daje glatkiju krivu obvojnice odziva. Na njoj se zbog toga gube detalji brzih fluktuacija nivoa, ali se zato dobija lakša preglednost opšteg toka opadanja nivoa što je za neke vrste analize značajno. Prikaz impulsnog odziva transformisanog u nivo signala često se u literaturi naziva kriva opadanja nivoa zvuka ili reverberaciona kriva.

Generalizovani oblik impulsnog odziva prostorije

Prikazani primeri snimljenih impulsnih odziva u raznim prostorijama omogućavaju da se prepoznaju neke opšte, zajedničke karakteristike svojstvene svakom odzivu snimljenom u nekoj prostoriji. Na osnovu toga se može nacrtati generalizovana forma impulsnog odziva prostorije kakva je prikazana na slici 11.8. Vidi se da se u njemu mogu prepoznati tri osnovne celine: direktni zvuk, prve refleksije i reverberacioni deo. Prve refleksije predstavljaju komponente koje slede neposredno posle direktnog zvuka i pri tome su dovoljno razmaknute na vremenskoj osi da se mogu prepoznati kao diskretne pojave. U primeru impulsnog odziva pozorišne sale, prikazanoga na slici 11.6a, jasno su vidljive takve prve refleksije. One su uvek lako prepoznatljive u impulsnom odzivu velikih prostorija, u raznim salama i velikim sobama. U malim prostorijama impulsni odziv je u celini sabijen u vremenu jer se refleksije brzo dešavaju zbog kratkih putanja između sukscesivnih refleksija. Zbog toga se pojedinačne prve refleksije u odzivu malih prostorija teže uočavaju.

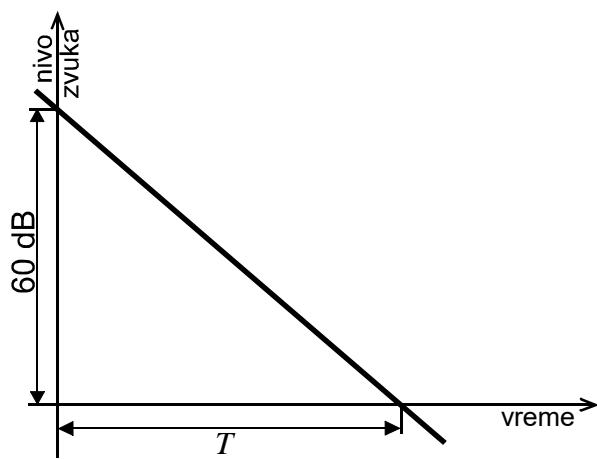
Gustina komponenti u impulsnom odzivu sukscesivno se povećava u vremenu, tako da u vremenskom nizu refleksija nakon sticanja direktnog zvuka postoji trenutak kada njihova gustina postaje veoma velika. Tada se više ne mogu razdvojiti pojedine refleksije kao nezavisne i prepoznatljive komponente odziva. Taj deo u kome su refleksije postale dovoljno guste naziva se reverberacioni deo, odnosno reverberacija (često u žargonu nazvan "reverberacioni rep" odziva). On se kvantifikuje obvojnicom, koja je u linearnoj razmeri eksponencijalna kriva, a kada se odziv predstavlja nivoom zvuka, onda je to prava

linija, kao što je prikazano na slici 11.7. Ovaj deo odziva opisuje se strminom nagiba kao globalnim pokazateljem i izražava se brzinom opadanja nivoa zvuka u dB/s.



Slika 11.8 – Generalizovana forma impulsnog odziva prostorije

U samim počecima istraživanja akustičkog odziva prostorija, što je bilo pre više od 100 godina, reverberacioni nagib je definisan na jedan specifičan način pomoću veličine koja je nazvana vreme reverberacije. Označava se sa T i izražava u sekundama. Po definiciji, vreme reverberacije je ono vreme za koje nivo zvuka u prostoriji tokom reverberacionog procesa opadne za 60 dB. Ova definicija je ilustrovana grafički na slici 11.9. Bez obzira na neobičnost takve definicije, ovakav način predstavljanja nagiba reverberacionog dela impulsnog odziva zadržao se do danas kao standard. Vrednosti vremena reverberacije u realnim prostorijama kreću se od 0,2-0,4 s (u akustički obrađenim studijskim prostorijama) do reda veličine 10 s (u velikim crkvama i akustički neobrađenim velikim halama).



Slika 11.9 – Ilustracija uz definiciju vremena reverberacije kao mere brzine opadanja nivoa zvuka u prostoriji.

11.2 Matematički modeli zvučnog polja u prostorijama

Modelovanje zvučnog polja u prostorijama predstavlja pokušaj da se odziv prostorije na zvučnu pobudu opiše analitički ili numerički i tako omogući njegova analiza i predikcija.

Mogućnost predikcije je nužna u projektovanju budućih prostorija, pogotovo kada je njihova namena akustički zahtevna kao što su razne sale, studijski prostori, sobe za slušanje reprodukovanih zvuka i slično. Osim za predikciju odziva nekih budućih prostorija, modeli zvučnog polja su značajni i kao alat za tumačenje odziva koji se ostvaruju u postojećim prostorijama. Pomoću modela moguće je utvrditi šta treba menjati da bi se u postojećoj prostoriji korigovao odziv u skladu sa nekim postavljenim zahtevima.

Nažalost, priroda zvučnog polja kakvo se javlja u prostorijama ne omogućava da se na jedinstven način opiše ponašanje prostorije za proizvoljnu zvučnu pobudu. Tri dekade širok frekvencijski opseg zvukova koje čovek može da percepira i isti toliki raspon talasnih dužina čini da su procesi interakcije zvučnih talasa sa graničnim površinama pri takо različitim talasnim dužinama veoma različiti. Zbog toga se u formiraju matematičkih modela zvučnog polja u prostorijama nužno uvode razne polazne pretpostavke kojima se vrši uprošćavanje i ograničenje u odnosu na realnost. Na taj način je važnost, to jest tačnost njihove primene ograničena i uslovljena važnošću uvedenih pretpostavki.

Vremenom su se izdiferencirale tri osnovne teorije, odnosno tri načina posmatranja i modelovanja zvučnog polja u prostorijama. To su:

- statistički model,
- talasni model i
- geometrijski model (aproksimacija za slučaj visokih frekvencija).

Svaki od ovih pristupa modelovanju ima svoja specifična pojednostavljenja i ograničenu važnost. Bez obzira na sve nedostatke koje imaju, analiza zvučnog polja u prostorijama danas se zasniva na primeni ova tri modela.

Statistički model, poznat i kao Sabinova teorija, zasniva se na zakonu o održanju energije i primenjiv je za slučaj zvučnog polja u prostoriji kada u njoj radi stacionarni zvučni izvor. Soba se tada posmatra na globalnom nivou kao rezervoar zvučne energije u kome se odigrava proces njenog generisanja i trošenja. Kada se u prostoriji uključi zvučni izvor snage P_a započinje njen punjenje energijom. Sa porastom gustine energije u prostoriji rastu gubici na površinama zidova usled apsorpcije. Ovi gubici se kvantifikuju snagom disipacije P_α . Statistička teorija modeluje zvučno polje posmatrajući ravnotežu između ova dva suprotna procesa energetskog punjenja i pražnjenja.

Statistički model zvučnog polja u prostoriji veoma je značajan u praksi jer daje jednostavne relacije za određivanje nivoa reflektovanog zvuka u okolnostima kada u njoj radi stacionarni izvor (na primer neki izvor buke). Druga važna osobina ovog modela je u tome što objašnjava prelazne režime nakon uključenja i isključenja zvučnih izvora. Iz njega je takođe proizašao i najšire primenjivan izraz za izračunavanje vrednosti vremena reverberacije koji se navodi u svim udžbenicima.

Talasna teorija je opisivanje zvučnog polja u prostoriji na osnovu talasne jednačine koja definiše prostorno-vremensku promenu pritiska. Modelovanje zvučnog polja se zasniva

na rešenju talasne jednačine, pri čemu se u postupku rešavanju polazi od činjenice da rešenja različita od nule postoje samo unutar zadatih intervala prostornih koordinata koje definišu prostoriju. Rešavanje talasne jednačine za neku posmatranu prostoriju zahteva definisanje graničnih uslova, a to znači stanja polja na svim unutrašnjim površinama.

Osnovni problem ovakvog pristupa modelovanju zvučnog polja je u činjenici da je u opštem slučaju prostorije nemoguće rešavanje talasne jednačine. Osnovni "kamen spoticanja" je utvrđivanje graničnih uslova. Zato je njeno analitičko rešenje moguće samo za najjednostavnije geometrijske forme prostorije, kao što je, na primer, paralelopiped idealno tvrdih zidova. Čak i u tom najjednostavnijem slučaju talasni model samo retko može imati primenu u kvantitativnoj analizi zvučnog polja. Kada prostorija ima složenu geometrijsku formu analitičko rešavanje nije praktično izvodljivo.

I pored problema koji postoje u eventualnoj primeni talasnog modela za rešavanje praktičnih problema, ovaj pristup modelovanja ima veliki teorijski značaj. Naime, rešavanje talasne jednačine za prostoriju vodi ka pojmu njenih sopstvenih rezonantnih frekvencija. Fizička manifestacija postojanja sopstvenih rezonanci su stojeći talasi. U svakoj prostoriji njihov uticaj na akustički odziv primetan je u određenom opsegu frekvencija. Položaj tog opsega frekvencija zavisi od veličine prostorije. Zbog toga je talasni model, iako nije primenjiv za kvantifikovanje zvučnog polja, značajan za kvalitativnu analizu pojava u prostoriji.

Geometrijski model po svojoj prirodi odgovara slučaju veoma visokih frekvencija, to jest kada je talasna dužina zvuka dovoljno mala u odnosu na dimenzije prostorije i veličinu svih graničnih površina u njoj. Zračenje energije oko zvučnog izvora modeluje se skupom zraka koji se šire polazeći od njega. Svakom takvom zraku dodeljuje se jedan deo izražene energije koja u procesu prostiranja vremenom slabi usled širenja talasnog fronta i pri svakoj refleksiji od graničnih površina. Sudbina zraka se prati dok njihova energija ne opadne ispod nekog praga.

Geometrijsko modelovanje zvučnog polja predstavlja pojednostavljenje realnosti, jer se apriorno zanemaruju svi talasni fenomeni. To pre svega znači da se ne modeluje difrakcija na preprekama, kao ni uticaj faznih stavova pri superponiranju talasa. Međutim, jedino ovaj model omogućava predikciju strukture impulsnog odziva prostorije. U tom smislu je njegova primena od velikog značaja za projektuje razne vrste sala i slični prostori čiji je akustički kvalitet važan.

Preciznost modelovanja zvučnog polja u prostorijama primenom ova tri modela određena je polaznim prepostavkama i ograničenjima koja se u startu uvode. Zbog toga u svim realnim prostorijama rezultati dobijeni nekim od modela u većoj ili manjoj meri odstupaju od stvarnog stanja u zvučnom polju. Veličina te razlike zavisi od niza konkretnih osobina prostorije, odnosno od toga koliko su polazna ograničenja uvedena pri definisanju modela važeća u posmatranoj prostoriji. Ipak, postoji niz praktičnih problema u kojima se od modela ne zahteva velika tačnost rezultata, već samo kvalitativna procena stanja ili procena reda veličine vrednosti pojedinih pokazatelja

stanja u zvučnom polju. Kada se, na primer, polje u prostoriji modeluje radi procene subjektivnog doživljaja nivoa zvuka, onda su tolerancije od par decibela u rezultatima modelovanja donja granica tačnosti koja ima smisla jer su manje promene nivoa subjektivno neprimetne. To čini da navedeni matematički modeli zvučnog polja u prostorijama, i pored aprioronog odstupanja od realnosti, imaju široku primenu u inženjerskoj praksi.

Pojam poželjnog odziva prostorije

U telekomunikacijama poželjan oblik impulsnog odziva sistema prenosa je u opštem slučaju idealan Dirakov impuls, što bi značilo da sistem u idealnom slučaju ne sme da unosi promene u signal koji se prenosi. U prostorijama je nemoguće ostvariti takav idealan odziv zbog prirode reflektovanog zvuka i male brzine prostiranja. U slučaju akustičkih sistema prenosa idealan odziv je moguć samo u takozvanom slobodnom prostoru, što u praksi znači u anehoičnim prostorijama. Takav idealan impulsni odziv neophodan je, na primer, kada se testiraju razni zvučni izvori kao što su zvučnici ili razni izvori buke. U takvim merenjima posmatra se i analizira samo direktni zvuk koji stiže od izvora i svaka eventualna refleksija imala bi negativan uticaj.

U akustici pojам поžелjnог облика impulsnog odziva uvek podrazumeva njegovo odstupanje od idealnog. U prostorijama se zahtevi u odnosu na njen odziv mogu postavljati na dva načina: prema ukupnoj energetskej koju nosi odziv i prema formi odziva u vremenskim i prostornim dimenzijama.

Kada se odziv posmatra samo energetska, zahtevi u odnosu na impulsni odziv mogu biti usmereni ka tome da zvuk na mestu prijema bude dovoljno glasan ili dovoljni tih. Ukupna energija koja stiže do prijemnika srazmerna je integralu svih komponenti impulsnog odziva snimljenog na mestu prijema, pa se na taj način propisuje kompleksnost impulsnog odziva. Na primer, zahtev da zvuk u prostoriji bude što tiši podrazumeva da impulsni odziv što brže opada i da mu sve komponente budu što manje amplitude. Obrnuto tome, ako se zahteva da zvuk u prostoriji pri pobudi bude što višeg nivoa, onda je potrebno da impulsni odziv ima što više komponenti i da što duže traje.

Kada se u prostorijama zvukom prenose informacije, što je slučaj sa govorom i muzikom, onda se u njima postavlja zahtev da impulsni odziv ima neku zadatu poželjnu formu. To se može odnositi na opšti oblik odziva i detalje njegove strukture. Takav zahtev proizilazi iz potrebe dekodovanja relevantnih informacija u zvuku koji se čuje ili kao zahtev estetike ukupne zvučne slike. Na primer, kada je u pitanju muzika čulo sluha postavlja izvesne estetske zahteve koji se ostvaruju podešavanjem oblika obvojnica odziva, pravaca iz koga dolaze prve refleksije, i slično.

12. STATISTIČKI MODEL ZVUČNOG POLJA U PROSTORIJAMA

Statistička analiza zvučnog polja u prostoriji, takozvani statistički model ili statistička teorija, posmatra ukupni energetski bilans rada zvučnog izvora u njoj. U takvom statističkom pogledu na dešavanja polazi se od pretpostavke da zvučni izvor radi stacionarno i kontinualno od nekog trenutka njegovog uključenja. U tom smislu prostorija se analizira kao jedan rezervoar zvučne energije. Kada se izvor uključi i radi konstantnom snagom P_a , ukupna energija u prostoriji W se od tog trenutka kontinualno povećava jer izvor „puni“ prostoriju zvučnom energijom. Istovremeno sa pojavom zvučne energije u prostoriji nastaje proces njenog trošenja usled disipacije na graničnim površinama. Ti gubitci se opisuju snagom disipacije P_α . Prema tome, nakon uključivanja zvučnog izvora u prostoriji nastaju dva paralelna procesa i od njihovog odnosa zavisi stanje u zvučnom polju. Statistički model zvučnog polja u prostoriji bazira se na posmatranju balansa između procesa generisanja i trošenja zvučne energije

12.1 Preduslovi za analizu pomoću statističke teorije

Ako se prepostavi da sve granične površine u prostoriji imaju relativno mali koeficijent apsorpcije, onda zvučni talasi u njoj dožive višestrukе refleksije pre nego što oslabe toliko da više ne doprinose zvučnom polju. Ako se stvore takvi uslovi koji omogućavaju dugo zadržavanje energije u prostoriji, onda se može prepostaviti da u svakoj tački prostorije važi sledeće:

- u svakom trenutku u svaku tačku prostora dolazi mnoštvo talasa koji su prethodno prešli različite puteve, pa zbog toga imaju različite amplitude i faze.
- svi pravci nailaska talasa i sve vrednosti njihovih faza podjednako su verovatni.

Ovakvo stanje označeno je u literaturi kao "difuzno i homogeno" zvučno polje i karakteristika je prostorije kao akustičkog sistema prenosa. U daljoj analizi zvučnog polja smatra se da su difuznost i homogenost kao preduslovi ispunjeni. U realnim okolnostima ovi preduslovi nisu uvek zadovoljeni, pa je i tačnost u primeni statističkog modela povezana sa tim. U laboratorijskim uslovima formiraju se prostorije u kojima će se pri zvučnoj pobudi stvarati difuzno i homogeno zvučno polje da bi se statistički model mogao primenjivati sa dovoljno velikom tačnošću. To su takozvane reverberacione prostorije (često se nazivaju i reverberacione komore). One se prave sa veoma masivnim zidovima čije su površine od tvrdog materijala da bi se minizirala apsorpcija. Često se na betonskim

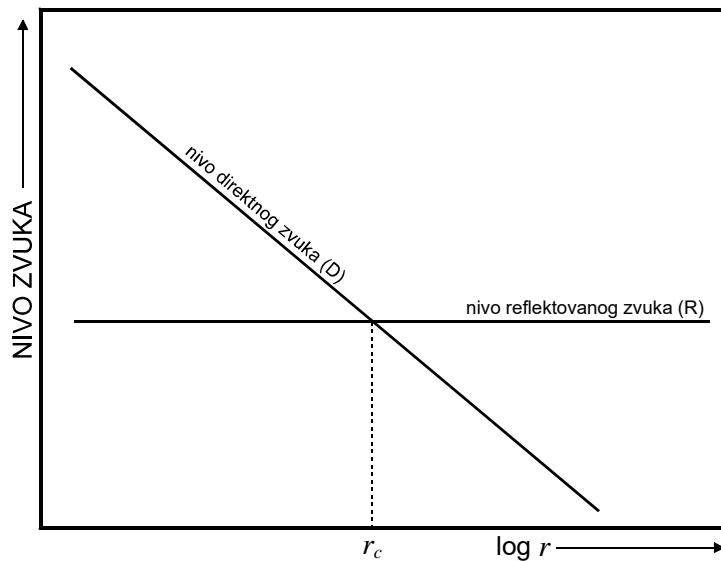
površinama zidova lepe keramičke ili staklene ploče da bi se smanjila svaka poroznost površina i tako minimizirala apsorpcija.

Direktan i reflektovan zvuk

Rezultujuće energetsko stanje zvučnog polja u svakoj tački prostorije predstavlja zbir intenziteta svih talasa koji u istom trenutku prolaze kroz nju:

$$J = \sum_i J_i \quad (12.1)$$

U uslovima homogenog i difuznog polja ovo je suma sa veoma mnogo sabiraka (i teži beskonačno). Pojedinačne vrednosti sabiraka varijaju u nekim granicama, ali svi oni potiču iz ograničenih uslova koje nameće prostorija, pa statističkih posmatrano među njima ne može biti velikih razlika. Zbog toga vrednost zbira u izrazu (12.1) teži jednoj konstantnoj vrednosti koja ne zavisi od prostornih kordinata. Drugim rečima, ako je zvučno polje difuzno i homogeno, intenzitet reflektovanog zvuka po čitavoj prostoriji je konstantan. Izuzetak je samo u neposrednoj blizini izvora gde će uvek direktni zvuk biti dominantan.



Slika 12.1 – Odnos nivoa direktnog i reflektovanog zvuka u prostoriji u funkciji rastojanja od zvučnog izvora.

Ukupni nivo zvuka u prostoriji može se razložiti na dve komponente: na nivo direktnog zvuka koji opada sa rastojanjem od izvora po zakonu širenja talasnog fronta, i nivo reflektovanog zvuka koji je konstantan po prostoriji. Ovakva karakteristika zvučnog polja u prostoriji ilustrovana je na slici 12.1. Na apscisi dijagrama u logaritamskoj razmeri predstavljeno je rastojanje od zvučnog izvora, a na ordinati relativni nivo zvuka. Vidi se da je u neposrednom okruženju zvučnog izvora nivo direktnog zvuka viši od nivoa reflektovanog zvuka. Postoji neko rastojanje od izvora na kome su ova dva nivoa jednakia. Ono se naziva poluprečnik zone direktnog zvuka zbog toga što je unutar sfere postavljene oko izvora čiji je to poluprečnik nivo direktnog zvuka viši od nivoa reflektovanog zvuka.

Ova vrednost se u literaturi koja obrađuje oblast reprodukcije zvuka često naziva kritično rastojanje. Njegova vrednost ne zavisi od snage izvora, već samo od prostorije i njenih relevantnih osobina, pošto se s promenama snage izvora paralelno menjaju oba nivoa: i direktnog i reflektovanog zvuka.

Jednačina dinamičke ravnoteže u prostoriji

Jednačina dinamičke ravnoteže u prostoriji pokazuje brzinu promene energije:

$$\frac{d}{dt}W = \frac{d}{dt} \iiint E dV = P_a - P_\alpha \quad (12.2)$$

gde je W ukupna energija u prostoriji, a E je gustina energije u elementu zapremine dV . Snaga disipacije P_α funkcija je ukupne energije u prostoriji W , jer je pri refleksiji zvučnog talasa od granične površine gubitak usled apsorpcije određen procentom upadne energije. Jednačina (12.2) pokazuje da je priraštaj ukupne energije u prostoriji dW u vremenu dt rezultanta dva priraštaja:

- pozitivnog koji potiče od rada izvora $P_a dt$,
- negativnog koji potiče od apsorpcije na svim graničnim površinama $P_\alpha dt$.

Statistički model zvučnog polja u prostoriji polazi od jednačine (12.2). Njenim rešavanjem dolazi se do relevantnih relacija koje definišu stanje u zvučnom polju.

Fizički uticaj prostorije na zvučno polje u njoj zasniva se na procesu disipacije na svim unutrašnjim graničnim površinama. Merilo njihove apsorpcione moći je koeficijent apsorpcije α . Ovaj koeficijent je, po definiciji, odnos apsorbovane snage P_α i upadne snage P_u koja pogađa površinu:

$$\alpha = \frac{P_\alpha}{P_u} \quad (12.3)$$

U realnim okolnostima sposobnost površine da apsorbuje zvuk zavisi od upadnog ugla. Zato je i vrednost koeficijenta apsorpcije u opštem slučaju zavisna od veličine upadnog ugla zvučne energije.

12.2 Stacionarno stanje zvučnog polja

U procesu generisanja i trošenja zvučne energije koji se odvija pri radu konstantnog izvora zvuka snaga izvora je konstantna, što znači da je protok energije koja ulazi u prostoriju konstantan. Snaga disipacije na graničnim površinama funkcija je gustine energije koja ih pogađa, što znači da se nakon uključenja zvučnog izvora količina energije koja se troši u jedinici vremena permanentno povećava s povećanjem ukupne energije u prostoriji W . U tom procesu postoji trenutak kada će se snaga generisanja i snaga disipacije izjednačiti, to jest:

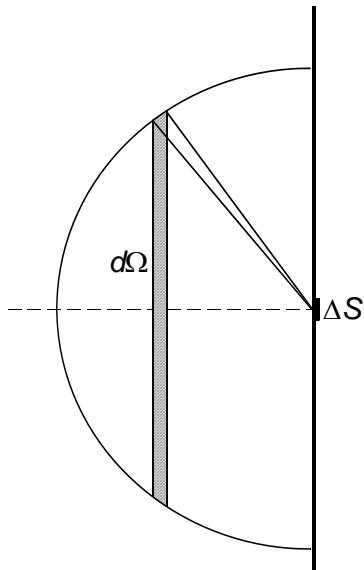
$$P_\alpha = P_a \quad (12.4)$$

Tada u prostoriji nastupa stacionarno stanje zvučnog polja. Količina energije u prostoriji W , a time i gustina energije E , prestaje da raste, pa nivo zvuka u prostoriji nadalje ostaje konstantan bez obzira koliko dugo izvor radio.

Po isključenju zvučnog izvora dešava se analogna pojava, samo u suprotnom smeru. Po prestanku generisanja nove energije postojeća energija u prostoriji se smanjuje. Zbog činjenice da je disipacija srazmerna procentu ukupne energije koja pogađa površine taj proces asimptotski težiti nuli.

Snaga disipacije

Sa desne strane jednačine dinamičke ravnoteže snaga zvučnog izvora je konstanta i određena je njegovom prirodom. Za rešenje jednačine dinamičke ravnoteže u prostoriji neophodno je utvrditi snagu disipacije. Ona nastaje u procesu refleksije kao posledica apsorpcije. Energija koja iz zvučnog polja pogađa neki element zida površine ΔS zavisi od intenziteta zvuka u prostoriji. Po prirodi stvari energija koja pogađa element površine ΔS dolazi iz poluprostora. Intenzitet koji iz nekog pravca pogađa posmatrani element površine zavisi od intenziteta talasa, ali i od upadnog ugla zbog veličine projekcije površine na pravac nailaska. Ova situacija je prikazana na slici 12.2.



Slika 12.2 – Ilustracija uz izvođenje energije koja pogađa element površine zida

U nekoj tački prostorije gde postoji difuzno polje gustina energije dE koja dolazi iz pravca određenog sa prostornim uglom $d\Omega$ je:

$$\frac{dE}{E} = \frac{d\Omega}{4\pi}$$
, gde je E ukupna energija koja u tačku dospeva iz kompletног prostornog ugla.

Energija koja pogađa element površine ΔS zavisi od intenziteta talasa, ali i od upadnog ugla zbog veličine projekcije površine ΔS na pravac talasa.

Elementarni prostorni ugao $d\Omega$ iz koga talasi pogadaju elementarnu površinu pod istim upadnim uglom određen je elementom površine zamišljene polulopte kao na slici 12.2:

$$\frac{dE}{E} = \frac{2\pi r^2 \sin \theta d\theta}{4\pi r^2} = \frac{\sin \theta d\theta}{2}$$

talasi koji pogadaju površinu mogu se smatrati ravnim jer su doživeli veliki broj refleksija.

$$dJ = cE$$

$$\frac{dJ}{cE} = \frac{\sin \theta d\theta}{2}$$

$$d\Delta P_u = dJ \Delta S \cos \theta = \frac{Ec \Delta S}{2} \sin \theta \cos \theta d\theta$$

$$\Delta P_u = \frac{Ec \Delta S}{2} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \frac{Ec}{4} \Delta S = \frac{J}{4} \Delta S$$

Sa slike se vidi da se može definisati element prostornog ugla $d\Omega$ iz koga se ΔS vidi pod istim uglom. To je elementarni prostorni ugao u vidu prstena. Integraleći u granicama od 0 do $\pi/2$ intenzitet koji na element površine ΔS dolazi iz prostornog ugla definisanog prikazanim prstenom može se pokazati da je snaga disipacije ΔP_u na elementu površine ΔS :

$$\Delta P_u = \frac{J}{4} \Delta S \quad (12.5)$$

gde je J intenzitet homogenog difuznog polja u prostoriji. Prema tome, zbog geometrijskih uslova na površinama zidova snaga koja ih pogađa srazmerna je jednoj četvrtini intenziteta koji postoji u homogenom polju u prostoriji.

Apsorbovana snaga ΔP_α na elementu površine ΔS dobija se množeći upadnu snagu sa koeficijentom apsorpcije površine:

$$\Delta P_\alpha = \frac{J}{4} \alpha \Delta S \quad (12.6)$$

U ovom izrazu α je statistička vrednost koeficijenta apsorpcije koju površina isložena zvučnom polju ispoljava kada je zvučna energija pogađa sa svih strana. Naime, fizička priroda disipativnih procesa na graničnim površinama je takva da vrednost koeficijenta apsorpcije zavisi od upadnog ugla pod kojim talas pogađa površinu. Zbog toga je statistička vrednost u izrazu (12.6) različita od vrednosti koju materijal ispoljava pri normalnoj incidenciji. Svi podaci o koeficientima apsorpcije koji se u literaturi mogu naći za razne materijale upravo predstavljaju statističku vrednost. Postupak merenja koeficijenta apsorpcije utvrđen standardom podrazumeva da se pri tome uzorak materijala nalazi u difuznom polju sa podjednakom verovatnoćom svih uglova incidencije.

Ukupna snaga disipacije u prostoriji P_α zbir je pojedinačnih disipacija na svim postojećim elementima graničnih površinama ΔS , to jest:

$$P_\alpha = \frac{J}{4} \sum \alpha_i \Delta S_i \quad (12.7)$$

Intenzitet koji predstavlja fluks zvučne energije je $J = Ec$, pa se izraz (12.7) može napisati i u funkciji gustine energije:

$$P_\alpha = \frac{Ec}{4} \sum \alpha_i \Delta S_i \quad (12.8)$$

Veličina definisana sumom u gornjem izrazu naziva se apsorpciona površina prostorije ili kratko apsorpcija:

$$A = \sum \alpha_i \Delta S_i \quad (12.9)$$

Vidi se da je apsorpcija dimenziono (m^2). Suma u izrazu (12.9) obuhvata sve površine koje postoje u prostoriji i koje su izložene zvučnom polju. Za svaku pojedinačnu površinu u prostoriji može se definisati ekvivalentna apsorpciona površina $A_i = \alpha_i \Delta S_i$. Pojam apsorpcione površine A_i neke realne površine u prostoriji može se razumeti kroz jednu analogiju. Kada bi se pretpostavilo da je čitava površina S_i od materijala koji nema nikakvu apsorciju, to jest za koju je $\alpha = 0$, i na njoj postavila jedna površina veličine A_i čiji je koeficijent apsorpacije $\alpha = 1$, snaga disipacije na toj površini ostala bi ista. Drugim rečima, površina A_i s koeficijentom apsorpacije 1 u disipativnom procesu u prostoriji potpuno zamenjuje čitavu realnu površinu S_i .

Na osnovu izraza (12.9) može se uvesti pojam srednjeg koeficijenta apsorpacije za čitavu prostoriju:

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{S} = \frac{\sum \alpha_i \Delta S_i}{S} \quad (12.10)$$

gde je S ukupna unutrašnja površina prostorije:

$$S = \sum \Delta S_i \quad (12.11)$$

Srednji koeficijent apsorpacije može se shvatiti kao ona vrednost koju treba da imaju sve površine u prostoriji, pa da ukupna apsorpcija u njoj ima istu vrednost kao i u stanju kakvo jeste. Podatak o srednjem koeficijentu apsorpacije predstavlja pokazatelj ukupnih apsorpcionih svojstava prostorije.

Intenzitet reflektovanog zvuka u prostoriji

Sa definisanom snagom disipacije prema izrazima (12.7) i (12.8) jednačina dinamičke ravnoteže postaje.

$$\frac{dW}{dt} = P_a - P_\alpha = P_a - \frac{EcA}{4} \quad (12.12)$$

U homogenom zvučnom polju gustina energije je ista po čitavoj zapremini, pa je ukupna energija je $W = EV$. U jednačini dinamičke ravnoteže umesto ukupne energije može se preći na gustinu energije:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{P_a}{V} - \frac{cA}{4V} E \quad (12.13)$$

Ovo je diferencijalna jednačina čijim se rešavanjem dobija stanje u zvučnom polju. Za početne uslove u trenutku uključenja izvora ($t = 0, E = 0$) rešenje ove diferencijalne jednačine je:

$$E = \frac{4P_a}{cA} \left(1 - e^{-\frac{cA}{4V}t}\right) \quad (12.14)$$

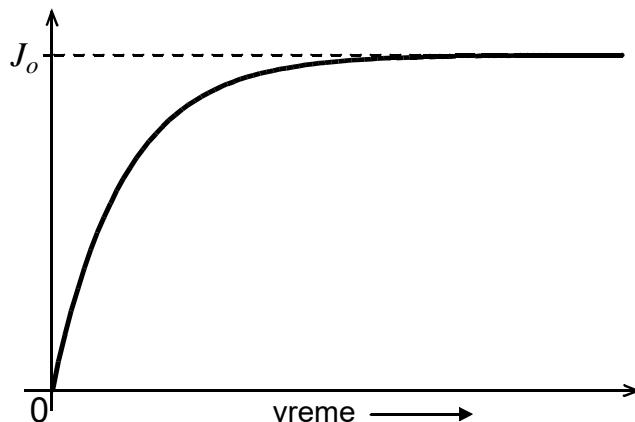
Ovaj izraz pokazuje uspostavljanja gustine zvučne energije u prostoriji nakon uključenja izvora. Ako se umesto gustine energije uvede intenzitet, izraz (12.14) postaje:

$$J = \frac{4P_a}{A} \left(1 - e^{-\frac{cA}{4V}t}\right) \quad (12.15)$$

Ovaj izraz se može pisati i kao:

$$J = J_0 \left(1 - e^{-\frac{cA}{4V}t}\right) \quad (12.16)$$

Vidi se da se po uključenju zvučnog izvora intenzitet zvuka povećava po eksponencijalnom zakonu težeći svojoj maksimalnoj vrednosti J_0 . Vrednost J_0 će biti intenzitet u prostoriji sve vreme stacionarnog stanja u njoj. Proces uspostavljanja intenziteta zvuka u prostoriji nakon uključenja izvora grafički je ilustrovan na slici 12.3.



Slika 12.3 - Dijagram uspostavljanja intenziteta zvuka u prostoriji nakon uključenja zvučnog izvora

Maksimalna vrednost intenziteta koja se dostiže u stacionarnom stanju je:

$$J_0 = \frac{4P_a}{A} \quad (12.17)$$

Vidi se da ta vrednost zavisi i od izvora, i od prostorije. Direktno je srazmerna snazi izvora, a obrnuto srazmerna apsorpciji. Brzina kojom se uspostavlja zvučno polje nakon uključenja izvora definisana je članom u eksponentu koji je:

$$\frac{cA}{4V} \quad (12.18)$$

Iz ovog izraza se vidi da je proces uspostavljanja zvučnog polja isključivo karakteristika prostorije, odnosno njene veličine, izražene preko zapreminе, i apsorpcije. Porast intenziteta je brži što je apsorpcija u prostoriji veća, a sporiji što je zapremina prostorije veća.

Opadanje zvuka i vreme reverberacije

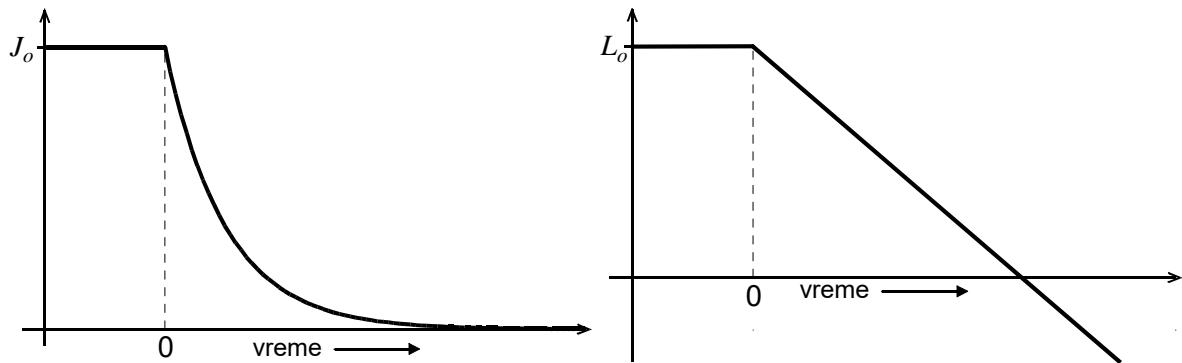
Na osnovu jednačine (12.13) može se utvrditi šta se dešava sa zvučnim poljem u prostoriji kada se u njoj isključi stacionarni zvučni izvor koji je do tog trenutka radio. Prepostavlja se da je izvor radio dovoljno dugo i da je pre toga uspostavljeno stacionarno stanje. Ako se prepostavi da se izvor isključi u trenutku $t = 0$, onda je početni uslov $E = E_0$. Rešenje jednačine je tada:

$$E = E_0 e^{-\frac{cA}{4V}t} \quad (12.19)$$

a za intenzite zvuka je:

$$J = J_0 e^{-\frac{cA}{4V}t} \quad (12.20)$$

Vidi se da po isključenju stacionarnog zvučnog izvora intenzitet zvuka u prostoriji eksponencijalno opada. Ovo opadanje je prikazano grafički na slici 12.4. Eksponencijalni proces opadanja intenziteta zvuka odgovara linearom opadanju nivoa zvuka, što je takođe prikazano na slici.



Slika 12.4 – Opadanje intenziteta zvuka (levo) i nivoa zvuka (desno) nakon isključenja stacionarnog zvučnog izvora u prostoriji.

Iz nagiba krive opadanja nivoa zvuka sa slike 12.4 moguće je odrediti vreme reverberacije prostorije definisano slikom 11.9. Pad nivoa zvuka za 60 dB odgovara smanjenju gustine energije na 10^{-6} od njene početne vrednosti (smanjenje za 60 dB). Kada se u izrazu za opadanje zvuka stavi da je $t = T$ i energija $E(T) = 10^{-6}E_0$, dobija se da je vreme reverberacije:

$$T = \frac{0,163V}{A} \quad (12.21)$$

Sve konstante u izrazu sadržane su svojim vrednostima u koeficijentu 0,163. Iz gornjeg izraza se vidi da je vreme reverberacije kao indikator brzine opadanja zvuka zavisno od ukupne apsorpcije i zapremine prostorije. Izraz (12.21) naziva se Sabinova formula i predstavlja svakako najpoznatiju relaciju akustike prostorija.

Prema tome, brzina opadanja zvuka nakon isključenja zvučnog izvora iskazana vremenom reverberacije predstavlja karakteristiku prostorije i ne zavisi od zvučnog izvora. Zog toga je njegova vrednost osnovni pokazateljn akustičkih osobina prostorije. Vreme reverberacije se može meriti beleženjem procesa opadanja zvuka i ocenom nagiba krive opadanja. Pomoću merenja vremena reverberacije u prostoriji poznate zapremine može se odrediti veličina apsorpcije A . Na tome se zasniva laboratorijski postupak merenja koeficijenta apsorpcije materijala koje se realizuje u reverberacionoj komori, gde se meri apsorpcija unetog materijala poznate površine.

13. TALASNI I GEOMETRIJSKI MODEL ZVUČNOG POLJA U PROSTORIJAMA

Statistički pristup analizi zvučnog polja dao je jednostavne relacije za intenzitet zvuka u stacionarnom stanju polja i izraz za izračunavanje vremena reverberacije u funkciji karakteristika prostorije. Takav pristup dao je Sabinovu formulu za vreme reverberacije koja je verovatno najšire primenjivani matematički izraz u akustičkoj praksi. Ipak, ona samo daje informacije o obvojnici reverberacionog dela impulsnog odziva prostorije. Statistički pristup ne omogućava sagledavanje detalja u odzivu prostorije, pre svega ne daje detaljniju strukturu impulsnog odziva koja bi se mogla izmeriti u realnoj prostoriji. Statistički pristup takođe ne daje uvid u eventualne talasne fenomene čiji se uticaj u određenim okolnostima manifestuje u zvučnom polju.

Pored statističkog modela zvučnog polja, opisanog u prethodnoj temi, veliki značaj imaju još dva pristupa polju u prostorijama. To su talasna teorija i geometrijski model simulacije polja. Značaj talasne teorije i geometrijskog modela je u tome što posmatraju zvučno polje na način koji omogućava sagledavanje onoga što statistički pristup po svojoj prirodi ne daje. Talasna teorija, kao što sam naziv sugerise, modeluje zvučno polje polazeći od njegove talasne prirode. Geometrijski model, iako podrazumeva ozbiljna polazna pojednostavljenja, jedini omogućava predikciju impulsnog odziva za zadate položaje izvora i prijemnika u prostoriji. Prema tome, svaki pristup ima svoje specifičnosti zbog kojih je jedinstven, ali istovremeno ima i određena početna ograničenja zbog kojih je primena dobijenih rezultata sa ograničenom tačnošću.

13.1. Talasna teorija zvučnog polja u prostorijama

Talasni pristup modelovanju zvučnog polja zasniva se na rešavanju talasne jednačine za zadatu prostoriju. Za trodimenzionalni prostor talasna jednačina je:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (13.1)$$

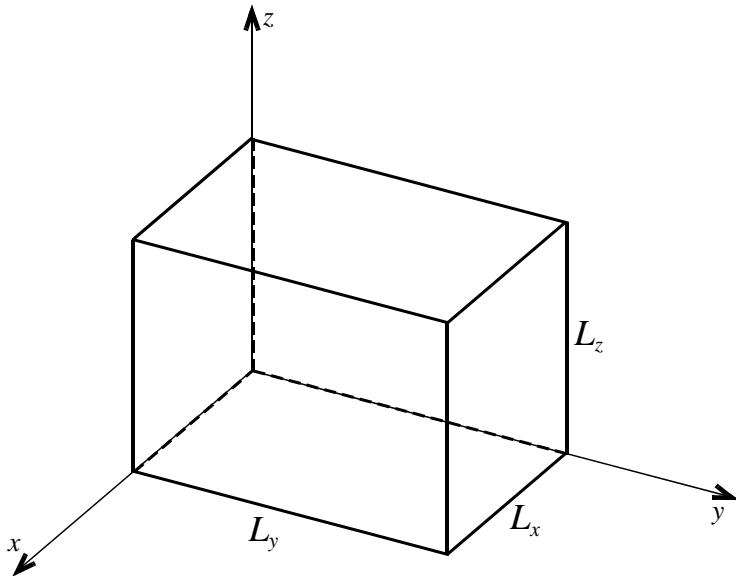
Da bi se ova jednačina rešila za zvučno polje u nekoj prostoriji potrebno je definisati granične uslove. Međutim, u uslovima složene konfiguracije graničnih površina koje mogu biti pokrivene raznolikim materijalima definisanje svih potrebnih graničnih uslova u prostoriji praktično je nerešivo. Zbog toga u opštem slučaju prostorija koje mogu biti predmet analize ne može se analitički rešavati zvučno polje.

Bez obzira na eventualne probleme u rešavanju talasne jednačine, karakteristično je da ona ima rešenja različita od nule samo za diskretan skup vrednosti konstante k , odnosno

za diskretan skup vrednosti frekvencije ω (jer je $k = \omega/c$). Te frekvencije nazivaju se sopstvene frekvencije prostorije, a često su označene i kao sopstvene vrednosti ili sopstveni modovi. Svaka sopstvena vrednost k definiše jedno rešenje talasne jednačine. Ovakvih diskretnih sopstvenih frekvencija na frekvencijskoj osi ima beskonačno mnogo. Taj niz počinje od neke najniže frekvencije i teorijski se proteže u beskonačnost. Rešenja talasne jednačine mogu se predstaviti kao $p_n(\vec{r})$, odnosno $p_n(x,y,z)$, gde je indeks n parametar koja označava red sopstvene frekvencije.

Talasna jednačina u paralelopipednoj prostoriji

Najjednostavniji geometrijski oblik prostorije je paralelopiped. Jedan primer takve prostorije, čije su dimenzije L_x , L_y i L_z , prikazan je na slici 13.1. Ona je postavljena sa jednim temenom u koordinatnom početku i sa stranicama paralelnim koordinatnim ravnima. Prepostavlja se da su svi njeni zidovi idealno tvrdi (impedansa je beskonačna) i idealno ravni.



Slika 13.1 - Paralelopipedna prostorija

Na primeru cevi konačne dužine u poglavlju 8.4 pokazano je da osnovni preduslov za pojavu rezonantnog procesa je ponavljanje putanje prostirana zvuka. To stvara uslove za superponiranje talasa koji se kreću istim putanjama, ali u suprotnim smerovima. Na frekvencijama čije su talasne dužine u odgovarajućem odnosu sa dužinom cevi, to jest dužinom putanje talasa, javlja se rezonanca i stojeći talas kao njena samerljiva manifestacija. Za razliku od cevi, u paralelopipednoj prostoriji ponavljanje putanje, a time i rezonance, mogu nastati na tri različita načina. To su:

- ivične ili aksijalne rezonance,
- površinske rezonance i
- prostorne rezonance.

Ivične rezonance nastaju usled ponavljanja putanje zvučne energije između dve naspramne paralelne površine prostorije. U tom smislu ove rezonance su potpuno jednake ranije opisanim rezonancama u cevima, samo što se ovde javljaju između velikih paralelnih površina kakve su parovi naspramnih zidova i plafon – tavanica. U stojećim talasima koji tako nastaju vrednost pritiska, odnosno nivoa zvuka, menja se samo duž jedne koordinate.

Površinske rezonance se javljaju ponavljanjem putanje kretanja zvuka koja zavisi od dve koordinate. Promene vrednosti zvučnog pritiska u ovom tipu stojećih talasa dešava se simultano duž dve koordinate. Najzad, u nastajanju prostornih rezonanci učestvuju svih šest stranica prostorije, pa se promena zvučnog pritiska u ovom tipu stojećih talasa dešava duž sve tri koordinate. Prema tome, u prostorijama se javljaju mnogo složenije forme rezonanci nego u cevima.

Za slučaj paralelopipedne prostorije u kojoj su svi zidovi od idealno tvrdog materijala talasna jednačina ima relativno jednostavno analitičko rešenje jer su zbog beskonačne impedanse graničnih površina granični uslovi jednostavniji. Talasna jednačina u pravouglim koordinatama ima oblik:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad (13.2)$$

U slučaju prostorije sa slike 13.1 rešenje talasne jednačine se može razdvojiti, odnosno sastoji se od tri faktora:

$$p(x, y, z) = p_1(x)p_2(y)p_3(z) \quad (13.3)$$

gde svaki od faktora zavisi samo od jedne koordinate. Postupak rešavanja jednačine posebno je prikazan u okviru. Rešenja talasne jednačine različita od nule za paralelopipednu prostoriju idealno krutih zidova postoje samo za frekvencije određene izrazom:

$$f_N = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (13.4)$$

Ovde su sa N označene kombinacije trojke brojeva n_x, n_y, n_z . Svaka kombinacija celobrojnih konstanti u ovoj trojci brojeva određuje jednu sopstvenu rezonantnu frekvenciju paralelopipedne prostorije.

Kombinacija trojke brojeva u kojoj je samo jedan od njih različit od nule a ostala dva su jednaka nuli, na primer (2,0,0) ili (0,1,0), predstavlja ivične, odnosno aksijalne rezonance. Najniža rezonantna frekvencija u paralelopipednoj prostoriji upravo je ovog tipa, i to ona za koju vrednost 1 ima konstanta koja odgovara njenoj najvećoj stranici. Površinske rezonance su definisane trojkama brojeva u kojima su dve vrednosti različite od nule, a treća jednaka nuli, kao na primer (2,3,0), (4,1,0), itd. Najzad, prostorne rezonance su definisane kombinacijama u kojima su sva tri broja različita od nule.

Talasna jednačina se razdvaja na tri obične diferencijalne jednačine. Isto važi i za granične uslove. Tako p_1 mora da zadovolji jednačinu:

$$\frac{d^2 p_1}{dx^2} + k_x^2 p_1 = 0$$

a granični uslov za nju je:

$$\frac{dp_1}{dx} = 0 \quad \text{za } x = 0 \text{ i } x = L_x$$

Analogno ovome mogu se napisati jednačine i postaviti odgovarajući granični uslovi za preostale dve koordinate. Novouvedene konstante k_x , k_y i k_z moraju zadovoljiti uslov:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2$$

Jednačina po p_1 ima opšte rešenje u obliku:

$$p_1(x) = A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x) v$$

Konstante A_1 i B_1 treba da prilagode rešenje graničnim uslovima. Vidi se da B_1 mora biti jednak nuli, jer samo kosinusna funkcija zadovoljava uslov da za $x = 0$ ima izvod jednak nuli (horizontalna tangenta). Da bi se zadovoljio ovaj uslov i za vrednost $x = L_x$ mora biti:

$$\cos(k_x L_x) = \pm 1$$

Odnosno proizvod $k_x L_x$ mora biti celobrojni umnožak π , to jest:

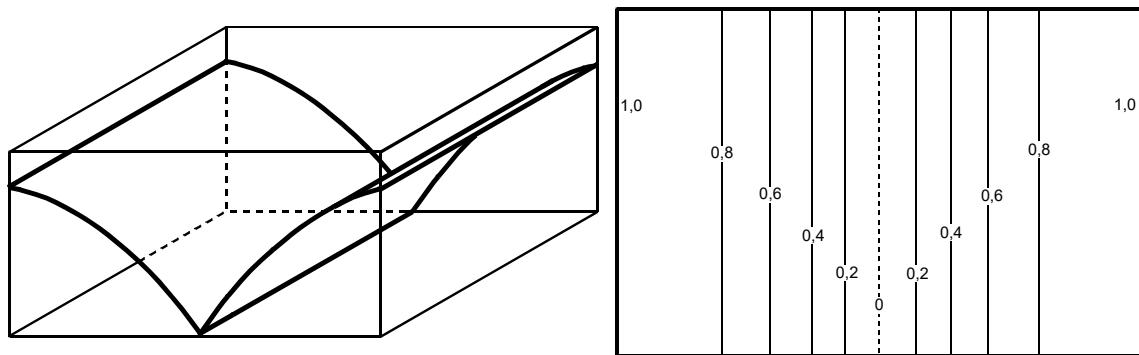
$$k_x = \frac{n_x \pi}{L_x}$$

Ovde je $n_x = 0, 1, 2, 3, \dots$. Iste relacije mogu se napisati i za ostale dve koordinate k_y i k_z . Zamenjujući tako dobijene vrednosti k_x , k_y i k_z dobija se da je rešenje talasne jednačine definisano vrednostima:

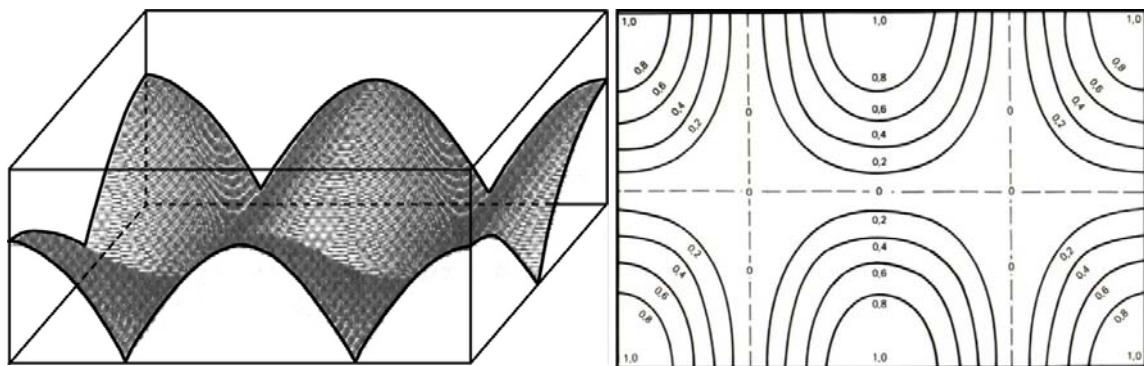
$$k = \pi \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

Kada se prostorija pobudi na nekoj svojoj rezonantnoj frekvenciji, pritisak u prostoriji ima fiksnu prostornu raspodelu stojećeg talasa. To znači da je pritisak u prostoriji na rezonantnim frekvencijama funkcija prostornih koorodinata i njegova promena ima fiksnu prostornu formu određenu vrstom resonance. Prema tome, talasna teorija objašnjava pojavu rezonanci u zvučnom polju koju statistička teorija ne vidi jer je njena polazna prepostavka da intenzitet zvuka po prostoriji u svim tačkama ima istu vrednost.

Pojava stojećih talasa pri zvučnoj pobudi prostorije predstavlja manifestaciju rezonanci u njoj. Na slici 10.2 prikazana je prostorna forma stojećeg talasa tipa (1,0,0). Na slici su prikazana dva moguća načina predstavljanja stojećih talasa: u aksonometriji i u projekciji. Vidi se da se u stojećem talasu na graničnim površinama uvek javljaju maksimumi pritiska jer njegov prvi izvod u tim ravnima mora biti jednak nuli. Kod ivičnog stojećeg talasa, kakav je i onaj sa slike 13.2, maksimumi i minimumi ("trbusi" i "čvorovi") imaju prostornu formu ravni.



Slika 13.2 – Prostorna forma ivičnog stojećeg talasa $(1,0,0)$ u jednoj paralelopipednoj prostoriji, prikazana na dva načina: u aksonometriji (levo) i u osnovi (desno).



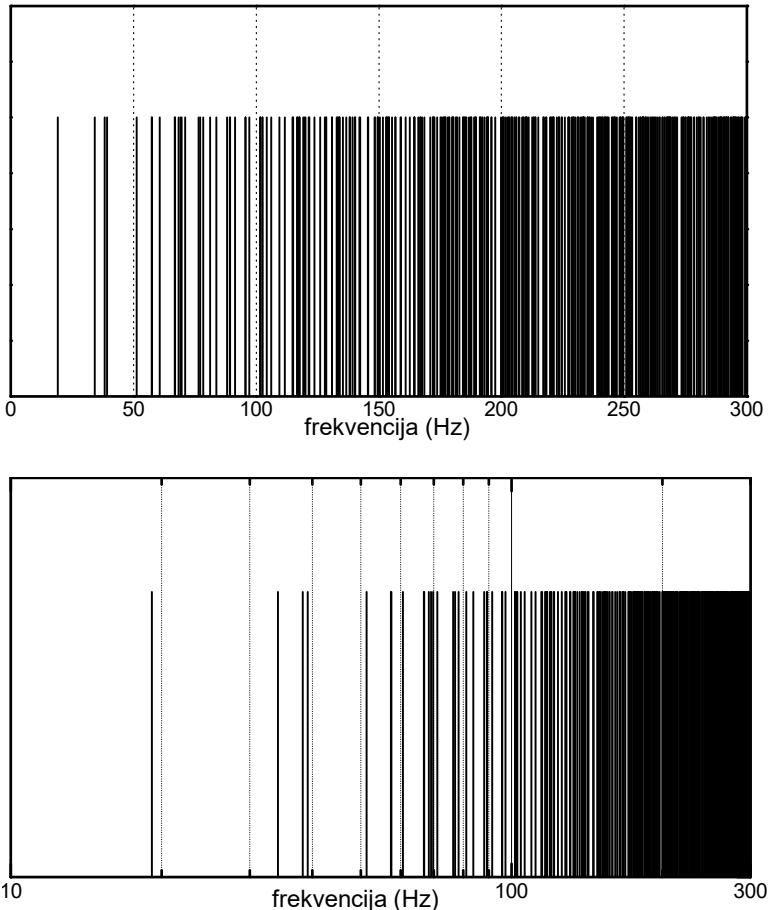
Slika 13.3 – Prostorna forma ravanskog stojećeg talasa $(2,1,0)$ u jednoj paralelopipednoj prostoriji, prikazana na dva načina: u aksonometriji (levo) i u osnovi (desno).

Na slici 13.3 prikazana je prostorna forma ravanskog stojećeg talasa tipa $(2,1,0)$. Vidi se da se u slučaju površinskih rezonanci vrednost pritiska menja duž dve koordinate, to jest u ravni. Geometrijsko mesto maksimuma su vertikalne duži, a minimumi su međusobno ortogonalne ravni. Na osnovu prikaza sa slika 13.2 i 13.3 lako se može zamisliti prostorna forma bilo koga ivičnog i ravanskog stojećeg talasa. Grafička predstava promene pritiska u funkciji prostornih koordinata za slučaj prostornih stojećih talasa nije moguća na jednostavan i lako čitljiv način.

Gustina rezonanci na frekvencijskoj osi

Izraz (13.4) pokazuje da u svakoj prostoriji postoji beskonačan niz rezonantnih frekvencija koji počinje od jedne, najniže vrednosti. Ta najniža vrednost je u paralelopipednoj formi prostorije određena njenom najdužom stranicom. Za razliku od ranije prikazanih rezonanci koje se javljaju u cevi konačne dužine koje su na frekvencijskoj osi ekvidistantne i poređane u harmonijskom odnosu kao celobrojni umnošci jedne najniže frekvencije, u prostorijama se sa porastom frekvencije gustina rezonanci povećava. To zgušnjavanje rezonanci na frekvencijskoj osi ilustrovano je

jednim primerom na slici 13.4. Za slučaj paralelopipedne prostorije dimenzija 9x5x3 m izračunat je niz rezonantnih frekvencija koje se nalaze ispod 300 Hz. Svaka vertikalna crta na slici predstavlja jednu rezonantnu frekvenciju. Raspored rezonanci na frekvencijskoj osi prikazan je u linearoj i logaritamskoj razmeri. Najniža rezonanca ove prostorije je na oko 19 Hz, i ona je prema izrazu 13.4 određena najdužom stranicom prostorije koja je u ovom primeru 9 m.



*Slika 13.4 – Ilustracija zgušnjavanja sopstvenih rezonanci na frekvencijskoj osi na primeru paralelopipedne prostorije dimenzija 9x5x3 m (svaka vertikalna linija predstavlja jednu rezonantnu frekvenciju):
gore – linearna razmera
dole – logaritamska razmera duž frekvencijske ose*

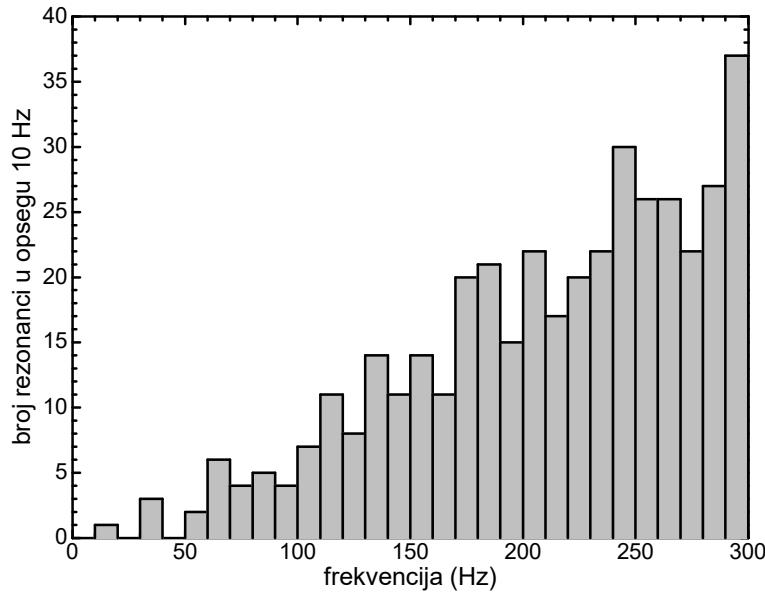
Sa slike 13.4 jasno se vidi da postoji konstantno povećavanje gustine sopstvenih rezonanci sa porastom frekvencije. Izvođenjem čiji postupak ovde neće biti prikazan dobija se aproksimativni izraz za broj sopstvenih rezonantnih frekvencija u opsegu od 0 Hz do neke zadate vrednosti frekvencije f . On pokazuje da je taj broj funkcija zapremine prostorije i frekvencije:

$$N = \varphi(V, f^3) \quad (13.5)$$

Vidi se da broj sopstvenih rezonantnih frekvencija raste sa trećim stepenom frekvencije. Ta činjenica znači da postoji stanovito zgušnjavanje sopstvenih rezonanci duž frekvencijske ose, što se može jasno videti i na primeru sa slike 13.4.

Da bi se povećanje gustine rezonanci duž frekvencijske ose dodatno ilustrovalo, na slici 13.5 je za slučaj sa slike 13.4 prikazana raspodela broja rezonanci koje upadaju u opseg

širine 10 Hz u funkciji frekvencije. Dijagram pokazuje sukscesivni porast broja rezonanci, što ilustruje načina na koji gustina rezonanci raste sa frekvencijom.



Slika 13.5 – Broj sopstvenih rezonanci paralelopipedne prostorije dimenzije 9x5x3 m koje se nalaze unutar opsega širine 10 Hz (vrednosti svih rezonantnih frekvencija prikazane su na slici 13.4).

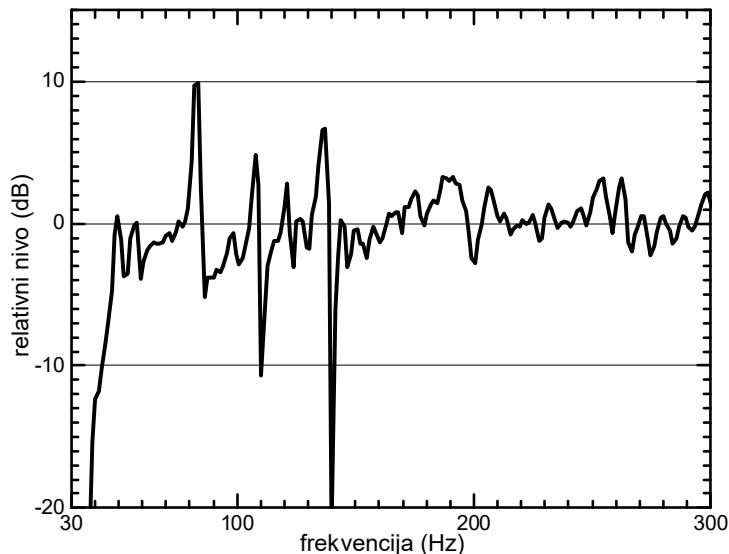
Na višim frekvencijama gde je gustina sopstvenih rezonanci prostorije dovoljno velika, u njenom odzivu ne može se neposredno primetiti postojanje rezonantnih procesa. U oblasti gde su rezonance veoma guste pri svakoj pobudi prostorije nekom frekvencijom postoji istovremeni odziv više rezonantnih procesa. Zvučni pritisak u prostoriji rezultat je njihovog superponiranja, čime se minimiziraju efekti uticaja pojedinačnih rezonanci.

Međutim, u oblasti malih gustina sopstvenih rezonanci, a to znači u oblasti frekvencija od prve, to jest najniže rezonantne frekvencije pa do granice gde gustina rezonanci postaje dovoljno velika, u odzivu prostorije mogu se konstatovati efekti koji nastaju formiranjem stoećih talasa. Ta zona na frekvencijskoj osi naziva se kritični opseg. Naziv potiče otuda što se u akustičkom odzivu prostorije javljaju značajne nelinearnosti izazvane sopstvenim rezonancama. Kritični opseg se prostire približno u širini dve oktave.

U kritičnom opsegu javljaju se nelinearnosti frekvencijskog odziva. Minimumi u odzivu javljaju se u okolini sopstvenih rezonantnih frekvencija za koje se prijemnik ili izvor nalaze u zoni minimuma stoećeg talasa, a maksimumi na frekvencijama za koje su jedan od njih ili oba u zoni trbuha stoećeg talasa. Jedan izmereni primer uticaja stoećih talasa na odziv u prostoriji prikazan je na slici 13.6.

Apsolutni položaj kritičnog opsega na frekvencijskoj osi zavisi od veličine prostorije. U veoma velikim prostorijama, kao što su razne sale, najniža rezonantna frekvencija se uobičajeno nalazi ispod čujnog opsega, pa je i čitav kritični opseg u kome je moguć uticaj sopstvenih rezonanci ispod opsega spektralnog sadržaja korisnih zvukova. U malim prostorijama kao što su sobe u stanovima najniža rezonanca se može nalaziti u opsegu 50 -100 Hz. Tada se čitav kritični opseg nalazi u značajnom području gde se nalaze bitne komponente muzike. Isti fizički procesi dešavaju se i u mnogo manjim zatvorenim prostorima, kao što je unutrašnjost kutije zvučnika. Zbog njihovih dimenzija najniža

rezonanca u njima može biti u opsegu frekvencija 500 – 1000 Hz. Tada je čitav kritični opseg u delu gde je ljudsko uvo najosetljivije, pa se uticaj neregularnosti u odzivu može lako primetiti.



Slika 13.6 – Frekvencijski odziv na nižim frekvencijama jedne realne prostorije, na kome se jasno vidi uticaj njenih sopstvenih rezonanci.

Izraženost neregularnosti u frekvencijskom odzivu koji nastaju uticajem sopstvenih rezonanci zavisi od koordinata zvučnog izvora i prijemnika, odnosno njihovog položaja u odnosu na prostornu raspodelu stoećih talasa. To dalje znači da će u istoj prostoriji za razne položaje izvora i prijemnika neregularnosti odziva biti različite. Pri eventualnom kretanju prijemnika po prostoriji frekvencijski odziv u kritičnom opsegu menjao bi se u funkciji prostornih koordinata.

Iako nema praktičnu primenu u rešavanju zvučnog polja za konkretnе просторија, talasni model ima veliki teorijski značaj. Najvažniji doprinos talasnog modela je u činjenici da on definiše postojanje sopstvenih rezonanci prostorije.

13.2 Geometrijski model zvučnog polja u prostorijama

Geometrijski model u prostorijama predstavlja simulaciju zvučnog polja koja se zasniva na geometrijskim principima, na način sličan principima geometrijske optike. Taj model zvučnog polja u svojoj osnovi zasniva se na zanemarivanju svih talasnih fenomena pri prostiranju zvuka. Zvučni talas se predstavlja konceptom zvučnih zraka i prati se njihovo kretanje u prostoru. To podrazumeva dve bitne polazne pretpostavke koje proizilaze iz zanemarivanja talasne prriode zvuka. Prvo, zanemaruje se pojava difrakcije i pretpostavlja se da se prostiranje zvuka odvija samo po pravoj liniji. Drugo, pri superponiranju više zvučnih komponenti njihovi fazni stavovi se ne uzimaju u obzir već se sabiranje vrši energetski.

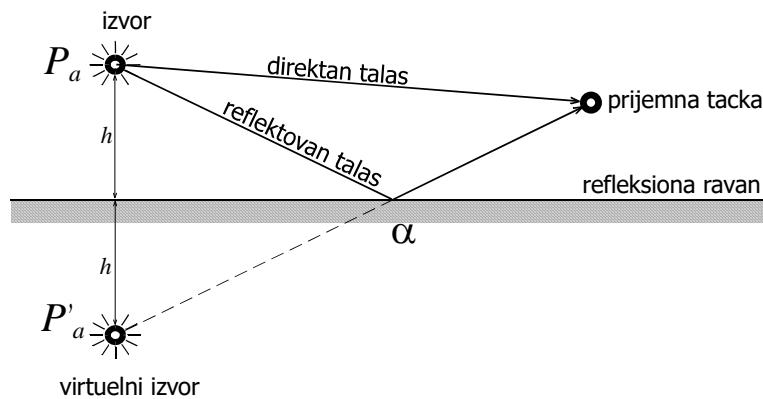
Zraci kojim se zamjenjuje zvučni talas predstavljaju idealizaciju zvučnih pojava zasnovanu na značajnim polaznim pojednostavljenjima. Zbog toga je i tačnost takvog pristupa u izvesnoj meri ograničena. Navedene polazne pretpostavke dovoljno su tačne za visoke frekvencije i ako je zvučni sadržaj zraka koji se superponira međusobno nekoherentan.

Zbog toga je geometrijski model primenjiv za oblast visokih frekvencija, gde je talasna dužina dovoljno manja od dimenzija graničnih površina u prostoriji. Tada se sa dovoljnom tačnošću mogu primeniti geometrijski principi pri refleksijama. Ako polazne pretpostavke nisu zadovoljene, simulacija zracima unosi izvesnu grešku. Veličina greške zavisi od okolnosti. Kada je značaj talasnih pojava za strukturu zvučnog polja veći, tačnost geometrijskog modela je manja, i obrnuto.

Na tako postavljenim principima geometrijskog modelovanja moguće su dve metode simulacije zvučnog polja: metoda likova i rej trejsing ("ray tracing").

Metoda likova

Simulacija zvučnog polja teorijom likova zasniva se na pojmu virtuelnog izvora koji je objašnjen ranije u okviru teme o refleksijama. Za svaku refleksiju koju generiše neka ravan u prostoriji može se definisati virtuelni izvor kao lik u ogledalu realnog izvora. Zrak koji polazi iz njega modeluje refleksiju, kao što je to prikazano na slici 13.7. Geometrijsko modelovanje zvučnog polja zanemaruje uticaj faznih stavova, pa se na mestu prijema ukupni nivo izračunava energetskim sabiranjem direktnog i reflektovanog zraka.

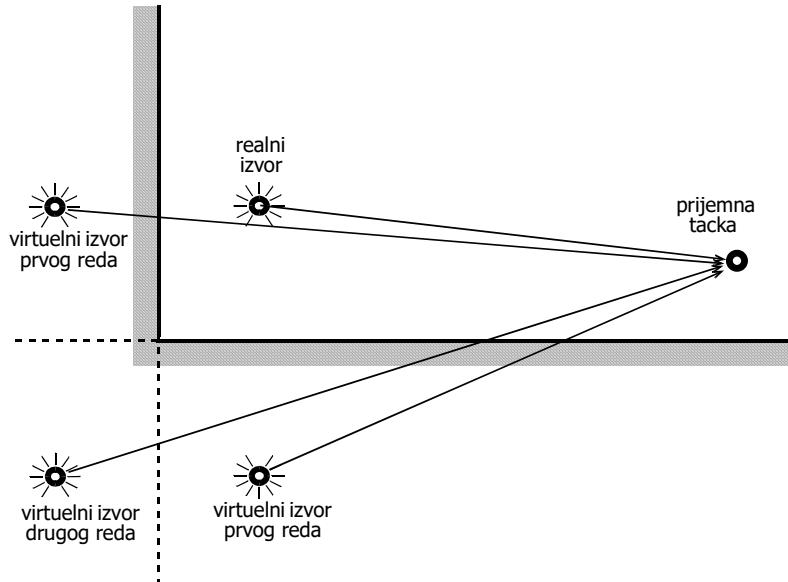


Slika 13.7 – Ilustracija modelovanja refleksije pomoću virtuelnog izvora.

Intenzitet refleksije na mestu prijema zavisi od ukupne dužine puta i energetskih gubitaka na refleksionoj ravni. Slabljene talase koje se javlja na putu od virtuelnog izvora do prijemnika funkcija je širenja talasnog fronta (zakon "6 dB"), gubitaka na refleksionoj ravni koji su srazmerni koeficijentu apsorpcije date površine i koeficijentu difuznosti refleksija g , kao i dissipacije u vazduhu. U prostorijama svaki zrak koji polazi iz zvučnog izvora može imati više sukscesivnih refleksija u prostoriji pre nego što dospe do prijemne tačke. U sukscesivnim refleksijama gubici na refleksionim ravnima se akumuliraju.

U prostorijama uvek postoji više refleksionih ravnih. U najjednostavnijem slučaju paralelopipedne geometrijske forme postoji šest refleksionih ravnih, a u realnim okolnostima broj nezavisnih refleksionih ravnih u prostoriji može biti veći. Primena teorije virtuelnih izvora na modelovanje sukscesivnih refleksija na različitim graničnim površinama zahteva uvođenje likova ne samo izvora, veći i refleksionih ravnih. Jednostavna ilustracija takvog postupka prikazana je na slici 13.8 za slučaj kada postoji samo dve međusobno ortogonalne refleksione ravnih. U okolnostima kakve su predstavljene na slici osim dva reflektovana talasa koji nastaju refleksijama od horizontalne i od vertikalne

ravni postoji i treći talas koji se pre stizanja u prijemnu tačku dva puta reflektuje, po jednom od obe ravni. Za modelovanje takve dvostrukе refleksije potrebno je odrediti likove refleksionih ravni, koji su na slici ucrtani isprekidanim linijama. U sistemu se zbog toga pojavljuje virtualni izvor drugog reda (označen na slici) koji se dobija preslikavanjem lika prvog reda u odnosu na lik refleksione ravni. Talas koji u prijemnu tačku stiže iz izvora drugog reda modeluje dvostruku refleksiju.



Slika 13.8 –Primena modela virtuelnih izvora na slučaj sa dve refleksione ravni.

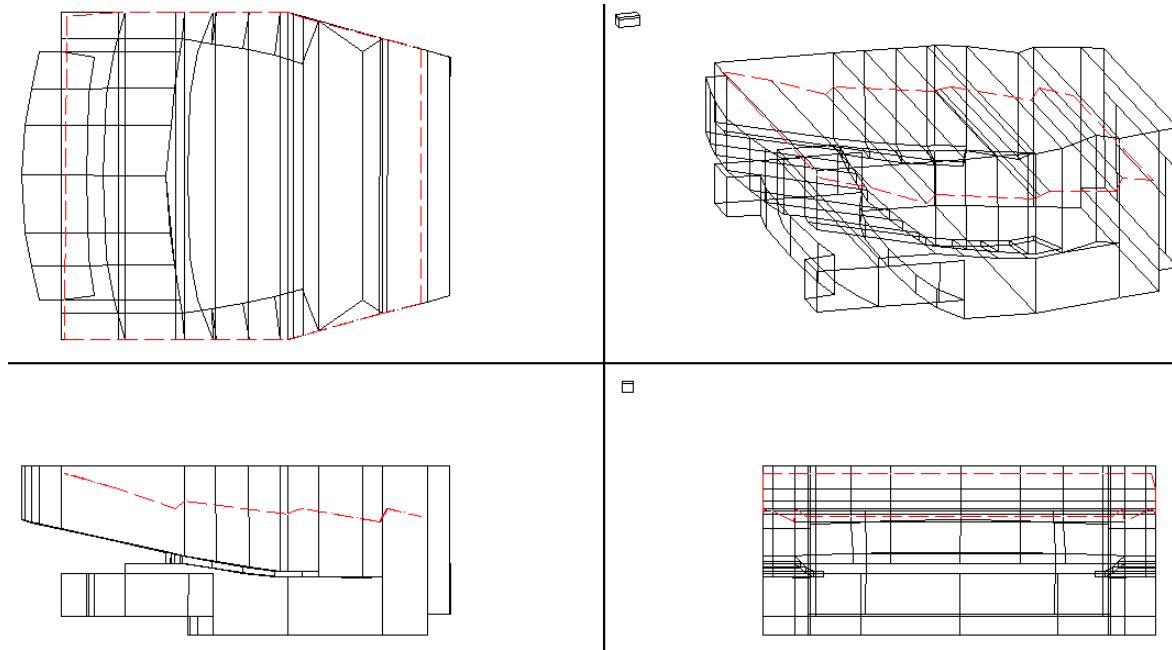
Ako se prepostavi da svi virtualni izvori generišu signal u fazi sa signalom realnog izvora, njihov zbir u prijemnoj tački daje rezultantni talas koji nastaje sabiranjem svih pristiglih zraka. Ako se pusti da zvučni izvor i svi njegovi likovi prvog i drugog reda istovremeno generišu jedan akustički impuls, u prijemnoj tački se dobija impulsni odziv prikazanog sistema prenosa. Vremenske i intenzitetske razlike komponenti u odzivu posledica su različitih dužina putanja do prijemne tačke. To je najznačajnija osobina geometrijskog modelovanja, jer se jedino pomoću njega može dobiti izgled impulsnog odziva. I pored svih nedstataka koje proizilaze iz polaznih pretpostavki, ova mogućnost je dovoljno značajna da se geometrijski model koristi u fazi projektovanja prostorija.

Za modelovanje zvučnog polja u prostorijama pomoću metode likova potrebno je napraviti mrežu likova refleksionih ravni do dovoljno visokog reda i u odnosu na njih definisati sve virtualne izvore. U slučaju paralelopipedne prostorije takva mreža likova može se jednostavno generisati i prostorno predstaviti grafički. Međutim, za prostorije proizvoljnog oblika to je veoma složen zadatak. Zbog toga se teorija likova u praksi uglavnom primenjuje za analizu prvih refleksija, kada se modelovanje završava kod prvog ili najviše drugog reda likova.

Rej trejsing

Geometrijsko modelovanje zvučnog polja metodom koja se naziva rej trejsing realizuje se puštajući veliki broj zvučnih zraka koji polaze od izvora uniformno raspoređeni po

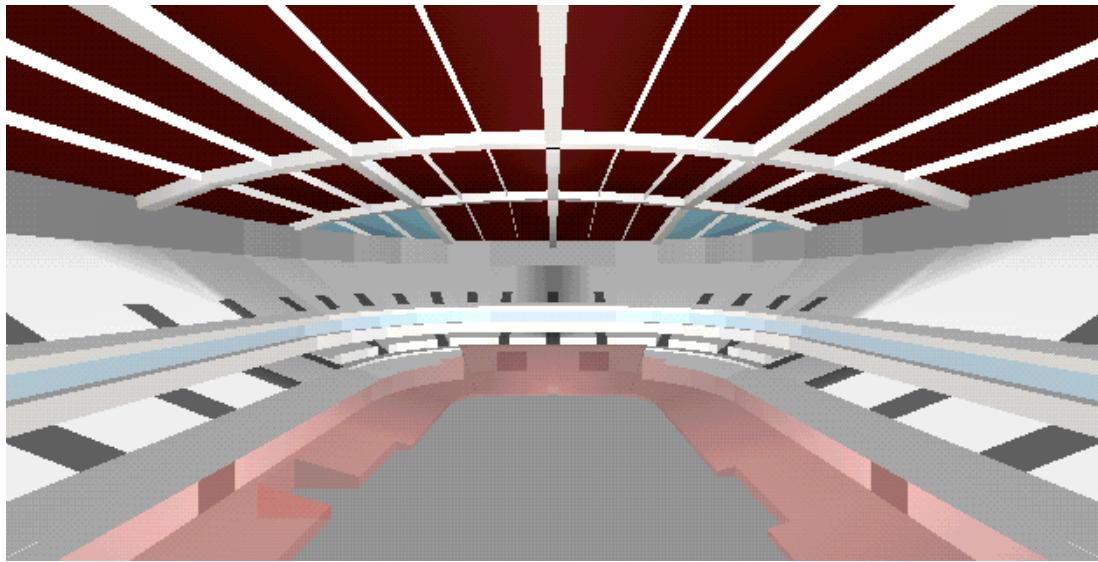
pravcima, i zatim se posmatra njihovo kretanje po prostoriji. Prostorija se modeluje svojim graničnim površinama koje se zadaju koordinatama temenih tačaka ili na neki drugi matematički pogodan način. Sve površine u takvom modelu moraju biti ravne, pa se zakrivljene površine aproksimiraju nizom manjih ravnih segmenata. Na slici 13.9 pokazan je model jedne sale pripremljen za rej trejsing analizu. Na slici su dati prikazi modela prostorije u aksonometriji i u tri projekcije.



Slika 13.9 – Jeden primer modela prostorije pripremljen za rej trejsing analizu (sala Doma omladine Beograda).

Svakoj površini u modelu prostorije dodeljuju se odgovarajuće vrednosti koeficijenta apsorpcije i koeficijenta difuznosti refleksija. Na slici 13.10 prikazan je jedan model prostorije („Beogradska arena“) u kom su bojama kodovane vrednosti koeficijenta apsorpcije površina da bi se olakšalo vizuelno snalaženje. Tamnije boje označavaju veće vrednosti koeficijenta apsorpcije a svetlijim su prikazane manje vrednosti.

U procesu simulacije puštaju se zraci iz izvora i analizira njihova putanja po prostoriji. Svakom od N zraka koji se pušta od izvora dodeljuje se neka početna energija koja je N -ti deo ukupne energije koju emituje izvor. Nakon svake refleksije zraka izračunava se njegov novi pravac kretanja i umanjenje energije usled apsorpcije i raspršavanja. Kretanje zraka po prostoriji prati se sve dok njegova energija ne padne ispod nekog zadatog praga. Nakon toga se smatra da on više ne doprinosi zvučnom polju. Procedura se ponavlja za sve puštene zrake.



Slika 13.10 – Jeden primer modela prostorije u kome su bojama vizuelno kodovane vrednosti koeficijenta apsorpcije površina (hala Beogradske arene).

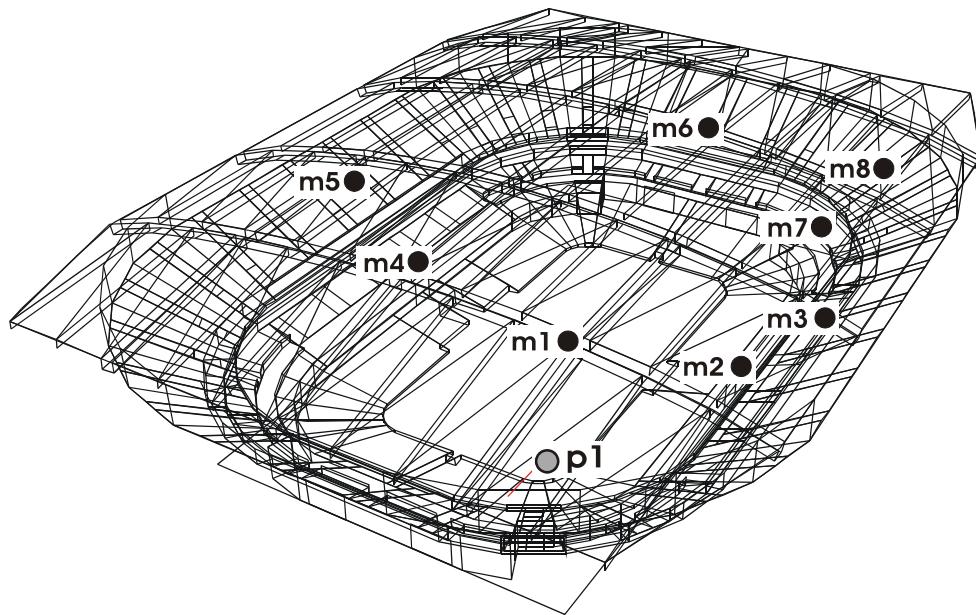
Ukupan broj zraka koji se pušta predstavlja parametar koji određuje preciznost modelovanja, odnosno njegovu prostornu rezoluciju. Povećavanjem broja zraka povećava se verovatnoća pogotka svih površina u prostoriji. Ako se pušta nedovoljan broj zraka, postoji mogućnost da neke površine u prostoriji ne budu pogodjene, što znači da se pri modelovanju zvučnog polja neće uzeti u obzir njihov doprinos. U praksi se modelovanje vrši u procedurama gde N može biti od nekoliko hiljada, do čak reda stotina hiljada. Jasno je da se takva procedura može izvršavati samo odgovarajućim softverskim alatima. Za modelovanje zvučnog polja metodom rej trejsinga na tržištu postoje mnogi, manje ili više sofisticirani komercijalni softverski paketi.

Rej trejsing je metoda modelovanja zvučnog polja koja omogućava da se dobije impulsni odziv prostorije. U prostoriji se posebno definiše tačka u kojoj se nalazi prijemnik. Pre puštanja zraka u odabranoj prijemnoj tački definiše se takozvana prijemna sfera. Naime, bez obzira koliko je veliki broj generisanih zraka, ako se kao prijemnik postavi samo kao jedna tačka verovatnoća da će je neki zrak u svom kretanju pogoditi veoma je mala. Zbog toga se u procesu simulacije kao prijemno mesto definiše sfera. Njen poluprečnik se podešava prema okolnostima, i može biti reda veličine 1 m ili manje. Na slici 13.11 prikazan je jedan softverski model prostorije (ponovo „Beogradska arena“) i u njemu su iznačeni položaji izvora zvuka (P1) i položaji prijemnih sfera (od m1 do m8).

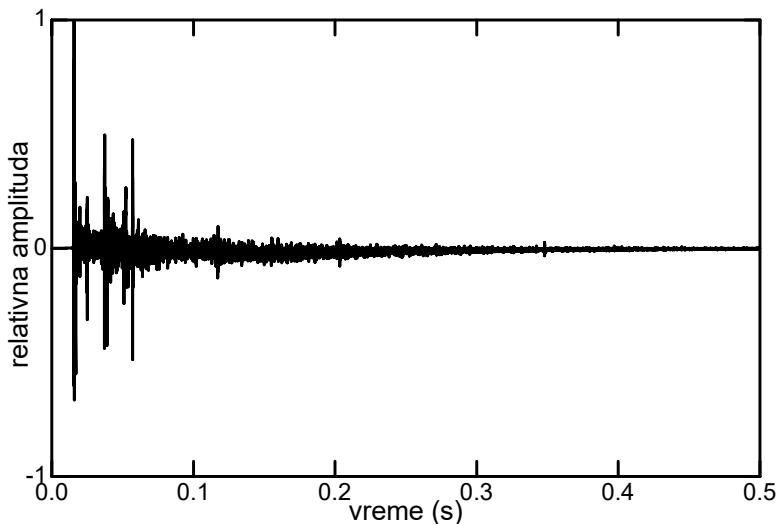
Svaki pogodak prijemne sfere zrakom registruje se. Pri tome se beleže pravac nailaska zraka, njegov relativni intenzitet i relativno kašnjenje. Ovakvom simulacijom impulsni odziv prostorije se dobija sabiranjem svih pogodaka prijemne sfere, to jest:

$$h(t) = \sum_n A_n \delta(t - t_n) \quad (13.6)$$

gde je A_n relativna amplituda, a t_n relativno kašnjenje.



Slika 13.11 – Model prostorije sa slike 10.10 sa definisanim položajem izvora zvuka (p1) i prijemnih mesta u kojima se postavljaju prijemne sfere (m1 – m8).



Slika 13.12 – Primer impulsnog odziva jedne sale dobijen rej trejsing metodom simulacije.

Primer jednog impulsnog odziva dobijenog simulacijom rej trejsing metodom prikazan je na slici 13.12. Vidi se da njegova struktura ima formu koja je bliska realnim odzivima snimljenim u prostorijama. Međutim, uvek treba imati u vidu da je u ovakovom modelovanju zanemarena difrakcija koja strukturu putanja zvučne energije čini složenijom od putanja kakve imaju zraci. Zbog toga je ovako dobijen impulsni odziv samo aproksimacija realnog odziva, ali je i kao takav veoma koristan za predikciju odziva prostorija u procesu projektovanja, odnosno akustičkog dizajna raznih sala i drugih sličnih prostora.

14. OPŠTA TEORIJA ELEKTROAKUSTIČKIH PRETVARAČA

Elektroakustički pretvarači su uređaji koji se nalaze na početku i na kraju svakog elektroakustičkog lanca. Pod elektroakustičkim lancem se podrazumeva tehnički sistem u kome se zvučna informacija prenosi u električnom domenu. Takva okolnost se u praksi u najvećoj meri pojavljuje u audio sistemima, gde se zvučna informacija koju generišu neki zvučni izvori prenosi udaljenim slušaocima. Takođe značajna primena elektroakustičkih pretvarača je u oblasti akustičkih merenja, gde se iz akustičkog signala određuju razni relevantni pokazatelji, kao i u oblasti infravzuka i ultrazvuka gde se zvučni signal koristi za različite inženjerske ciljeve.

Činjenica je da se analiza stanja u zvučnom polju uvek obavlja u električnom domenu, a na osnovu električnog signala koji reprezentuje neki fizički pokazatelj polja. Pretvaranje tog pokazatelja polja u električni signal vrše elektroakustički pretvarači. Kada se analizira zvučno polje u vazduhu ili drugim fluidima parametar koji se posmatra kao pokazatelj stanja je zvučni pritisak, pa je za analizu potrebno da se dobije električni signal koji će biti ekvivalent pritiska. Kada se analizira zvučno polje u čvrstim telima električni signal može biti ekvivalent brzine, pomeraja ili ubrzanja.

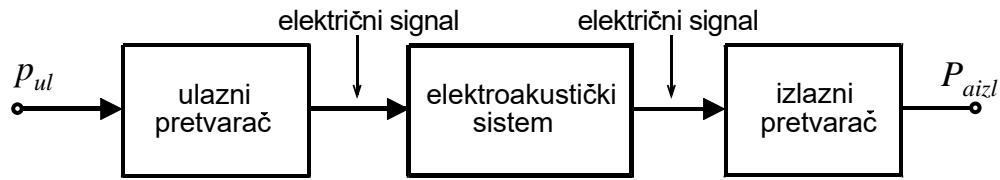
S druge strane postoji potreba da se registrovan zvučni signal iz električnog ponovo vrati u akustički domen, odnosno da se generiše zvučne polje. Za to je potreban kontrolisani zvučni izvor koji će na osnovu pobude iz električnog domena generisati akustički protok, i koji će dalje na svojoj impedansi zračenja razvijati zvučnu snagu. Tako u mediju gde se taj izvor nalazi nastaje zvučno polje. Funkciju kontrolisanog zvučnog izvora u takvim okolnostima takođe vrši jedna vrsta elektroakustičkih pretvarača.

Bez obzira na to da li je u pitanju pretvaranje akustičke pobude u električni signal ili generisanje zvučnog polja na osnovu električne pobude, konstrukcije koje se danas koriste za te funkcije u vazduhu kao mediju imaju izvesne zajedničke osobine. U ovom poglavlju su te zajedničke osobine detaljnije izložene.

14.1 Vrste i struktura elektroakustičkih pretvarača

Opšta principijelna šema jednog elektroakustičkog lanca prikazana je na slici 14.1. Vidi se da postoje dve vrste elektroakustičkih pretvarača: na ulazu i na izlazu sistema. Zato se pretvarači po svojoj koncepciji dele na ulazne i izlazne. Ulazni pretvarač se nalazi na ulazu elektroakustičkog lanca i on posreduje između zvučnog polja i električnog domena.

Izlazni pretvarač se nalazi na kraju elektroakustičkog lanca, i on na osnovu električnog signala sa izlaza sistema generiše zvučnu snagu kojom se stvara zvučno polje u mediju.



Slika 14.1 - Elektroakustički lanac sa pretvaračima na ulazu i izlazu

Obe vrste elektroakustičkih pretvarača mogu se posmatrati kao sistemi prenosa za sebe. Njihova specifičnost u odnosu na druge sisteme prenosa u elektrotehnici je u tome što su im ulazna i izlazna veličina u različitim fizičkim domenima. Ako je ulazna veličina akustička, izlazna je električni signal i obrnuto. To znači da se u njima vrši konverzija energije između dva različita fizička domena.

Elektroakustički pretvarač kao sistem prenosa

Elektroakustički pretvarači su sistemi prenosa koji se mogu definisati preko svojih ulaznih i izlaznih veličina. Ako je prilagođen za rad u vazduhu ili u vodi ulazna veličina ulaznog pretvarača je zvučni pritisak. Ako je predviđen da se koristi za zvučno polje u čvrstim telima ulazna veličina je neki pokazatelj u čvrstim materijalima (pomeraj, brzina, ubrzanje). Izlazni signal ulaznih pretvarača je neka električna veličina, po pravilu napon. Ulazni elektroakustički pretvarač za vazdušnu sredinu sa pritiskom na ulazu i naponom na izlazu principijelno je prikazan na slici 14.2.



Slika 14.2 – Ulagni elektroakustički pretvarač sa označenom ulaznom i izlaznom veličinom

U zavisnosti od medija za koji je pretvarač prilagođen, odnosno od ulazne fizičke veličine koju pretvara u napon, ulazni pretvarači mogu biti: mikrofoni, kontaktni mikrofoni i hidrofoni. Pojam mikrofona često se koristi kao opšti naziv za ulazne pretvarače, mada je to uobičajeni pojmovi kojima se označavaju pretvarači za rad u vazduhu. Kontaktni mikrofon je pretvarač predviđen za rad sa zvukom u čvrstim telima. Pojam „kontaktni“ podrazumeava da se za njegov rad mora obezrediti fizički kontakt sa telom u kome se registruje zvuk, što se obezbeđuje adekvatnim pričvršćivanjem za površinu tela. Zbog činjenice da se u ovakvim pretvaračima za konverziju kretanja u napon najčešće koristi sklop sa piezo efektom (izlazni signal je proporcionalan ubrzanzu površine na mestu kontakta) oni se uobičajeno nazivaju akcelerometri. Integracijom signala iz akcelerometra može se dobiti signal ekvivalentan brzini ili pomeraju.

Jedna specifična vrsta kontaktnog mikrofona je laringofon. To je pretvarač koji se koristi u sistemima za govornu komunikaciju u veoma bučnim ambijentima. Zbog toga se uobičajeno koristio u komunikacionim sistemima tenkova. Laringofon se postavlja na vrat govornika, približno u zoni glasnica i registruje vibracije tkiva pri govoru. Njegova osetljivost na pobudu iz vazduha veoma je mala, čime se postiže imunost na buku u okruženju. Ulazni pretvarač prilagođen za rad u vodi, odnosno u tečnostima, naziva se hidrofon.

Izlazni pretvarači su po svojoj funkciji električnim signalom kontrolisani izvori zvuka. Zbog toga je kao njihova izlazna veličina definisana zvučna snaga, odnosno akustički protok koji generiše snagu na impedansi zračenja. Izlazna snaga nastaje na osnovu električne snage koja se dovodi na ulaz u pretvarač. Zbog toga izlazni pretvarači predstavljaju konvertore snage iz električnog u akustički domen, kao što je prikazano na slici 14.3. Snaga zračenja izlaznog pretvarača je, po definiciji:

$$P_a = qZ_{az} \quad (14.1)$$

što je opšta osobina zvučnih izvora. Kao posledica generisanja akustičke snage u okruženju nastaje zvučno polje. Prema tome, rad pretvarača ne zavisi samo od njegove konstrukcije, već i od fizičkih okolnosti u okruženju koje se preslikavaju u impedansu zračenja. Zbog toga se u radu izlaznih elektroakustičkih pretvarača postavlja pitanje prilagođenja na impedansu u okruženju.



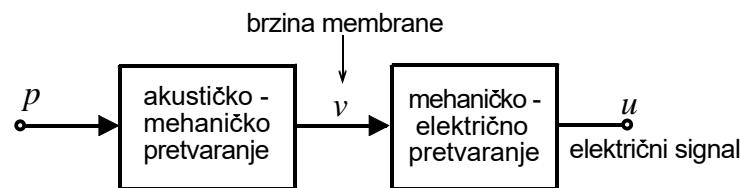
Slika 14.3 – Izlazni elektroakustički pretvarač sa označenim ulaznim i izlaznim veličinama

U zavisnosti od medija za koji su prilagođeni, izlazni pretvarači korišćeni u praksi su zvučnici i slušalice, vibracioni pobuđivači strukturnog zvuka i hidrofoni. Zvučnici i slušalice prilagođeni su radu u vazduhu, što znači maloj vrednosti impedanse vazdušne sredine. Pri tome, zvučnik je pretvarač namenjen zračenju zvuka u šire okruženje, a slušalice su prilagođene zračenju u malu vazdušnu komoru koja se formira između njih i bubne opne slušaoca. Vibracioni pobuđivači, najčešće nazivani kratko vibratori ili „šejkeri“, služe za generisanje zvuka u čvrstim telima. Takav je, na primer, koštani vibrator koji se koristi pri audiometrijskom ispitivanju čula sluha. Njime se zvuk generiše direktno u mastoidnoj kosti iza ušne školjke. Izlazni pretvarači koji su prilagođeni za rad u vodi nazivaju se hidrofoni, isto kao i ulazni pretvarači namenjeni vodi kao mediju. Kod njih ne postoji terminološko razdvajanje ulaznih i izlaznih pretvarača.

Dvostepenost pretvaranja

U svim elektroakustičkim pretvaračima koji su danas u upotrebi proces pretvaranja između akustičkog i električnog domena je dvostepen. U njima su prisutna dva procesa konverzije. Između akustičkog i električnog domena nalazi se membrana kao posrednik, čije se oscilovanje pojavljuje kao međufaza u tom procesu konverzije.

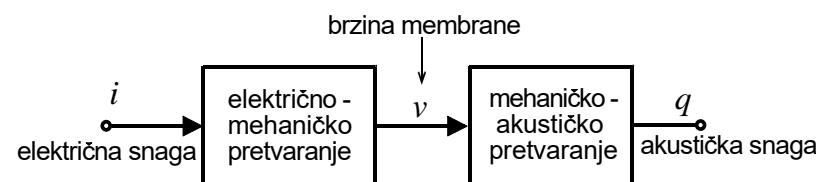
Dvostepenost pretvaranja u ulaznim pretvaračima ilustrovana je na slici 14.4. U prvoj fazi pretvaranja pobuda iz zvučnog polja izaziva kretanje membrane. Zbog toga je ta faza pretvaranja označena kao akustičko-mehaničko pretvaranje. Ona se može posmatrati kao nezavistan blok kome je ulazna veličina zvučni pritisak, a izlazna veličina je brzina oscilovanja membrane. U procesu rada pretvarača membrana je izložena zvučnom polju i praktično je njegov sastavni deo, jer je i kretanje membrane oblik zvuka. Od načina kako je membrana izložena delovanju zvučnog polja zavisi usmerenost mikrofona, što je detaljnije objašnjeno kasnije u poglavljiju o mikrofonima. Zbog toga je granica između akustičkog domena i električnog domena na membrani, što znači unutar konstrukcije pretvarača.



Slika 14.4 - Dva stepena pretvaranja u ulaznom pretvaraču

U drugoj fazi pretvaranja kretanje membrane se na neki pogodan način očitava i konvertuje u električni signal. Ta faza je označena kao mehaničko-električno pretvaranje. Proces pretvaranja se obavlja u posebnom bloku kome je ulazna veličina brzina kretanja membrane (eventualno njen pomeraj, što zavisi od principa na kome se vrši pretvaranje), a izlazna veličina je napon.

Dvostepenost pretvaranja u izlaznim pretvaračima ilustrovana je na slici 14.5. U prvoj fazi pretvaranja pobuda iz električnog domena pokreće jedan linearni motor koji je povezan sa membranom i pokreće je. Ta faza pretvaranja označena je kao električno-mehaničko pretvaranje u kojoj je ulazna veličina električna snaga, odnosno struja, kojom se pokreće linearni motor, a izlazna veličina je brzina oscilovanja membrane.



Slika 14.5 - Dva stepena pretvaranja u izaznom pretvaraču

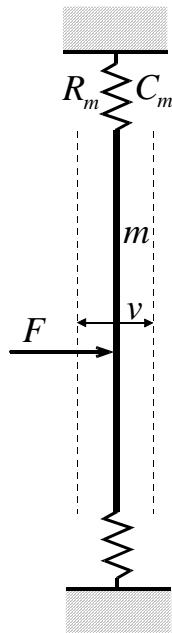
Membrana izlaznih pretvarača pravi se tako da se ponaša kao kruti klip. Svojim kretanjem ona generiše akustički protok, odnosno zvučnu snagu i tako vrši mehaničko-akustičko pretvaranje. Prema tome, to je proces u kome je ulazna veličina brzina membrane, a izlazna veličina je akustički protok. Kao i kod mikrofona, i kod izlaznih pretvarača fizički odnos membrane i okruženja utiče na rezultat rada pretvarača. Može se reći da je i ovde granica između električnog i akustičkog domena unutar pretvarača na granici između dva stepena pretvaranja.

Zajednička karakteristika svih pretvarača, ulaznih i izlaznih, je prisustvo membrane. Membrana je jedan mehanički sistem sa svojim specifičnostima koje određuju kvalitet pretvaranja u celini. Karakteristike membrane kao sistema prenosa opisane su u nastavku. Kroz istoriju razvoja mikrofona bilo je pokušaja da se napravi pretvarač koji bi kretanje molekula vazduha u zvučnom polju na neki način direktno pretvarao u električni signal, to jest bez posredovanja membrane. Međutim, do danas takav alternativni način pretvaranja, a koji bi svojim performansama mogao da konkuriše postojećim mikrofonima, još nije razvijen. Bilo je takođe pokušaja da se izlazni pretvarač napravi na način koji bi omogućio direktno pretvaranje, bez posredstva membrane. Ali, kao i kod mikrofona, ni jedan predloženi sistem do sada nije mogao da nadmaši performanse postojećih zvučnika. Zbog toga ta mogućnost i dalje ostaje stvar budućnosti.

14.2 Membrana kao mehanički sistem

Membrana je jedan mehanički sistem čije se karakteristike u analizi pretvarača moraju posmatrati u mehaničkom domenu. Svaka membrana, bez obzira na njenu veličinu i detalje izrade ima neku svoju masu m koja može da se pokreće u zadatim okvirima pomeraja duž jedne ose. Veličina maksimalnog pomeraja membrane ograničena je njenim konstruktivnim detaljima. Drugi parametar membrane je elastičnost C_m koja u procesu kretanja masu teži da vrati u početni položaj. U materijalu membrane uvek postoje i neki gubici zbog toga što se mehanička energija kretanja usled unutrašnjeg trenja u materijalu pretvara u toplotu. Ti gubici se opisuju mehaničkom otpornošću R_m . Ta tri mehanička, m , C_m i R_m prikazana su na slici 14.6.

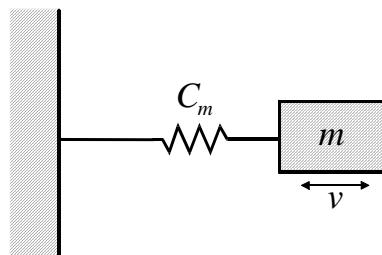
Modelovanja membrane bazirano je na primeni elektro-mehaničkih analogija. To je pristup u kome se ponašanje jednostavnih mehaničkih sistema opisuje takozvanim ekvivalentnim električnim kolima. Metoda se zasniva na formalnoj analogiji koja postoji između pojava u mehaničkim sistemima, gde spada i membrana, i pojava u električnim kolima. Analogija se ogleda u činjenici da se procesi u mehaničkim sistemima i u električnim kolima dešavaju na način koji se opisuje istim matematičkim zakonitostima. To znači da među fizičkim veličinama koje se mogu definisati u jednom i drugom sistemu postoje identične zavisnosti koje se zbog toga opisuju identičnim matematičkim relacijama.



Slika 14.6 - Skica izgleda membrane sa označenim mehaničkim elementima od kojih se sastoji

Princip mehaničko - električnih analogija

Da bi se detaljnije objasnio princip modelovanja mehaničkih sistema pomoću ekvivalentnih električnih kola, na slici 14.7 prikazan je najjednostavniji mehanički sistem. On se sastoji od samo dva elementa: mase m i opruge čija je mehanička elastičnost C_m . Ta dva elementa su međusobno povezana. Elastičnost je dimenziono pomeraj po jedinici sile (opruga se može karakterisati i njenom krutošću, koja je jednaka recipročnoj vrednosti elastičnosti). Prikazani mehanički sistem ima samo jedan stepen slobode, pa je njegovo kretanje moguće samo duž jedne, u ovom slučaju horizontalne. U prikazanom mehaničkom sistemu zanemaruje se način na koji je obezbeđeno da masa stoji u prostoru. Takođe je za početak zanemareno trenje, odnosno smatra se da su energetski gubici usled trenja jednaki nuli.



Slika 14.7 - Slika najjednostavnijeg mehaničkog sistema s jednim stepenom slobode.

Za prikazanu masu pretpostavlja se da se svi njeni delovi kreću jedinstveno, odnosno da se sve njene tačke kreću istom brzinom v . Takvo telo naziva se tačkasta masa, jer se kretanje i sila koja iz toga proizilazi neće promeniti ako se zadata vrednost mase dodeli tački smeštenoj u težištu nacrtanog tela, bez obzira na njegove realne dimenzije. Uticaj

opruge u sistemu nastaje njenim deformacijama, sabijanjem i rastezanjem. Deformacija je funkcija relativnog kretanja njenih krajeva. U prikazanom sistemu jedan kraj opruge je fiksiran za nepomičnu tačku (levi kraj na slici), a drugi kraj se kreće zajedno sa masom brzinom v . Zbog toga je brzina kretanja opruge jednaka brzini kretanja mase.

U sistemu sa slike 14.7 javljaju se dve sile: inercijalna sila mase u kretanju i sila usled deformacije opruge. Njutnov zakon za tačkast masu je:

$$F = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (14.2)$$

Ako je kretanje mase harmonijsko, pomeraj se može predstaviti kao $x = \hat{x}e^{j\omega t}$, pa je:

$$\begin{aligned} v &= \frac{dx}{dt} = j\omega x \\ a &= \frac{dv}{dt} = j\omega v \end{aligned} \quad (14.3)$$

Inercijalna sila je:

$$F = j\omega mv \quad (14.4)$$

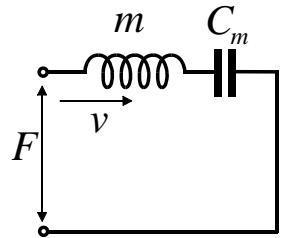
Za oprugu važi Hukov zakon po kome je sila usled deformacije opruge:

$$F = \frac{x}{C_m} \quad (14.5)$$

Za prostoperiodično kretanje pomeraj je $x = v / j\omega$. Zamenom u izraz (14.5) dobija se da je sila pri prostoperiodičnom kretanju u sistemu:

$$F = \frac{v}{j\omega C_m} \quad (14.6)$$

Upoređujući dobijene izraze za sile u ovom mehaničkom sistemu sa elementarnim izrazima za električna kola vidi se da u mehaničkom domenu sila ima isto formalno mesto kao napon u električnim kolima, a da je brzina kretanja formalno na istim mestima u izrazima kao struja u električnim kolima. U tim izrazima umesto induktivnosti i kapacitivnosti figurišu masa i elastičnost. Na osnovu toga može se zaključiti da su relacije između osnovnih fizičkih veličina u mehaničkom sistemu sa slike 14.7 identične relacijama između osnovnih većina u električnim kolima, ako se pri tome naponi zamene silama, struje zamene brzinama, induktivnosti zamene masama i kapacitivnosti zamene elastičnostima. Na osnovu toga, ponašanje mehaničkog sistema sa slike 14.7 identično je ponašanju ekvivalentnog kola čija je šema prikazana na slici 14.8.



Slika 14.8 - Ekvivalentna električna šema jednostavnog mehaničkog sistema sa slike 14.7

U mehaničkim sistemima takođe se javlja i sila kočenja koja nastaje kao posledica trenja. Ona u sistem unosi pojavu disipacije, to jest dolazi do pretvaranja energije mehaničkog kretanja u toplotu. Gubici se predstavljaju odgovarajućom vrednošću mehaničke otpornosti R_m . Sila kočenja je proporcionalna brzini v , pa je:

$$F = R_m v \quad (14.7)$$

Na osnovu ovog izraza i ustanovljenih analogija vidi se da je mehanička otpornost analogna električnoj otpornosti.

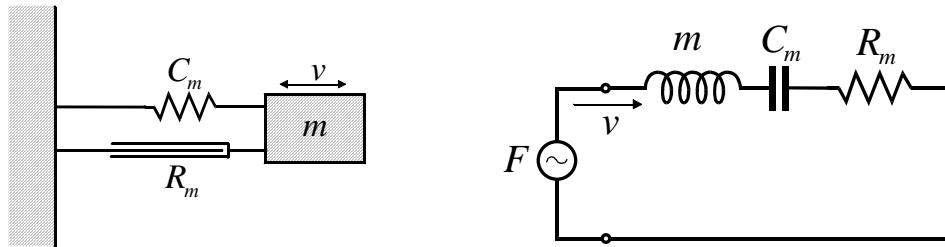
Sledeći princip analogija, u ekvivalentnim električnim kolima kojima se modeluje rad mehaničkih sistema može se definisati impedansa. Ona je po svojoj prirodi, odnosno dimenziono, mehanička veličina. Impedansa je po definiciji odnos pobude i odziva, što u ovom slučaju znači odnos sile i brzine, pa je mehanička impedansa:

$$Z_m = \frac{F}{v} \quad (14.8)$$

U mehaničkom sistemu delovanju sile koja stvara kretanje brzinom v suprotstavlja se mehanička impedansa Z_m .

Ekvivalentna električna šema membrane

Sledeći princip predstavljanja prostih mehaničkih sistema elementima kao na slici 14.7, može se na istim principima nacrtati pojednostavljen mehanički sistem koji odgovara mehaničkim svojstvima membrane sa slike 14.6. Ovaj mehanički sistem je prikazan na levom delu slike 14.9. Svi elementi u sistemu, masa m , elastičnost C_m i mehanička otpornost R_m , kreću se istom brzinom v . Na osnovu toga može se nacrtati ekvivalentna električna šema membrane koja može pomoći da se razumeju pojave pri njenoj pobudi. Ova šema prikazana je na desnoj strani slike 14.9. Vidi se da se mehanička impedansa membrane sastoji od redne veze njenih mehaničkih elemenata i kroz sve te elemente "teče" ista brzina v . Sa ekvivalentne električne šeme jasno je da membrana predstavlja rezonantni mehanički sistem.



Slika 14.9 - Skica mehaničkog sistema membrane (levo) i njenog ekvivalentnog električnog kola (desno).

Na osnovu prikazane ekvivalentne električne šeme sa slike 14.9 može se odrediti mehanička impedansa kojom se membrana suprotstavlja dejству spoljašnje sile:

$$Z_m = R_m + j\omega m + \frac{1}{j\omega C_m} \quad (14.9)$$

Zamenom ovog izraza za impedansku u izraz (14.8) može se odrediti brzina kretanja membrane:

$$v = \frac{F}{Z_m} = \frac{F}{R_m + j\omega m + \frac{1}{j\omega C_m}} \quad (14.10)$$

Na osnovu analogije između električnih i mehaničkih sistema, frekvencija rezonance membrane definisana je vrednostima njenih mehaničkih elemenata:

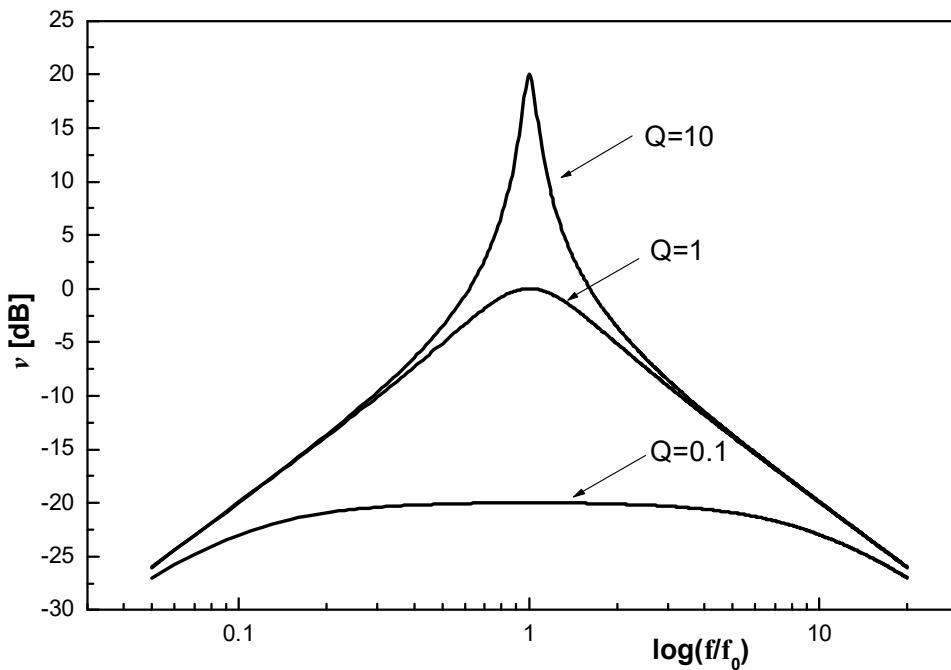
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{mC_m}} \quad (14.11)$$

Za membranu kao rezonantni sistem može se definisati Q faktor, koji je:

$$Q = \frac{\omega_0 m}{R_m} \quad (14.12)$$

Na frekvenciji rezonance brzina membrane srazmerna je samo mehaničkim otporima u njoj, odnosno zavisi od Q faktora. Promena brzine membrane u funkciji frekvencije sa Q faktorom kao parametrom prikazana je na slici 14.10. Brzina je na ordinati predstavljane u logaritamskoj razmeri, to jest u decibelima, relativno u odnosu na brzinu na rezonanci kada je $Q = 1$.

Sa slike 14.10 vidi se da je odziv membrane kao rezonantnog sistema u osnovi nelinearan po frekvencijama. Bez obzira na vrednost Q faktora, brzina se pri konstantnoj pobudnoj sili značajno menja sa frekvencijom. Pri velikim vrednostima Q faktora u odzivu postoji izraženo pojačanje na rezonanci. Jasno je da takva osobina predstavlja stanoviti problem kada se membrana koristi u pretvaraču kod koga se teži da mu odziv bude maksimalno linearan u čitavom radnom opsegu frekvencija. Zbog toga je nužno da se na neki način postigne linearizacija rezonantnog odziva membrane.



Slika 14.10 - Promene brzine membrane oko rezonance u funkciji frekvencije.

Linearizacija odziva membrane u opsegu frekvencija koji odgovara čujnom opsegu moguća je na tri načina.

1. Kada je pobudna frekvencija mnogo viša od frekvencije rezonance, onda važi:

$$j\omega m \gg \left| R_m + \frac{1}{j\omega C_m} \right| \quad (14.13)$$

Iz izraza (14.10) sledi da je u takvim uslovima brzina membrane:

$$|v| = \frac{|F|}{\omega m} \quad (14.14)$$

Prema tome, na frekvencijama mnogo višim od rezonance brzina je obrnuto srazmerna frekvenciji i masi. Zbog toga brzina membrane pri konstantnoj pobudi opada s nagibom 6 dB/oktavi, odnosno 20 dB/dekadi. Ovakav režim rada membrane naziva se "režim inercijalnog kočenja", jer njeno kretanje zavisi samo od mase, odnosno inercije membrane. Praveći membranu čija je mehanička rezonanca ispod radnog opsega frekvencija, što znači na dovoljno niskim frekvencijama, odziv membrane je ravan, ali sa konstantnim padom prema višim frekvencijama. Linearizacija pretvarača sa takvom membranom moguća je ako se na neki pogodan način iskompenzuje nagib 6 dB/oktavi. Ovakav pristup linearizaciji koristi se kod zvučnika.

2. Kada je pobudna frekvencija mnogo niža od frekvencije rezonance, onda važi:

$$j\omega m \ll |R_m + j\omega C_m| \quad (14.15)$$

Iz izraza (14.10) sledi da je tada brzina membrane:

$$|v| = |F| \omega C_m \quad (14.16)$$

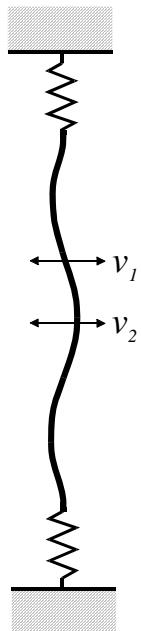
Prema tome, na frekvencijama mnogo nižim od rezonance membrane brzina je direktno srazmerna frekvenciji i elastičnosti. Ovo znači da ispod rezonance brzina membrane pri konstantnoj pobudi raste po frekvencijama sa nagibom 6 dB/oktavi, odnosno 20 dB/dekadi. Ovakav režim rada membrane naziva se "režim elastičnog kočenja", jer od svih njenih parametara brzina zavisi samo od elastičnosti. Prema tome, praveći membranu čija je mehanička rezonanca iznad radnog opsega frekvencija, to jest na dovoljno visokim frekvencijama, odziv membrane je ravan ali sa konstantnim porastom. To omogućava da se postigne linearizacija rada pretvarača uz neki pogodan način kompenzacije nagiba 6 dB/oktavi. Ovakav pristup se koristi u jednoj vrsti mikrofona (elektrostatički mikrofoni).

3. Sa slike 14.10 vidi se da se izvesna linearizacija odziva membrane postiže i kada je vrednost Q faktora veoma mala. Sa dovoljnim „kvarenjem“ Q faktora može se postići da odziv bude linearan u dovoljno širokom opsegu frekvencija. Nedostatak ovakvog pristupa je u tome što se time smanjuje veličina odziva, što znači da se smanjuje njena osetljivost na spoljašnju pobudu. Ovakav pristup se primenjuje u jednoj vrsti mikrofona (elektrodinamički mikrofoni).

Oblast primenjivosti modela membrane sa ekvivalentnom šemom

Modelovanje rada membrane pomoću ekvivalentnog električnog kola primenjivo je samo dok se membrana u svom kretanju ponaša kao tačkasta masa. To znači da ona mora biti dovoljno kruta tako da se kreće kao klip. Da bi to bilo zadovoljeno potrebno je da u materijalu od koga je napravljena membrana nema efekta prostiranje zvuka, odnosno da talasna dužina zvuka u materijalu bude mnogo veća od dimenzija membrane. Pod tim uslovima sve tačke membrane kreću se jedinstveno, s istom brzinom. Ovaj uslov je identičan sa uslovom koji je definisan u opisu modelovanja akustičkih kola ekvivalentnim šemama, što je prikazano u poglavlju 8.

U realnim membranama postoji neka frekvencija iznad koje se u materijalu postaje primetan efekat prostiranja zvuka. Tada se u pojedinim tačkama po površini membrane javljaju fazne razlike, što vodi ka situaciji koja je uprošćeno prikazana slici 14.11. Na dovoljno visokim frekvencijama brzina oscilovanja po površini membrane postaje različita, kao što je prikazano na slici. U materijalu membrane takođe se pojavljuju rezonance koje se manifestuju stojećim talasima, a brzine na pojedinim njenim delovima razlikuju se po fazama.



Slika 14.11 – Talasne pojave u membrani kada prestaje da važi model sa ekvivalentnom šemom

Prema tome, model koji se zasniva na ekvivalentnoj šemi važi za dovoljno niske frekvencije. Kada nastupe pojave prostiranja u membrani, njen rad se više ne može modelovati ekvivalentnom šemom, a interakcija sa zvučnim poljem tada postaje složenija. Tada se membrana mora posmatrati kao distribuirana masa, pri čemu svaki element mase ima drugačije kretanje. U takvim okolnostima za modelovanje membrane moraju se koristiti sofisticiraniji matematički modeli. Međutim, takvo ponašanje membrane ima ukupno negativno dejstvo na rad pretvarača, pa je cilj da se izbegnu takve pojave u njihovom radnom opsegu frekvencija.

14.3 Sprega membrane sa akustičkim okruženjem

U svim pretvaračima, ulaznim i izlaznim, rad se zasniva na razmeni energije između membrane kao mehaničkog sklopa i njenog okruženja u kome postoji zvučno polje. Zbog toga se membrana i okruženje moraju posmatrati kao dva elementa jednog dinamičkog sistema, u smislu kako je to ranije objašnjeno u poglavlju 2 (koncept impedansi). U procesu razmene energije između zvučnog polja i membrane postoji interakcija koja zavisi od združenog uticaja parametara iz mehaničkog i akustičkog domena. Da bi se mogao modelovati rad nekog pretvarača neophodno je na neki način formirati jedinstven model koji će uključiti relevantne veličine i membrane i akustičkog okruženja.

Model veze između mehaničkog i akustičkog domena

Uključivanje interakcije membrane i okruženja u jedinstven model moguće je na osnovu osnovnih fizičkih zakona. Neke veze između fizičkih parametara kojim se opisuje rad membrane i akustičkih veličina već su ranije definisane. Kada na membranu deluje zvučno polje, onda je mehaničke sile koja deluje na nju

$$F = pS \quad (14.17)$$

Impedansa koja se suprotstavlja dejству mehaničke sile je po definiciji odnos pobude i odziva:

$$Z_m = \frac{F}{v} \quad (14.18)$$

Ako se membrana nečim pobudi na kretanje, onda je protok koji svojim oscilovanjem stvara u okolnom vazduhu:

$$q = S v \quad (14.19)$$

Zamenom iz (14.17) i (14.19) u izraz za impedansu (14.18) dobija se da je:

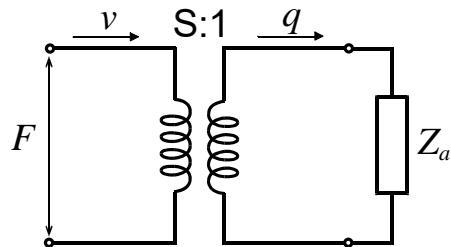
$$Z_m = \frac{Sp}{\frac{q}{S}} = S^2 \frac{p}{q} = S^2 Z_a \quad (14.20)$$

Vidi se da na dejstvo sile koja spolja deluje na membranu i pokreće je utiče akustička impedansa Z_a koja se preslikava iz akustičkog u mehanički domen. Iz izraza (14.20) vidi se da je faktor preslikavanja akustičke veličine u mehanički domen S^2 . Ta činjenica omogućava da se analogije mehaničkih sistema i električnih kola za slučaj mehaničkog kola membrane prošire uticajem akustičkog okruženja.

Kod idealnog transformatora u elektrotehnici važe relacije između primara i sekundara:

$$U_1 = nU_2; I_1 = \frac{I_2}{n}; Z_1 = n^2 Z_2 \quad (14.21)$$

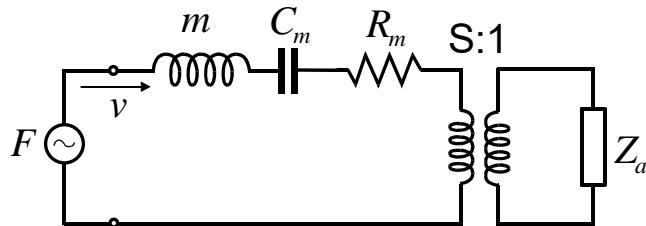
gde je n prenosni odnos transformatora. Upoređujući izraz (14.20) sa relacijama u elektrotehnici definisane sa (14.21) može se zaključiti da se veza membrane kao mehaničkog sistema i akustičkog okruženja može opisati ekvivalentnim idealnim transformatorom prenosnog odnosa S . Ovo je prikazano na slici 14.12. Koristeći poznate formule iz elektrotehnike odatle se mogu definisati i relacije između drugih akustičkih i mehaničkih veličina u primarnom i sekundarnom kolu ovog ekvivalentnog transformatora, to jest u mehaničkom kolu membrane i zvučnom polju oko nje.



Slika 14.12 - Ekvivalentni idealni transformator koji vezuje akustički i mehanički domen

Primeri realni membrana i njihovih ekvivalentnih šema

Na osnovu prikazanog principa kojim se opsuje sprega membrane sa okruženjem moguće je odrediti ekvivalentna električna kola za neke jednostavne primere. U prethodno razmatranoj sprezi membrane sa zvučnim poljem zanemarene su njene realne osobine: masa elastičnost i mehanička otpornost. Ako se ti parametri uzmu u obzir dobija se ekvivalentna šema koja je prikazana na slici 14.13.

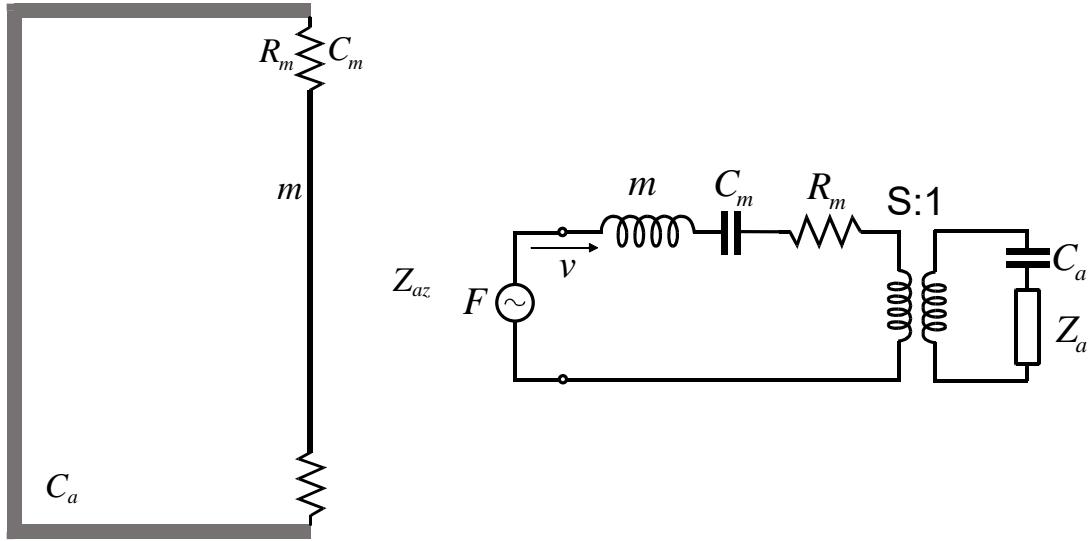


*Slika 14.13 - Ekvivalentna šema
membrane sa spregnutim
akustičkim okruženjem*

Vidi se da je akustička impedansa kojom je opterećena membrana u kolu u rednoj vezi sa njenim mehaničkim elementima. Preslikavanjem akustičke impedanse sa sekundara transformatora na primar dobija se ekvivalentno redno kolo u kome će akustički elementi impedanse promeniti vrednosti parametara membrane. Jasno je da će eventualna reaktivnost akustičke impedanse uticati na vrednosti frekvencije rezonance membrane.

Drugi primer uticaja akustičkog okruženja na membranu prikazan je slučaj kada je ona sa jedne strane zatvorena kutijom. Ovaj slučaj je prikazan na slici 14.14. na frekvencijama na kojima je ovaj sistem dovoljno manji od talasne dužine kutiju karakteriše njena akustička kapacitivnost C_a . Membrana stvara jednak akustički protok s obe svoje strane. S njene prednje strane taj protok ide u akustičku impedansu kojom se modeluje zračenje. Sa zadnje strane membrane isti protok ide u akustički kapacitet kutije. Zbog te jednakosti protoka ukupna impedansa koju vidi membrana predstavlja rednu vezu akustičke kapacitivnosti kutije i impedanse s prednje strane koje se nalaze u sekundaru transformatora.

Prikazani slučaj membrane zatvorene s jedne strane kutijom odgovara u realnosti okolnostima kada se zvučnik na uobičajen način ugradi u kutiju. Ekvivalentna šema sa slike 14.14 pokazuje da je akustički kapacitet kutije redno vezan u kolu sa elastičnošću membrane. Ako ta kapacitivnosti nije dovoljno velika promeniće se rezultantna vrednost elastičnosti u kolu, a to znači da će se povisiti rezonantna frekvencija. Sličan problem postoji i u mikrofonima gde iza membrane uvek postoji neka mala komora čiji uticaj može biti nezanemarljiv.



Slika 14.14 - Membrana koja je sa jedne strane zatvorena kutijom i njena ekvivalentna električna šema

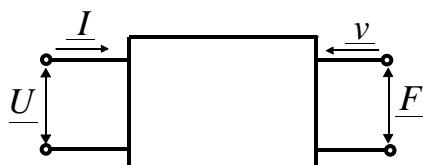
14.4 Električno-mehaničko pretvaranje kao četvoropol

Sklop u kome se vrši električno-mehaničko ili mehaničko-električno pretvaranje može se shvatiti kao jedan specifičan četvoropol. Varijanta takvog četvoropola za slučaj pretvaranja između električnog u mehanički domen prikazana je na slici 14.15. Uobičajeni sistem jednačina koji definiše rad četvrotcpola u ovom slučaju ima oblik:

$$\begin{aligned} \underline{V} &= \underline{Z}_{E(v=0)} \underline{I} + \underline{T}_{EM} \underline{v} \\ \underline{F} &= \underline{T}_{ME} \underline{I} + \underline{Z}_{M(I=0)} \underline{v} \end{aligned} \quad (14.22)$$

U prvoj jednačini Z_E je električna impedansa u električnom delu četvoropola. Slučaj kada je $v = 0$ označava da je mehanički sistem na izlazu nepokretan, to jest da je membrana zakočena. U drugoj jednačini Z_M je impedansa mehaničkog kola u izlazu četvoropola. Slučaj kada je $I = 0$ podrazumeva okolnost otvorenog električnog kola na ulazu. Parametri označeni sa T su koeficijenti pretvaranja. Slova u indeksu označavaju smer pretvaranja na koji se koeficijent odnosi. Kada je pretvarač reverzibilni, što znači da može vršiti pretvaranje u oba smera, onda je $T_{EM} = T_{ME}$.

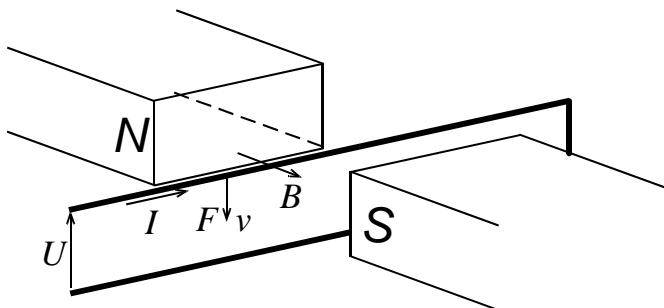
Tokom dugog razvoja elektroakustičkih pretvarača za proces električno-mehaničkog i mehaničko-električnog pretvaranja korišćeni su razni sistemi. Danas su ostale samo dve vrste pretvaranja: elektrodinamički i elektrostatički. Ostali principi pretvaranja nisu omogućavali postizanje kvaliteta koji se danas zahteva, pa su vremenom napušteni.



Slika 14.15 - Varijante elektromehaničkih četvoropola u kome se pobuda iz električnog domena pretvara u mehaničko kretanje.

Elektrodinamički pretvarač

Princip rada elektrodinamičkog pretvarača (često se kratko naziva „dinamički“) prikazan je šematski na slici 14.16. To je princip na kome rade svi električni motori i generatori. Pretvarač se sastoji od jednog provodnika dužine l koji se nalazi u magnetskom polju indukcije B .



Slika 14.16 – Šematski prikaz funkcijonisanja elektrodinamičkog pretvarača

Ako se na provodnik deluje nekom spoljašnjom silom tako da se on pokreće brzinom v normalno na linije polja, u njemu će se indukovati elektromotorna sila. Ona u kolu u koji bi se taj provodnik povezao može stvoriti struju. Ako kroz taj isti provodnik protiče struja koja nastaje delovanjem nekog spoljašnjeg generatora elektromotorne sile, pojaviće se sila F koja deluje na provodnik u pravcu normalno na pravac polja. Prema tome, sklop sa slike može vršiti pretvaranje električne pobude u kretanje provodnika ili pretvaranje mehaničke pobude u elektromotornu силу.

Veza između osnovnih veličina u elektrodinamičkom sistemu sa slike 14.16 definisana je opštim izrazom iz elektrotehnike koji povezuje silu, struju i magnetsko polje:

$$dF = i \, d\vec{l} \times \vec{B} \quad (14.23)$$

Konstrukcija pretvarača u kome se koristi elektrodinamički sistem uvek je takva da provodnih bude pod pravim uglom prema linijama magnetskog polja, pa je sila koja deluje na provodnik kroz koga protiče struju:

$$\underline{F} = \underline{B} \underline{l} \underline{I} \quad (14.24)$$

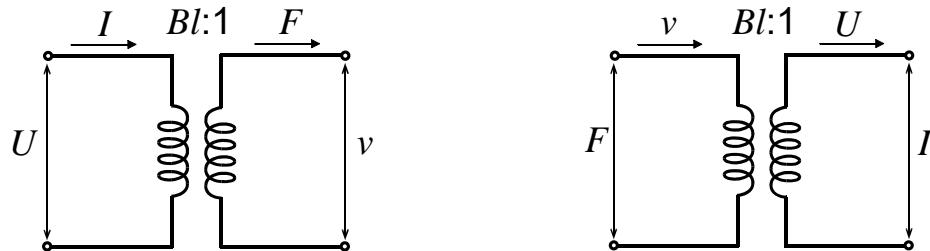
Ovaj izraz definiše rad izlaznog elektroakustičkog pretvarača, to jest zvučnika. Kod njega se linearno kretanje stvara proticanjem pobudne struje kroz provodnik za koji je na pogodan način povezana membrana. Faktor preslikavanja struje u mehaničku silu je Bl .

Ako je provodnik pokretan nekom spoljašnjom silom tako da se kreće brzinom v , u provodniku nastaje elektromotorna sila:

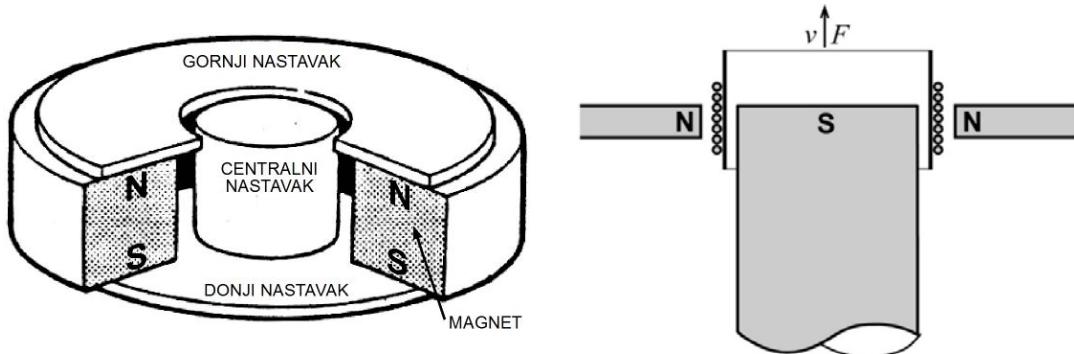
$$\underline{E} = \underline{B} \underline{l} \underline{v} \quad (14.26)$$

Ovaj izraz definiše rad mikrofona. Kretanje provodnika nastaje delovanjem zvučnog polja posredstvom membrane. Vidi se da je i u ovom slučaju faktor koji određuje vezu brzine u elektromotorne sile Bl . Prema tome, elektrodinamički pretvarač je reverzibilan, i pri tome su koeficijenti pretvaranja u jednačinama (14.22) $T_{EM} = T_{ME} = Bl$

Kao i u slučaju veze između membrane i akustičkog okruženja, i ovde se vidi da veze električnih i mehaničkih veličina u elektrodinamičkoj transformaciji mogu da se modeluju idealnim transformatorima. Izgledi transformatora za koje važe ove jednačine prikazani su na slici 14.17.



Slika 14.17 - Dve verzije idealnih transformatora kojim se modeluje elektrodinamičko pretvaranje: pretvaranje u zvučniku (levo) i u mikrofonu (desno)

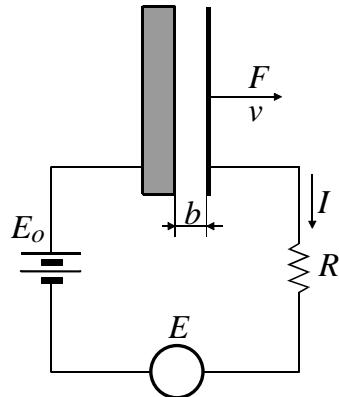


Slika 14.18 – Šematski prikaz konstrukcije elektrodinamičkog pretvarača: konstrukcija magneta sa polnim nastavcima (levo), struktura pretvarača u preseku gde se vidi položaj kalema u magnetskom procepu (desno).

Da bi se dobilo što efikasnije pretvaranje, u oba slučaja je potrebno da proizvod Bl bude što veći. Da bi se vrednost ovog proizvoda maksimizirala, u elektrodinamičkim pretvaračima se koristi specifična konfiguracija magneta i provodnika koja je šematski prikazana na slici 14.18. Osnovu konstrukcije pretvarača čini jedan stalni magnet torusnog oblika. Najšešće je to magnet od feritnog materijala, mada se u zvučnicima koriste i neodijumski magneti. Suština koncepta je da magnet ima kružni oblik. Njemu se pridodaju elementi od gvožđa, takozvani polni nastavci, koji usmeravaju tok magnetskog polja na kružno suženje koje se naziva procep. Polni nastavci imaju jednu ravnu ploču sa donje strane (donji nastavak), prstenastu ploču sa gornje strane (gornji nastavak) i jedan valjak u centru konstrukcije (centralni nastavak). U takvoj konfiguraciji magnetsko polje je koncentrisano u uskom procepu između valjkastog nastavka i unutrašnje ivice gornjeg prstenastog nastavka, čime se u tom prostoru postiže maksimalna indukcija B . U kružnom procepu se nalazi kalem na kome je namotana žica, kao što je prikazano na desnom delu slike 14.8. Valjak može slobodno da se kreće u procepu.

Elektrostatički pretvarač

Princip rada elektrostatičkog pretvarača principijelno prikazan je šematski na slici 14.19. Ovaj pretvarač često se naziva kondenzatorski. To je kondenzator kod koga je jedna obloga napravljena u vidu tanke folije i koja ima funkciju membrane. Ovakva membrana se pravi od metalne folije ili od neke sintetičke materije koja na sebi ima tanak sloj metalizacije da bi bila provodna. Druga obloga kondenzatora je napravljena kao masivna ploča. Takve dve obloge kondenzatora nalaze se na veoma malom rastojanju b , koje je u praksi reda veličine desetina mikrona. Izolator je vazduh.



Slika 14.19 – Šematski prikaz funkcijonisanja elektrostatičkog pretvarača

Kondenzator takvog pretvarača vezuje se u kolo u kome postoji generator jednosmerne elektromotorne sile E_o . Zbog prisustva generatora, na oblogama kondenzatora postojaće neka količina nanelektrisanja Q_o koja se naziva predpolarizacija. Zbog toga između obloga postoji stalna sila:

$$F_o = \frac{Q_o^2}{2C_o b} \quad (14.27)$$

gde je C_o kapacitet kondenzatora kad membrana miruje. Kao i kod elektrodinamičkog sistema, i ovde se za opisivanje rada pretvarača posmatra šta se dešava kada na membranu deluje spoljašnja sila i kada deluje spoljašnji napon. Za te slučajevе treba odrediti koeficijente pretvaranja T_{EM} i T_{ME} u jednačinama (14.22).

Ako na membranu pretvarača deluje neka spoljna prostorperiodična sila F , onda će se ona kretati nekom brzom v . Zbog oscilovanja membrane menjaće se rastojanje između obloga kondenzatora, pa će se u istom ritmu menjati i količina nanelektrisanja na oblogama. To rezultuje pojavom struje u kolu I . Veza između nje i sile je:

$$F = \frac{E_o}{j\omega b} I \quad (14.28)$$

Ovaj izraz definiše rad mikrofona, kod koga kretanje membrane, to jest obloge kondenzatora, nastaje delovanjem zvučnog pritiska. Vidi se da je u ovom slučaju faktor koji određuje vezu sile i struje u kolu je $E_o / j\omega b$.

Kada se u kolo poveže neki spoljašnji generatora elektromotorne sile E koji predstavlja signal, onda će se membrana kretati u ritmu tog signala kao posledica promena nanelektrisanja na kondenzatoru. Veza između priključene elektromotorne sile i brzine kojom će se kretati membrana je:

$$\underline{E} = \frac{E_0}{j\omega b} v \quad (14.29)$$

Ovaj izraz definiše rad izlaznog elektroakustičkog pretvarača, to jest elektrostatičkog zvučnika. Faktor preslikavanja naponske pobude u brzinu kretanja membrane v je i ovde $E_0 / j\omega b$.

Vidi se da u oba smera faktor pretvaranja zavisi od veličine jednosmernog napona i razmaka između membrane i masivne ploče. U mikrofonima koji rade na elektrostatičkom principu uobičajeno je napon pretpolarizacije 200 V, a rastojanja između obloga su reda veličine 50 μm .

15. MIKROFONI

Mikrofon je ulazni elektroakustički pretvarač koji je prilagođen radu u vazduhu kao mediju. Mikrofon pretvara zvučni pritisak, koji mu je ulazna veličina, u električni signal na njegovom izlazu, kao što je prikazano na slici 14.2. U akustičkom smislu pod pojmom mikrofona podrazumeva se konstrukcija koja vrši to pretvaranje, mada se u praksi ova osnovna konstrukcija pretvarača naziva još i „mikrofonska kapisla“. U nastavku ovog teksta pod pojmom mikrofona podrazumeva se upravo taj pretvarački sistem.

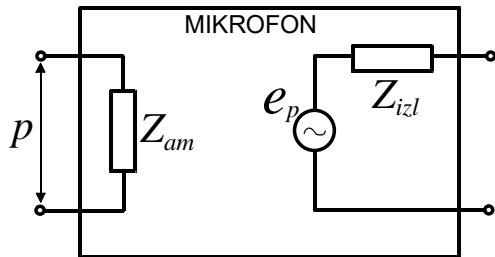
Danas pojam mikrofona u svakodnevnom životu označava jednu vrstu uređaja. On u sebi, kao najvažniji deo, sadrži mikrofonsku kapislu u kojoj se vrši pretvaranje, ali takođe ima i druge komponente od kojih je sastavljen i koji omogućavaju njegovo planirano korišćenje. To su zaštitna mrežica kapisle, kućište prilagođeno određenoj nameni (za držanje rukom, za montažu na stativ, fiksiranje na muzičkim instrumentima, itd), konektor za povezivanje sa kablom. Neke vrste mikrofona opciono mogu u sebi imati i druge delove kao što su transformator za prilagođenje impedanse, pojačavač, jednostavna filterska kola, itd.

Mikrofon se kao ideja pojavio još davne 1854. godine, pa tako spada u najstarije elektroakustičke konstrukcije. Od svog nastanka do danas mikrofon je doživljavao stalne promene i usavršavanja. U novije vreme razvoj mikrofona vodio je u dva pravca. Jedan pravac težio je ka vrhunskom kvalitetu pretvaranja, pa danas najkvalitetniji mikrofoni imaju izuzetne prenosne karakteristike. Kao ilustracija dometa može se navesti da danas postoje mikrofoni čije je donja granična frekvencija reda delova Herca, kao i mikrofoni sa gornjom graničnom frekvencijom reda 100 kHz, pa i više. Takođe postoje mikrofoni koji dovoljno linearno mogu registrirati nivo zvuka do 170 dB, kao i mikrofoni koji mogu registrirati zvuk ispod nivoa 0 dB. Drugi pravac razvoja mikrofona vodio je ka pravljenju izuzetno jeftinih modela, koji se proizvode u masovnoj automatizovanoj proizvodnji, a koji pri tome imaju dovoljno dobre elektroakustičke karakteristike. To su proizvodi koji su našli svoje mesto u telefoniji, multimedijima, i drugim sličnim oblastima.

15.1 Osnovne karakteristike mikrofona

Mikrofon kao sklop može se principijelno predstaviti strukturuom kao na slici 15.1. Delovanje fizičke pobude membrane, koja nastaje iz zvučnog polja, opterećeno je nekom akustičkom impedansom Z_{am} koja se tome suprotstavlja. Vrednost te impedanse dominantno određuje mehanička impedansa membrane preslikana u akustički domen, ali i sve drugo iz okruženja što može na neki način uticati na kretanje membrane. Na izlazu

mikrofona javlja se signal koji nastaje delovanjem generatora elektromotorne sile e_p . On nastaje kao posledica delovanja pobudnog pritiska p u procesu elektroakustičkog pretvaranja. U izlaznom kolu mikrofona postoji još i njegova izlazna impedansa Z_{izl} . Ona je najčešće čisto termogena, ali kod nekih konstrukcija mikrofona može imati i induktivnu komponentu, što će biti pokazano kasnije.



Slika 15.1 – Principijelna predstava strukture mikrofona

Funkcija mikrofona kao pretvarača sa slike 15.1 definiše se s tri karakteristična parametara. To su:

- faktor pretvaranja,
- dinamički opseg i
- usmerenost.

Ove osobine su detaljnije objašnjenje u nastavku.

Faktor pretvaranja – osetljivost mikrofona

Faktor pretvaranja $T_{E,p}$ osnovna je odlika mikrofona i koristi se kao parametar kojim se opisuje proces pretvaranja. On definiše vezu između ulazne i izlazne veličine sa slike 15.1, to jest između pobudnog pritiska i elektromotorne sile koja usled toga nastaje. Faktor pretvaranja uobičajeno se naziva osetljivost mikrofona i označava sa s (*sensitivity*). Po definiciji, to je:

$$T_{E,p} = s = \frac{E_p}{p} \quad (15.1)$$

gde je E efektivna vrednost elektromotorne sile, a p je efektivna vrednost pritiska koja deluje na membranu i stvara elektromotornu силу E . Kao i sve druge veličine u akustici, i osetljivost mikrofona ima svoj logaritamski ekvivalent koji se izražava u decibelima:

$$s[dB] = 20 \log \frac{E_p[V]}{p[Pa]} \quad (15.2)$$

Na primer, ako je osetljivost mikrofona 10 mV/Pa, to prema izrazu (15.2) odgovara nivou osetljivosti -40 dB.

Principi pretvaranja koji se koriste u mikrofonima takvi su da je njihova osetljivost u apsolutnom smislu relativno mala. Osetljivost realnih mikrofona izražena u dB uvek je manja od nule, što znači da je pri delovanju zvuka čiji je pritisak 1 Pa, što odgovara nivou zvuka 94 dB, izlazni napon značajno manji od 1 V. Tipične vrednosti osetljivosti mikrofona su od -30 do -60 dB, što dalje znači da su čak i pri jakim zvučnim pobudama izlazni naponi mikrofona reda milivolta. Pri nižim nivoima normalnih zvukova iz čovekovog okruženja izlazni naponi standardnih mikrofona imaju veličine reda mikrovolta.

Osetljivost mikrofona zavisi od tri bitna faktora. Prvi je veličina membrane, jer od površine membrane zavisi sila koja pri nekom zadatom pritisku deluje na nju. Ta sila je po definiciji:

$$F = pS \quad (15.3)$$

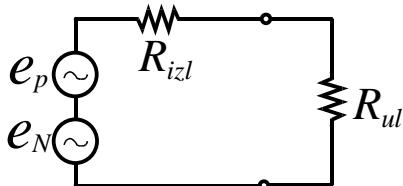
Isti zvučni pritisak na većim membranama stvaraće veću силу. Drugi faktor koji određuje osetljivost mikrofona su mehanički parametri membrane, odnosno njena osetljivost na mehaničku pobudu. Ulazna veličina membrane kao prenosnog sistema je sila, definisana izrazom (15.3), a odziv je brzina oscilovanja ili pomeraj. Pri zadatoj sili veličina odziva zavisi od mehaničke impedanse membrane. Najzad, osetljivost zavisi od mehanizma mehaničko-električnog pretvaranja u kome se kretanje membrane pretvara u električni signal. Do danas su se održala dva sistema pretvaranja, opisana u prethodnom poglavljiju. Njihov kvalitet zbog koga su se zadržali do danas ogleda se u tome da minimalno utiču na slobodu kretanja membrane, što omogućava visok kvalitet pretvaranja.

Dinamički opseg mikrofona

Dinamički opseg mikrofona definisan je odnosom najvišeg nivoa zvuka pri kome mikrofon na izlazu daje signal sa prihvatljivim izobličenjima, što predstavlja gornju granicu njegovog dinamičkog opsega, i najnižeg nivoa zvuka koji na izlazu može dati upotrebljiv signal, što je donja granica. Gornja granica dinamičkog opsega dominantno je određena ograničenjima linearnosti u mehaničkom odzivu membrane. Svaka membrana ima neku veličinu pomeraja pri kome počinju da se manifestuju mehanička ograničenja u mogućnostima kretanja. Kada se dostigne ta granica u izlaznom električnom signalu naglo rastu izobličenja. Zbog toga kod svakog mikrofona postoji neka veličina pomeraja, odnosno neka veličina zvučne pobude, pri kome zbog mehaničkog ograničenja izobličenja prelaze granice prihvatljivosti. Kod kvalitetnijih mikrofona ta granica izobličenja je nekoliko procenata.

Donja granica dinamičkog opsega mikrofona određena je njegovim sopstvenim termičkim šumom. Spoj mikrofona sa odgovarajućim pojačavačem stvara ekvivalentno kolo čija je šema prikazana na slici 15.2. U njemu se, osim generatora korisnog signala e_p , javlja i generator termičkog šuma elektromotorne sile e_N . Njena veličina je funkcija električnih parametara kola i funkcionalnih parametara mikrofona (videti tekst u okviru). Da bi bio primetan, koristan mikrofonski signal koji nastaje u procesu pretvaranja treba

da bude veći od njegovog termičkog šuma. Time je definisana donja granica dinamičkog opsega mikrofona.



Slika 15.2 - Ekvivalentno kolo veze mikrofona i njegovog pojačavača

U svakom električnom kolu, odnosno u svakoj otpornosti kroz koju protiče struja javlja se termički šum. Efektivna vrednost elektromotorne sile tako nastalog šuma E_N je:

$$E_N = \sqrt{4kT R \Delta f}$$

gde je k Boltzmanova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23} J/K$) T absolutna temperatura, R otpornost u kolu i Δf - frekvenčni opseg u kome se posmatra šum.

Uobičajeno je da se termički šum predstavlja svojim nivoom N koji se izražava u dBV (relativno u odnosu na 1 V). Za jediničnu vrednost otpornosti u kolu (1 Ohm) i jedinični frekvenčni opseg (1 Hz), "jedinični" nivo signala termičkog šuma je:

$$N_{11} = -198 \text{ dBV (re } 1 \text{ Ohm, } 1 \text{ Hz)}$$

U bilo kom drugom slučaju nivo termičkog šuma je:

$$N [\text{dBV}] = -198 + 10 \log(\Delta f) + 10 \log R$$

Drugi član ovog izraza pokazuje doprinos širine frekvenčnog opsega, a treći je doprinos otpornosti u kolu.

Pri standardnom frekvenčnom opsegu širine 20 kHz drugi član gornjeg izraza ima vrednost $10 \log(\Delta f) = 43$ dB. Ako je ukupna otpornost u kolu oko 1.000 Ohma, što je realna vrednost u mnogim slučajevima, treći član u izrazu je 30 dB pa je tada nivo termičkog šuma u kolu mikrofona oko -125 dBV. Svako širenje frekvenčnog opsega i povećanje ukupne otpornosti u kolu povećava vrednost nivoa sopstvenog šuma.

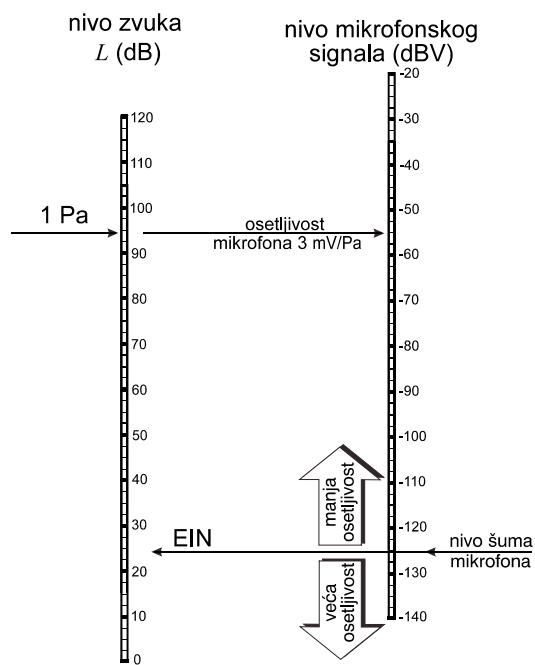
Specifičnost koja izdvaja mikrofon od ostalih uređaja u elektroakustičkim sistemima je nizak nivo izlaznog signala. Zbog toga je u mikrofonima relativno malo rastojanje između nivoa termičkog šuma i nivoa korisnog signala. U odnosu na elektronske uređaje kroz koje mikrofonski signal kasnije može prolaziti, dinamički opseg mikrofona je značajno manji. Kada mikrofon radi sa niskim nivoima zvučne pobude njegov sopstveni šum je osnovni ograničavajući faktor.

Na osnovu deficije prikazane tekstrom u okviru, u prvoj apsorkcijaciji može se dinamički opseg mikrofonskog signala definisati rasponom između nivoa njegovog sopstvenog termičkog šuma, koji se javlja na nivou od oko -125 dBV, i nivoa signala koga stvara zvučna pobuda. Na primer, ako je osjetljivost mikrofona 40 dB, signal na njegovom izlazu kada na njega deluje zvuk pritiska 1 Pa (94 dB) je na 85 dB iznad nivoa sopstvenog šuma. Međutim, ako na isti mikrofon deluje slabija pobuda, na primer 60 dB što je red veličine nivoa mnogih uobičajenih zvukova u čovekovom okruženju, koristan signal je na samo

55 dB iznad nivoa sopstvenog šuma. Ako se koristi mikrofon sa još manjom osetljivošću, koristan signal će u istim uslovima biti još bliži termičkom šumu.

Kada se u daljem procesu mikrofonski signal adekvatno pojača da bi se prosledio dalje, pojača se i njegov termički šum. U eventualnim pauzama zvučne pobude šum sa izlaza mikrofona postaje čujan. Prema tome, sopstveni termički šum, koji nastaje u kolu svakog mikrofona kada je povezan na pojačavač, određuje donju marginu njegove primene. Termički šum određuje najtiši zvuk koga mikrofon može registrovati, to jest njegov prag osetljivosti.

Sopstveni termički šum mikrofona manifestuje se u izlaznom signalu kao da na njegovu membranu stalno deluje nekakva ekvivalentna spoljašnja buka konstantnog nivoa i spektralnih svojstava belog šuma. Na slici 15.3 prikazan je odnos skale zvučne pobude mikrofona i skale njegovog izlaznog signala za slučaj osetljivosti 3 mV/Pa (pri pobudi 1 Pa nivo signala je -55 dBV). Nivo termičkog šuma mikrofona na skali izlaznog signala (-125 dBV) preslikan je unazad na skalu nivoa zvučne pobude. Tako dobijena vrednost nivoa zvuka definiše nivo te ekvivalentne spoljašnje buke koja odgovara nivou termičkog šuma. Dobijena vrednost na skali zvučne pobude naziva se "ekvivalentni ulazni šum" mikrofona. U literaturi se označava skraćenicom EIN (*ekvivalent input noise*) ili LE_{IN} .



Slika 15.3 – Ilustracija odnosa zvučne pobude mikrofona i signala na njegovom izlazu sa definicijom EIN.

Ekvivalentni ulazni šum mikrofona ne može se izbeći, može se samo minimizirati. Sa slike 15.3 vidi se da minimizacija EIN zahteva izradu mikrofona veće osetljivosti. Jeftiniji mikrofoni, kakvi se na primer koriste uz računare ili u MP3 snimačima, mogu imati ekvivalentni nivo šuma 30-40 dB. Kvalitetni mikrofoni mogu imati vrednost 20-30 dB, a

vrlo kvalitetni mikrofoni oko 10 dB i niže. Postoje posebne konstrukcije mikrofona kod kojih je vrednost EIN ispod 0 dB.

Usmerenost mikrofona

Osetljivost mikrofona je u opštem slučaju funkcija upadnog ugla zvučnog talasa. Konstrukcije mikrofona po pravilu imaju jednu prepoznatljivu fizičku osu koja se poklapa sa osom membrane, pa se upadni ugao zvučnih talasa određuje u odnosu na nju. Nominalna osetljivost mikrofona, definisana izrazima (15.1) i (15.2) određena je za slučaj kada zvučni talas nailazi u osi mikrofona. Osetljivost je uobičajeno maksimalna pri pobudi mikrofona iz pravca ose, a za druge upadne pravce u opštem slučaju ona može imati različite vrednosti. Pojava promene vrednosti osetljivosti mikrofona po pravcima naziva se usmerenost. Po definiciji, usmerenost je definisana izrazom:

$$\Gamma(\theta) = \frac{T_\theta}{T_o} \quad (15.4)$$

gde je T_θ usmerenost u pravcu određenom uglom θ u odnosu na osu, a T_o je osetljivost u pravcu ose mikrofona. Usmerenost se u prospektnoj dokumentaciji mikrofona uobičajeno prikazuje u logaritamskoj razmeri sa osom u decibelima.

15.2 Akustička podela mikrofona

Razlike u usmerenostima mikrofona nastaju kao posledica načina na koji zvučno polje deluje na membranu. U tom smislu moguća su tri slučaja:

- presioni mikrofon
- gradijentni mikrofon i
- kombinovani mikrofon

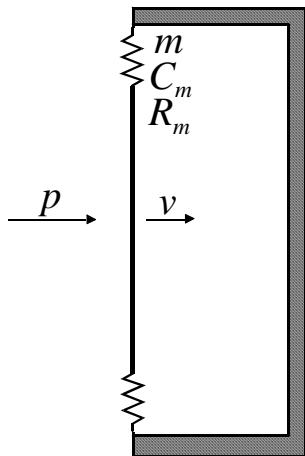
Ova podela vodi ka različitim oblicima dijagrama usmerenosti. Podela na ova tri tipa mikrofona s različitim usmerenostima naziva se akustička podela.

Presioni mikrofon

Presioni mikrofoni imaju konstrukciju koja sa zadnje strane potpuno zatvara membranu, kao što je principijelno prikazano na slici 15.4. Na slici je zbog jednostavnosti zanemaren sistem za mehaničko-električno pretvaranje jer ne utiče na način pobude membrane, to jest njenu interakciju sa zvučnim poljem. Zvučno polje deluje na membranu samo sa jedne njene strane, i to silom koja je definisana izrazom (15.3). Indikator odziva membrane na tu pobudu je brzina oscilovanja v . Kod presionog mikrofona brzina je funkcija pritiska i mehaničke impedanse membrane:

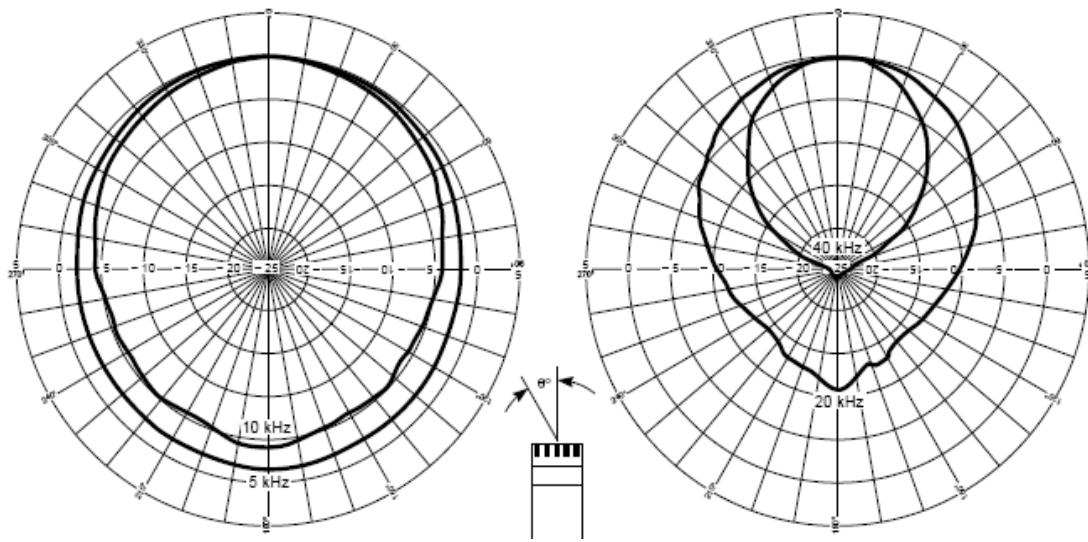
$$v = \frac{F}{Z_m} = \frac{pS}{\sqrt{R_m^2 + (\omega m - \frac{1}{\omega C_m})^2}} \quad (15.5)$$

Vidi se da je brzina membrane kao njen odziv na zvučnu pobudu srazmerna pritisku koji na nju deluje. Pritisak je skalarna veličina, pa njegova vrednost na površini membrane ne zavisi od pravca iz koga je naišao zvučni talas. Zbog toga i osetljivost ovakvog mikrofona ne zavisi od pravca nailaska zvuka. Zbog toga je njegov dijagram usmerenosti kružnica.



Slika 15.4 – Principijelni prikaz konstrukcije presionog (neusmerenog) mikrofona.

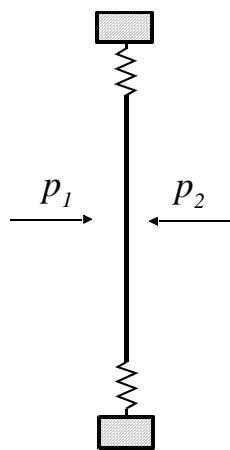
Neusmerenost presionog mikrofona postoji samo na frekvencijama na kojima su njegove fizičke dimenzije dovoljno manje od talasne dužine zvuka. Na višim frekvencijama, kada talasna dužina postaje poredljiva sa dimenzijama mikrofona, on postaje nezanemarljiva fizička prepreka koja u izvesnoj meri menja strukturu zvučnog polja. Tada dolazi do pojave refleksije i difrakcije, u smislu kako je to ranije objašnjeno na primeru masivne kugle sa slike 7.9. Zbog toga se na višim frekvencijama javlja pojava usmeravanja mikrofona usled difrakcije na njegovom telu. Za zvuk koji nailazi sa zadnje strane membrane se nalazi u zvučnoj senci zbog čega se smanjuje odziv mikrofona. Jedan praktičan primer pojave takvog usmeravanja prikazan je na slici 15.5 za slučaj mikrofona prečnika 12 mm. To je razlog zbog koga se mnogi mikrofoni, posebno merni, prave tako da budu vrlo malih dimenzija jer je to preduslov da svojim prisustvom ne remete strukturu zvučnog polja.



Slika 13.5 – Usmerenost presionog mikrofona prečnika 12 mm na višim frevencijama usled difrakcije.

Gradijentni mikrofon

Gradijentni mikrofon, nazvan još i dvosmerni, ima mehanički sklop koji omogućava potpuno jednak delovanje zvučnog polja s obe strane membrane. Ovakva konstrukcija principijelno je prikazana na slici 15.6. Kao i u slučaju presionog mikrofona, da bi se objasnio princip rada zanemaruje se sistem za mehaničko-električno pretvaranje jer ne utiče na način pobude membrane.



Slika 15.6 – Principijelni prikaz konstrukcije gradijentnog (dvokružnog) mikrofona

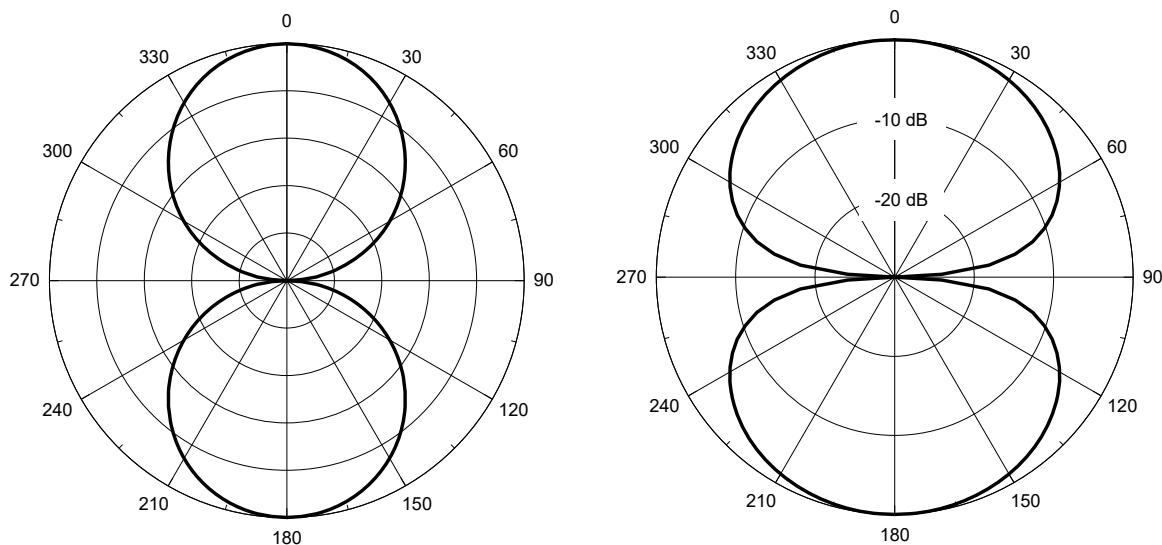
U okolnostima kada su obe strane membrane isložene zvučnom polju, u opštem slučaju na njenu prednju i zadnju stranu deluju različiti pritisici p_1 i p_2 . Kretanje membrane nastaje kao posledica njihove razlike $\Delta p = p_1 - p_2$ koja stvara rezultantnu силу. Zbog činjenice da se membrana kreće pod uticajem razlike pritisaka sa njene dve strane ova vrsta konstrukcije naziva se gradijentni mikrofon.

Kada se membrana sa slike 15.6 izloži dejstvu zvučnog talasa koji nailazi iz nekog pravca s jedne njene strane, pritisci p_1 i p_2 se razlikuju po fazi, jer do zadnje strane membrane talas prelazi nešto dužu put. Ako se pretpostavi da je zvučni izvor dovoljno daleko od mikrofona, onda je putna razlika koja nastaje usled obilaska oko membrane relativno mala u odnosu na ukupan pređeni put talasa. Zbog toga su amplitude ova dva pritiska jednake, i samo fazna razlika određuje rezultantnu silu koja pokreće membranu.

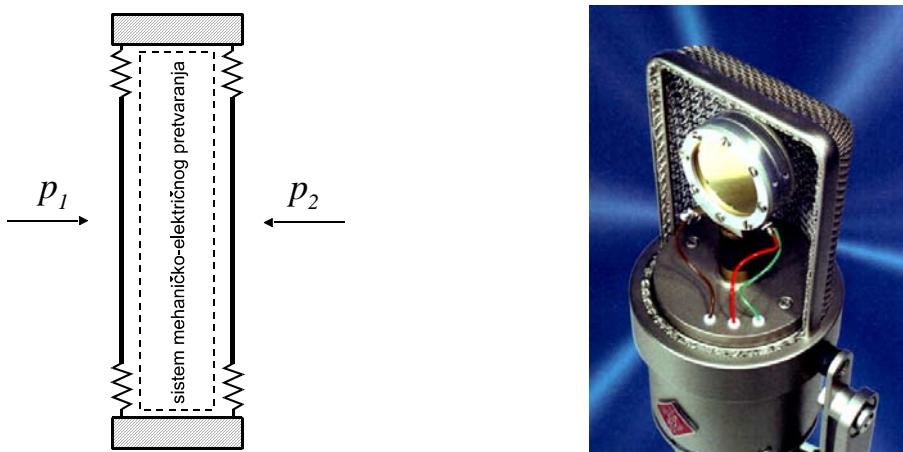
Maksimalna fazna razlika pritisaka p_1 i p_2 nastaje kada talas nailazi u osi membrane. Tada je putna razlika najveća, pa je najveća i fazna razlika. Kada talas nailazi pod uglom 90° u odnosu na osu membrane (to jest u ravni membrane) između dva pritiska sa dve strane membrane nema fazne razlike. Pri takvoj pobudi membrana gradijentnog mikrofona miruje. To znači da osetljivost ovakvog mikrofona ima maksimum u pravcu ose membrane i nulu pod uglom 90° u odnosu na tu osu. Usmerenost gradijentnog mikrofona ima oblik kao na slici 15.7. Prikazana je usmerenost u linearnoj i logaritamskoj razmeri. Zbog njenog karakterističnog oblika ova usmerenost se često naziva „dvokružna“, ili „osmica“. Analitički izraz ove usmerenosti je

$$\Gamma = \cos \theta \quad (15.6)$$

gde je θ ugao u odnosu na osu mikrofona. Sa slike 15.6 vidi se da će sile sa prednje i sa zadnje strane pokretati membranu u različitim smerovima. To znači da je dejstvo pritiska iz prednje i zadnje polovine karakteristike usmerenosti protifazno.



Slika 15.7 – Dijagram usmerenosti gradijentnog mikrofona u linearnoj (levo) i logaritamskoj razmeri (desno).



Slika 15.8 – Princip realizacije gradijentnog mikrofona s dve membrane i jedan primer realnog nmikrofona sa koga je skinuta zaštitna mrežica da bi se videla jedna strana mikrofonske kapsle. S druge strane mikrofonske kapsle nalazi se identična membrana.

U praktičnoj realizaciji gradijentnog mikrofona postoji konstruktivni problem, jer membrana sa obe njene strane mora da bude slobodna i potpuno izložena zvučnom polju. U nastojanju da se to realizuje, ometajući faktor je neophodni sistem mehaničko-električnog pretvaranja jer se on mora nalaziti u neposrednoj blizini membrane, s jedne njene strane. Samim tim, onemogućuje se podjednako delovanje zvučnog polja s obe strane. Rešenje ovog problema nađeno je u konstrukciji mikrofona s dve membrane, kao što je prikazano na slici 15.8. Svaka od ovih membrana ima ulogu jedne strane membrane sa slike 15.6. U električnom smislu to su dva nezavisna mikrofona. Sabiranjem njihovih signala, uz obrtanje faze signala sa zadnje strane, postiže se odziv gradijentnog mikrofona. Ovakva konstrukcija ima i dodatne prednosti, jer se u električnom delu mikrofona uključivanjem samo jedne membrane postiže neusmerena karakteristika. Tako se na jednom mikrofonu mogu preklopnikom birati karakteristike usmerenosti.

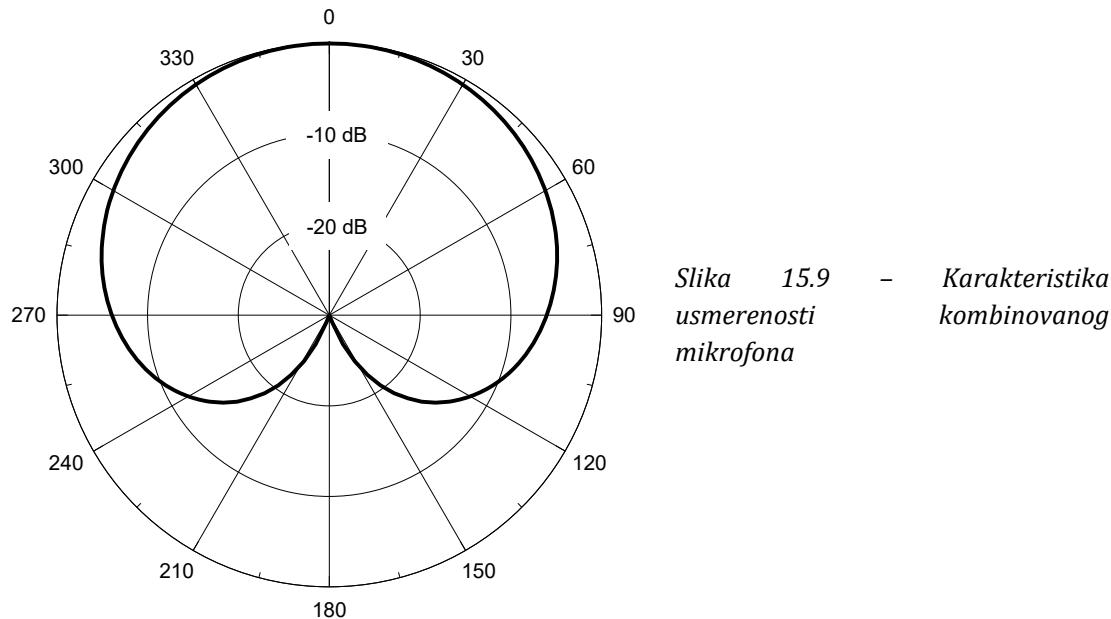
Kombinovani mikrofoni

Ako se jedan neusmereni i jedan gradijentni mikrofon postave na istom mestu u prostoru tako da im se ose poklapaju a njihovi signali se sabiraju, dobija se jedan novi ekvivalentni oblik usmerenosti koju takva mikrofonska kombinacija ispoljava. Ako se prepostavi da su osjetljivosti ova dva mikrofona u osi jednake, za zvuk koji nailazi iz pravca ose njihovi signali su jednak i po amplitudama i po fazama, pa se sabiranjem dobija dvostruka vrednost izlaznog signala takve mikrofonske kombinacije. Pri nalasku zvuka iz suprotnog smera, pod uglom 180° u odnosu na osu mikrofona, signali iz dva mikrofona su jednakih amplituda, ali su u protivfazi. Pri njihovom sabiranju dolazi do ponišavanja, pa je rezultantni signal za taj pravac pobude jednak nuli.

Kombinovanjem neusmerenog i gradijentnog mikrofona i sabiranjem signala dobija se jedan novi rezultantni mikrofon sa oblikom usmerenosti koji se razlikuje od njihovih pojedinačnih usmernosti. Dijagram usmerenosti kombinovanog mikrofona prikazana je na slici 15.9. To je kriva koja se u matematici naziva kardioidea, i definisana je izrazom:

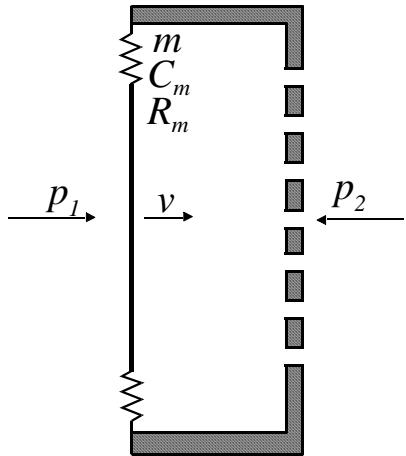
$$\Gamma = \frac{1 + \cos \theta}{2} \quad (15.7)$$

gde je θ ugao u odnosu na osu mikrofona. Zbog toga se za kombinovane mikrofone koristi naziv „kardioidni“. Zbog činjenice da im je sa zadnje strane osetljivosti jednaka nuli, za njih se koristi i naziv „jednosmerni mikrofon“.



Princip rada kombinovanog mikrofona može se, umesto sa dve mikrofonske kapsle, realizovati i u okviru samo jedne posebno pripremljene konstrukcije. Ona je principijelno prikazana na slici 15.10. Posebnim otvorima na kućištu omogućeno je delovanje zvučnog polja i sa zadnje strane membrane, ali sa izvesnom redukcijom u odnosu na njenu prednju stranu. To se postiže podešavanjem veličine otvora na kutiji koja okružuje membranu i stavljanjem akustičkih otpornosti na tom zadnjem putu zvuka.

Oblik usmerenosti koji ima nulu osetljivosti sa zadnje strane veoma je koristan u mnogim praktičnim okolnostima. Zbog toga je kardioidni mikrofon u širokoj upotrebi za potrebe muzičkih snimanja i za ozvučavanje. Kada se postavi ispred nekog zvučnog izvora čiji se zvuk registruje njegova usmerenost ga čini imunim na zvukove koji dolaze is suprotnog smera, što je u takvim okolnostima korisna osobina. Postoje varijante ovog tipa mikrofona sa modifikovanim oblikom kardioidne usmerenosti da bi se širina dijagrama u oblasti oko ose u izvesnoj meri suzila.



Slika 15.10 – Način realizacije kombinovanog mikrofona u okviru jedne mikrofonske kapsle

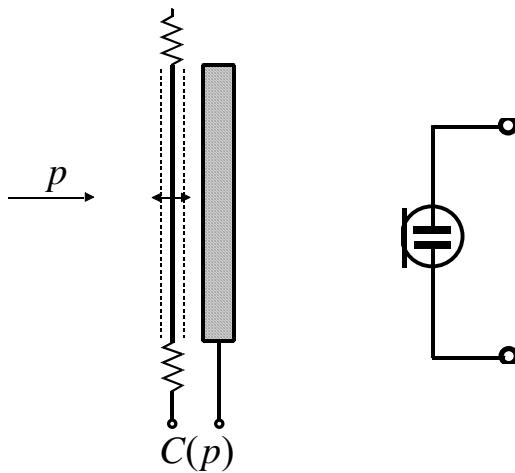
15.3 Električna podela mikrofona

Drugi stepen rada mikrofona kao elektroakustičkog pretvarača je pretvaranje kretanja membrane u električni signal, kao što je ranije prikazano na slici 14.4. Osnovni zadatak ovog stepena u mikrofonu je da se to pretvaranje realizuje sa što manje uticaja na slobodu kretanja membrane, a to znači sa što manje uticaja na vrednosti njenih ekvivalentnih mehaničkih parametara.

Tokom duge istorije razvoja mikrofona korišćeno je više različitih sistema za mehaničko-električno pretvaranje. Danas su u širokoj upotrebi ostala samo dva: elektrostatički i elektrodinamički. Njihovi principi rada omogućavaju da se unosi najmanje promena u funkciju membrane, pa se tako omogućava i najkvalitetnije pretvaranje zvučne pobude u električni signal. Osnovni principi na kojima se zasnivaju ova dva načina pretvaranja objašnjeni su u prethodnom poglavlju. Ovde će biti samo ukazano na osobine koje su specifične za mikrofonske konstrukcije.

Elektrostatički (kondenzatorski) mikrofoni

Princip rada elektrostatičkog mikrofona ilustrovan je na slici 15.11. Membrana od provodnog materijala postavlja se ispred jedne nepomične metalne ploče na veoma malom rastojanju. Zadnja ploča i membrana čine električni kondenzator čiji kapacitet zavisi od površine i međusobnog rastojanja. U praksi je njihovo rastojanje reda desetina mikrona. Mikrofonska konstrukcija se uvek pravi kružnog oblika, sa prečnicima koji mogu biti oko 2,5 cm (jedan inč) i manje. Najmanji prečnici mikrofona koji se danas standardno koriste imaju membrane čiji je prečnik samo par milimetara (na primer u slušnim aparatima ili neki specijalni merni mikrofoni). U takvim okolnostima kapaciteti ovih mikrofonskih kapsli relativno su mali, reda desetina pikofarada. Na slici 15.11 prikazan je i simbol kojim se kondenzatorski mikrofon predstavlja na električnim šemama.

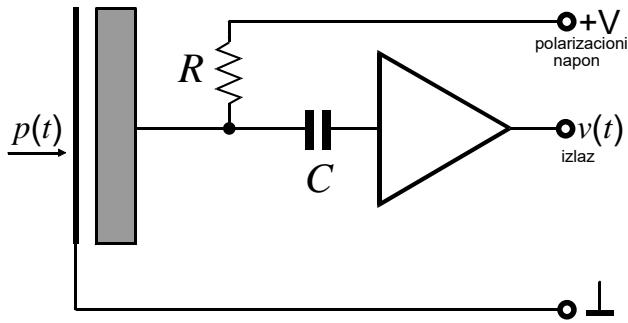


Slika 15.11 – Ilustracija principa rada elektrostatičkog mikrofona i njegov simbol na električnim šemama.

Kada pod uticajem pobude iz zvučnog polja membrana vibrira, rastojanje između obloga kondenzatora menja se u ritmu promene sile koju stvara zvučni pritisak na njenoj površini. Kao posledica kretanja membrane menja se i kapacitet kondenzatora. Na taj način zvučna pobuda, odnosno vremenski promenljivi zvučni pritisak, konvertuje se u vremenski promenljivi kapacitet.

Sledeći zadatak u procesu pretvaranja je da se promena kapaciteta koja nastaje delovanjem zvučnog polja pretvori u ekvivalentan naponski signal. Taj zadatak se može praktično realizovati na dva načina. Prvi način je principijelno objašnjen u prethodnom poglavlju. Kondenzator mikrofona polariše se nekim jednosmernim naponom, kao što je to ranije prikazano na slici 14.19. Usled promene vrednosti kapaciteta menja se i količina nanelektrisanja na oblogama kondenzatora. Te vremenske promene nanelektrisanja manifestuju se pojmom struje u kolu polarizacije. Na rednom otporniku tada se javlja vremenski promenljivi napon koji nastaje proticanjem te struje, i taj napon predstavlja signal koga daje mikrofon.

Principijelni izgled kola kondenzatorskog mikrofona sa predpolarizacijom prikazan je na slici 15.12. Vrednosti polarizacionih napona su standardizovane. Tokom razvoja kondenzatorskih mikrofona dugo je jedina vrednost polarizacionog napona bila 200 V. I pored relativno velike vrednosti napona, promena nanelektrisanja na kondenzatoru u ritmu promena rastojanja obloga vrlo je mala, pa je mala i struja koja teče kroz polarizaciono kolo i otpornik R . Da bi se dobio upotrebljiv naponski signal potrebno je da vrednost ove otpornosti bude jako velika. Njena vrednost je uobičajeno reda stotina megaoma, pa i više. Međutim, na tako velikoj otpornosti sve eventualne električne smetnje koje se indukuju dejstvom spoljašnjih polja stvaraće takođe relativno velike napone smetnji. Da bi se to minimiziralo, nužno je da se elementi mikrofonskog kola sa slike 15.12, otpornik R i prepojačavač, nalaze neposredno uz kapsulu i sa vrlo malim spojnim provodnicima. Svi elemeti kola sa slike nalaze se praktično u istom fizičkom kućištu mikrofona.



Slika 15.12 –Principijelni izgled kola u koje se vezuje kondenzatorski mikrofon

Drugi način pretvaranja promenljivog kapaciteta kondenzatorskog mikrofona u naponski signal je takozvani visokofrekvenički spoj. Kondenzator mikrofona vezuje se u kolo jednog oscilatora, pa se promene kapaciteta pod uticajem zvučnog polja pretvaraju u ekvivalentnu promenu generisane frekvencije. Dobijanje naponskog signala dalje je pitanje frekvencijske demodulacije, odnosno konverzije frekvencije u napon.

Bez obzira na primjenjenu vrstu pretvaranja kapaciteta u naponski signal, kondenzatorski mikrofon u svom kućištu, osim mikrofonske kapsle, uvek mora imati dodatni pojačavački sklop. Izlazni signal mikrofona je ustvari izlaz pretpojačavača, i izlazna otpornost je otpornost izlaza tog pretpojačavača. Uz napon polarizacije, i aktivni elementi pojačavača zahtevaju odgovarajuće električno napajanje, pa bez napajanja ova vrsta mikrofona ne može da funkcioniše. Na taj način kondenzatorski mikrofon u svojoj suštini predstavlja jedan aktivni elektronski uređaj.

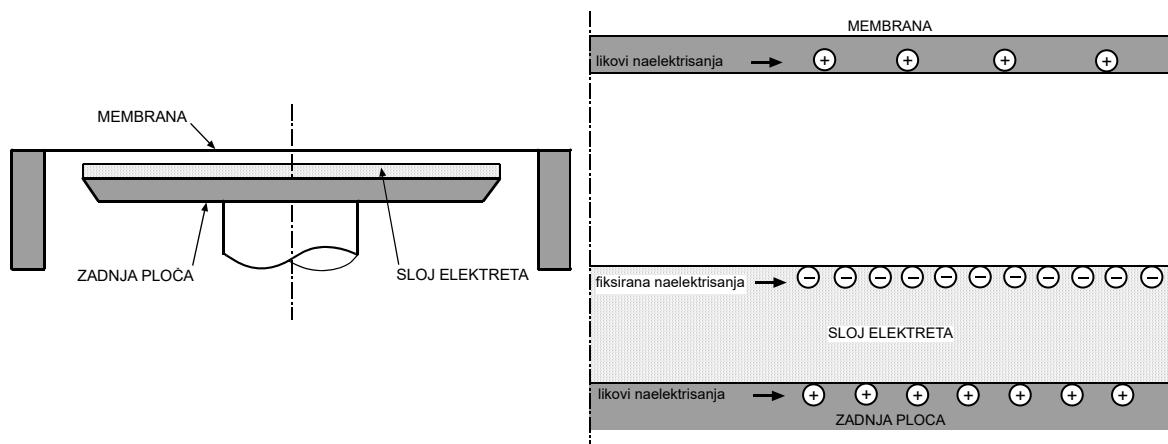
Činjenica da je za rad kondenzatorskih mikrofona neophodno napajanje predstavlja izvestan ograničavajući faktor u njihovoј primeni. Međutim, oni su danas najkvalitetniji ulazni elektroakustički pretvarači za zvučno polje u vazduhu. Ovo njihovo svojstvo posledica je činjenice da membrana nije opterećena nikakvim dodatnim fizičkim elementima, već u mehaničkom smislu nosi samo samu sebe. Zbog toga se ona može praviti kao veoma tanka folija od sintetičnog materijala. Da bi bila provodna na nju se nanosi tanak sloj metalizacije, obično pozlata. Tako lagana membrana omogućava najveću moguću osetljivost na pobudu iz zvučnog polja.

Zbog veoma visokog kvaliteta pretvaranja koji ispoljavaju kondenzatorski mikrofoni, tokom dugog razvoja tehnologije pronalaženi su razni način da se njihovo napajanje elegantno reši. Danas postoje standardizovani principi napajanja preko signalnog kabla kojim se povezuje, a napon napajanja dobija se iz uređaja na koji se mikrofon priključuje. kojom se rešava napajanje. Može se reći da svi kvalitetni mikrofoni danas rade na kondenzatorskom principu, pre svega svi merni mikrofoni i studijski mikrofoni za razna snimanja, popun onoga sa slike 15.8.

Elektret mikrofoni

Razvoj tehnologije omogućio je izradu materijala u kojima elektroni izdvojeni iz atoma, ali pri tome nepokretni, zarobljeni u strukturi materije. Takav stalno nanelektrisan

materijal naziva se elektret i izrađuje se u obliku folija. Kada se folija elektreta postavi na zadnju ploču kondenzatorskog mikrofona, kao što je to prikazano na slici 15.13, onda njen nanelektrisanje utiče na pojavu nanelektrisanja na obe obloge kondenzatora. Ovo je šematski prikazano na desnom delu slike. Na taj način se obloge kondenzatora električno polarišu i bez spoljašnjeg izvora polarizacionog napona. Ovakav kondenzatorski mikrofon se naziva pretpolarisani ili elektret mikrofon (po foliji od elektreta).

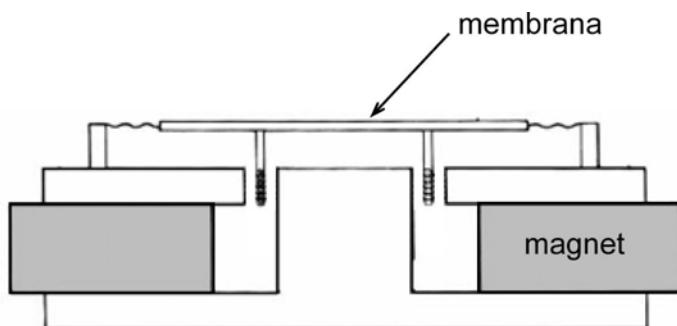


Slika 15.13 – Ilustracija principa rada elektret mikrofona.

Prednost elektret mikrofona je u činjenici da nije potreban izvor relativno visokog napona za predpolarizaciju. Naravno, ostaje potreba da se napaja prepojačavač, ali je taj napon nizak i lako se obezbeđuje čak i iz obične baterije. Na primer, napajanje mikrofona koji se standardno koriste uz računare je +5 V i obezbeđuje se iz samog računara preko jednog od kontakata priključnog konektora. Zahvaljujući pojednostavljenim zahtevima napajanja elektret mikrofoni se široko primenjuju u svim komercijalnim namenama (telefoni svih vrsta, diktafoni, multimedijalne aplikacije, itd.).

Elektrodinamički mikrofoni

Elektrodinamički mikrofoni, ili kratko dinamički kako se uobičajeno nazivaju u praksi, rade na principima elektrodinamičkog pretvaranja koje je objašnjeno u prethodnom poglavljju. Konstrukcija sistema za mehaničko-električno pretvaranje kod ovog mikrofona principijelno je ilustrovana na slici 14.18. Membrana je fiksirana za cilindar sa namotajem provodnika koji se nalazi u magnetskom polju, kao što je to šematski prikazano na slici 15.14. U formalnom smislu konstrukcija dinamičkog mikrofona jednaka je konstrukciji zvučnika, s tim što su kod mikrofona mehaničke osobine konstrukcije, a to znači veličina i robustnost, prilagođene zahtevima rada ulaznog pretvarača i ostvarivanju veće osetljivosti. Prečnici membrana kod ovih mikrofona relativno su mali, reda veličine do par centimetara.



Slika 15.14 - Principijelni izgled elektrodinamičkog mikrofona u preseku.

Kod elektrodinamičkih mikrofona linearizacija odziva membrane postignuta je postavljanjem njene rezonantne frekvencije u sredinu radnog opsega i kvarenjem Q faktora. U takvim okolnostima dva su faktora koja određuju performanse dinamičkog mikrofona. Prvo, činjenica je da membrana treba da, osim samu sebe, nosi i kalem sa namotajem provodnika. Ma kako on mali i lagan bio, to zahteva određeni nivo krutosti i robustnosti membrane, pa je ona značajno masivnija od membrane kondenzatorskog mikrofona. Drugo, ostvarivanje linearnosti kvarenjem Q faktora povlači za sobom smanje osteljivosti membrane na spoljašnju pobudu, jer mora imati dovoljno velike unutrašnje gubitke. Kao rezultat ovih osobina dinamički mikrofoni imaju manju osetljivost u odnosu na kondenzatorske i njihov frekvencijski odziv uobičajeno ima izvesna manja odstupanja od linearnosti (zatalasanost).

Ipak, ovakva konstrukcija mikrofona ima i neke značajne prednosti. Najznačajnija osobina mu je da predstavlja pasivni sistem koji ne traži spoljašnje napanje. Pod dejstvom pobjude iz zvučnog polja u namotajima kalema javlja se elektromotorna sila kao posledica kretanja provodnika u magnetskom polju. Izlazna impedansa mikrofona je mala, pa je za njihovo povezivanje moguće koristiti i duže kablove. Drugo, čitava konstrukcija mikrofona relativno je robusna i neosetljiva na spoljašnje uticaje, kao što su vlaga ili manji mehanički potresi. Činjenica da ne zahteva napajanje i mehanička robusnost predodredila je ovu vrstu mikrofona za mnoge namene u praksi: za ozvučavanje govora u predavaonicama i amfiteatrima, za živa muzička izvođenja na koncertima moderne muzike, itd.

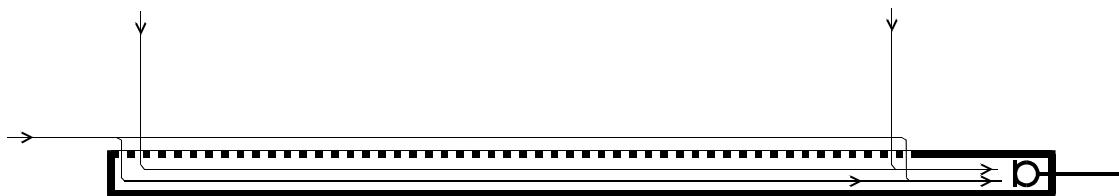
15.4 Mikrofoni velike usmerenosti

Usmerenosti koji se ostvaruju standardnim mikrofonskim konstrukcijama, prikazanim u poglavlju 15.3, u nekim okolnostima koje mogu nastupiti pri raznim snimanjima nisu dovoljni za adekvatno potiskivanje ambijentalne buke i reflektovanog zvuka. Najčešće se takve okolnosti javljaju pri snimanjima u bučnim ambijentima ili kada mikrofon ne sme da bude vidljiv (filmska snimanja). Zbog toga se često koriste specijalne konstrukcije mikrofona, bolje rečeno mikrofonski sistemi, koji ostvaruju usmerenost veću od standardnih usmerenih mikrofona.

Postoje tri fizička načina za realizaciju mikrofonskih sistema velike usmerenosti. To su:

- mikrofon sa talasovodom,
- mikrofon sa paraboličnim reflektorom i
- mikrofonski niz.

Mikrofon sa talasovodom je među mikrofonskim sistemima danas u najširoj upotrebi. Princip njegovog rada je ilustrovan šematski na slici 15.15. Njegovu osnovu čini jedna metalna cev (talasovod) zatvorena sa obe strane, pri čemu se pri jednom njenom kraju nalazi mikrofonska kapsula. Čitavom dužinom jedne svoje strane cev je perforirana, tako da zvuk može kroz otvore iz spoljašnje sredine da ulazi u unutrašnjost cevi. Kada se ovakva konstrukcija izloži zvučnom talasu kroz svaki od otvora u cev prodire zvučna energija. Na taj način se u unutrašnjosti cevi na membrani pretvarača superponiraju komponente zvuka koje u nju ulaze kroz prostorno razdvojene puteve. Na slici su simbolički prikazane komponente koje ulaze u cev kroz prve i poslednje otvore u nizu.



Slika 15.15 - Šematski prikaz mikrofona sa talasovodom

U zavisnosti od ugla nailaska talasa na cev, putanje komponenti energije koje do mikrofonske kapsule dospevaju kroz različite otvore mogu biti različite. Na slici su šematski prikazana dva slučaja: kada je pobuda zvučnim talasom u osi cevi i pod uglom 90° u odnosu na tu osu. Kada talas nailazi u osi cevi sve komponente koje prolaze kroz otvore i stižu do kapsule međusobno su u fazi jer prelaze isti put. Zbog toga se one sabiraju na membrani i odziv je maksimalan. Kada zvučni talas nailazi pod nekim uglom u odnosu na osu cevi među komponentama koje se sabiraju na membrani javljaju se manje ili veće fazne razlike. U označenom slučaju nailaska talasa pod uglom od 90° u odnosu na osu cevi putna razlika među komponentama koje dovevaju kroz otvore ima rezultantu na membrani koja je manja od slučaja kada zvuk nailazi u osi jer dolazi do izvesnog poništavanja. Jasno je da su najveće fazne razlike, a time i najveća poništavanja, kada zvuk nailazi pod uglom 180° u odnosu na osu sistema.

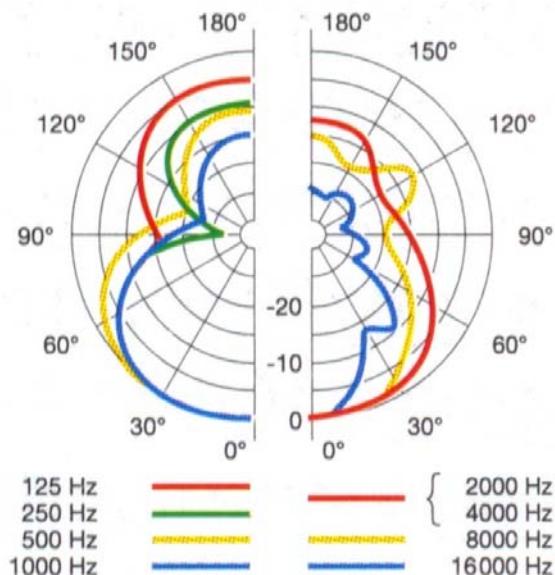
Jedna realizacija mikrofona sa talasovodom prikazna je na slici 15.16. Vidi se da su kod ovog modela otvori izvedeni u vidu zareza. Rezultat superponiranja na membrani, odnosno veličina poništavanja u okolnostima kad talas nailazi u pravcu izvan ose sistema, zavisi od ukupne dužine cevi. Usmerenost ovakvog mikrofona zavisi od odnosa dužine cevi l i talasne dužine λ (l/λ). Zbog toga kod takvih mikrofona usmerenost se povećava sa frekvencijom. Na slici 15.17 prikazana je usmerenost jednog mikrofona sa talasovodom čija je ukupna dužina oko 25 cm. Vidi se sužavanje krive usmerenosti sa porastom frekvencija. Prema tome, sistemi sa dužom cevi imaju veću usmerenost i obrnuto. Na

tržištu se mogu naći proizvodi čija je ukupna dužina nekoliko desetina santimetara, ali ima modela dužine 0,5 m, pa i veće.

Zbog svog izgleda ova vrsta mikrofonskih sistema naziva se "puška mikrofon" (*gun microphone*) ili samo "puška". Zbog svoje usmerenosti standardno se koriste za snimanje sa većih distanci (razgovor na ulici u uslovima visokog nivoa buke, pozorišne predstave kada se mikrofoni nalaze u prvom redu publike, snimanje dijaloga na filmu, itd.). Izborom mikrofona adekvatne dužine može se odabrati usmerenost koja odgovara okolnostima.



Slika 15.16 - Izgled jednog usmerenog mikrofona sa talasovodom, takozvani "puška" mikrofon (mikrofon je postavljen na stalak pomoću posebnog antivibracionog držača).

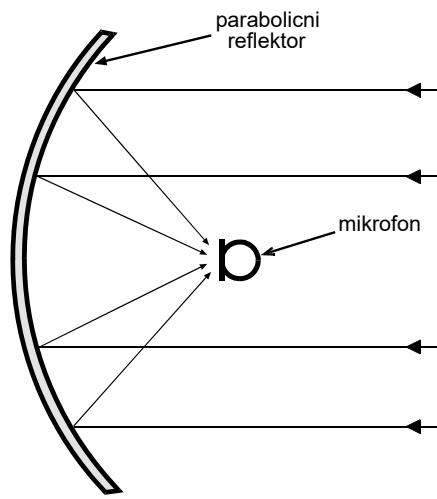


Slika 15.17 - Izgled usmerenosti jednog mikrofona sa talasovodom dužine 25 cm. Na svakoj polovini dijagrama prikazane su usmerenosti za četiri frekvencije, a podrazumeva se da su dijagrami usmerenosti osno simetrični

Princip rada mikrofonskog sistema sa paraboličnim reflektorom je identičan dobro poznatim antenskim sistemima sa reflektorem. Njegov šematski prikaz je prikazan na slici 15.18. Činjenica je da svaki reflektor ima tu funkciju samo na frekvencijama na kojima je talasna dužina dovoljno mala u odnosu na njegov prečnik. To znači da na najnižim čujnim frekvencijama, odnosno za velike talasne dužine, ovakav sistem ne može postići usmerenost, i za to bi bilo neophodno da ima velike dimenzije reflektora.

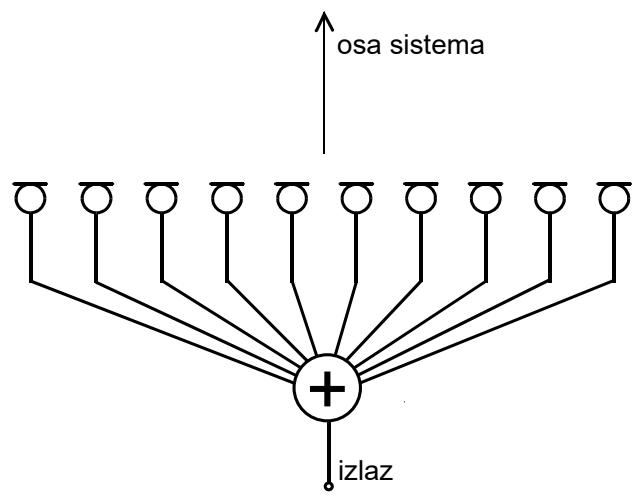
Mikrofon sa paraboličnim reflektorom kao sistem velike usmerenosti ranije je bio u široj upotrebi, a danas se retko može sresti u ponudi proizvođača. Oni imaju neke imanentne nedostatke zbog kojih se danas ređe koriste. Prvo, velika površina reflektora uzrokuje pojavu sile koju stvara vetar, pa se na vetrusnu stranu njima otežano manipuliše. Drugo, poželjno je da reflektor bude od dovoljno masivnog materijala da bi se zvuk od njega reflektovao, a ne prolazio kroz njega. Istovremeno masivnost reflektora je ograničena praktičnim razlozima ograničenja težine sistema. Najzad, zbog svojih dimenzija nije jednostavan za transport.

Mikrofonski nizovi imaju sistem rada sličan opisanim sistemima sa talasovodom, jer se usmerenost ostvaruje superponiranjem više komponenti koje su u fazi kada zvučni talas iz udaljenog izvora nailazi u osi sistema, a fazno se razlikuju kada talas nailazi iz pravca van ose. Šematski prikaz koncepta rada mikrofonskog niza prikazan je na slici 15.19. Razlika u odnosu na sistem sa talasovodom je u tome što se kod mikrofonskog niza više komponenti signala dobija postavljanjem većeg broja mikrofona poređanih u jednom nizu, a superponiranje se ostvaruje u električnom domenu sa mikrofonskim signalima na kolu za sabiranje. Izlaz mikrofonskog sistema je izlaz kola za sabiranje. Pri svakom odstupanju pravca nailaska zvučnog talasa od ose sistema rezultantni signal na izlazu je manji od signala u osi jer se zbog kašnjenja između mikrofonskih signala pojavljuju fazne razlike. Zbog toga je njegova maksimalna osetljivost definisana u ravni koja je normalna na mikrofonski niz.



Slika P15.18 -Šematski prikaz mikrofona sa paraboličnim reflektorem.

Mikrofonski niz svojom koncepcijom omogućava da mu se menja pravac maksimalne osetljivosti, to jest pravac ose sistema, a da se pri tome na njemu ništa fizički ne pomera. To je moguće uvođenjem posebnog selektivnog kašnjenja pojedinačnih mikrofonskih signala sa ciljem da se postigne poklapanje njihovih faza kada zvuk nailazi iz nekog željenog pravca. Na taj način se uvodi mogućnost da sistem radi sa promenljivom usmerenošću, pri čemu se ta promena realizuje kontrolom pojedinačnih kašnjenja mikrofonskih signala, što znači u električnom domenu. Na tržištu se ovakvi sistemi mogu naći kao proizvod, najčešće namenjen konferencijskim sistemima.



Slika 15.19 - Šematski prikaz rada mikrofonskog niza

16. ZVUČNICI

Zvučnici su najšire primenjivani oblik izlaznog elektroakustičkog pretvarača. Oni su postali sastavni deo svakodnevnog života čoveka jer se neki njihovi oblici neizostavno nalaze u multimedijalnim uređajima, telefonima, televizorima, automobilima, računarima, a najšire se koriste i kao nezavisne zvučničke kutije. Kao ilustracija rasprostranjenosti zvučnika dovoljan je podatak da se u svetu dnevno proizvede više od milion komada zvučnika za najrazličitije primene. Da bi se upotpunila slika o zvučnicima, na to se još može dodati i činjenica da danas primenjivani sistem stereo snimanja u kome su napravljeni svi raspoloživi muzički snimci zasniva na konceptu koji podrazumeva reprodukciju zvuka slušaocu pomoću zvučnika. Njihova eventualna reprodukcija pomoći će slušalicama, što je danas veoma rasprostranjeno, samo je nužno praktično rešenje, ali ono neminovno uvodi izvesno izobličenje nekih originalnih zvučnih informacija iz snimka.

Zvučnik je pasivna sprava, pa se njegov rad zasniva na električnoj snazi koju dobija iz nekog pojačavača snage, i koja se u njemu transformiše u akustičku snagu u okolnom vazduhu. Zbog toga zvučnik treba posmatrati kao pretvarač u kome se vrši koverzija snage, kao što je ranije prikazano na slici 14.3. Ulazna veličina zvučnika je električna snaga P . Ona zavisi kako od zvučnika, tako i od pojačavača s kojim je povezan, pa se u tom kontekstu oni moraju posmatrati kao jedinstven sistem. Vremenom je ustanovljena standardizacija osnovnih električnih parametara pojačavača i zvučnika da bi se olakšalo njihovo povezivanje. Izlazna veličina zvučnika je akustička snaga zračenja P_a koja se generiše u vazduhu.

Posmatrajući zvučnik kao konvertor snage može se uvesti njegov stepen iskorišćenja definisan ranije opštim izrazom (4.1). Karakteristično za zvučnike je da njihov stepen iskorišćenja ima vrlo malu vrednost, reda nekoliko procenata. U nastavku će biti obrazloženi razlozi za to i posledice koje ta činjenica ima na rad zvučnika.

Posmatrano sa akustičkog aspekta zvučnik ima funkciju električno kontrolisanog zvučnog izvora koji generiše zvučnu snagu u vazduhu oko sebe. U tom smislu se opšta predstava izlaznog pretvarača sa slike 14.3 može nacrtati kao četvoropol kome su ulazne veličine električne, a izlazne veličine akustičke. Takav četvoropol je prikazan na slici 16.1. U unutrašnjost tog četvoropola dešava se proces električno-akustičkog pretvaranja. Kao i kod svakog drugog zvučnog izvora akustička snaga koju razvija zvučnik javlja se na otpornosti zračenja kojom je on opterećen na izlazu. U domenu signala kao vremenski promenljiva ulazna veličina zvučnika može se posmatrati ulazna struja $i(t)$ a kao izlazna veličina akustički protok $q(t)$. Akustička snaga zvučnika na njegovom izlazu proizvod je

kvadrata akustičkog protoka q i akustičke otpornosti zračenja R_{az} koju on vidi kao generator, što je ranije prikazano izrazom (4.7). Ranije je takođe pokazano da je akustički protok koji stvara neki zvučni izvor proizvod brzine kretanja i površine izvora koja osciluje, i definisan je izrazom (4.8). U slučaju zvučnika to je proizvod brzine kretanja njegove membrane i njene površine.

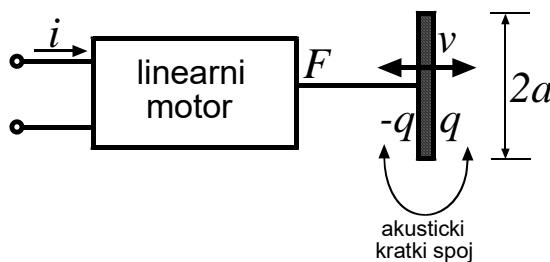


Slika 16.1 – Zvučnik kao četvoropol sa naznačenim načinom nastanka akustičke snage na njegovom izlazu

Otpornost zračenja na izlazu zvučnika kao četvoropola sa slike 16.1 je veličina koja zavisi od nekoliko faktora, što je ranije objašnjeno u poglavlju o zvučnim izvorima. I ovde važe isti principi, pa na otpornost zračenja utiče veličina prostornog ugla u koji zvučnik zrači, odnos talasne dužine i dimenzija zvučnika i neposredno okruženje (bliske fizičke prepreke). Prema tome, akustički efekat rada zvučnika ne zavisi samo od njegove konstrukcije, već u izvesnom smislu i od fizičkih okolnosti u okruženju čiji se uticaj preslikava u vrednost otpornosti zračenja.

16.1 Osnovni koncept elektrodinamičkog zvučnika

Zvučnik se u fizičkom smislu sastoji od jednog električnog linearног motora i klipne membrane, kao što je prikazano na slici 16.2. Njegova membrana ima zadatku da se ponaša kao idealan kruti klip ranije opisan u teoriji zvučnih izvora, a zadatku električnog motora je da stvara vremenski promenljivu silu $F(t)$ kojom pokreće taj klip. Vremenska promena sile treba da bude ekvivalentna zvučnim signalima koji se reprodukuju. Membrana se pod dejstvom sile kreće brzinom $v(t)$ i istom brzinom pomera molekule vazduha koji su u njenom neposrednom okruženju stvarajući tako vremenski promenljivi poremećaj koji se širi u prostor u vidu zvučnog talasa.



Slika 16.2 – Koncept rada zvučnika sa klipnom membranom koju pokreće neki linearni motor

Pojam krutog klipa znači da se sve tačke na njegovoj površini kreću jednakim putem po čitavoj površini na jednak način pomeraju molekule vazduha koji su s njim u kontaktu. Posledica toga je da se svi molekuli vazduha uz klip kreću u fazi. Ako klip ne bi bio krut u njemu bi

se pod dejstvom pobudne sile koja deluje u centru pojavilo savijanje duž prečnika. Ta pojava znači da se u materijalu klipa javljaju fleksioni talasi, a njihov oblik zavisi od pobudne frekvencije i brzine prostiranja zvuka u materijalu od koga je napravljen klip. Posledica takve pojave bila bi da kretanje molekula vazduha koji se nalaze uz različite delove površine klipa ne bi više bilo u fazi, već bi pojedini njegovi delovi stvarali lokalne akustičke protoke između kojih postoji fazna razlika. Globalni rezultat takve pojave bilo bi slabljenje izračene zvučne energije zbog delimičnog poništavanja na površini membrane. Pri tome, to poništavanje neumitno degradira frekvencijski odziv zvučnika kao izvora zvuka. Koncept praktične izrade membrana zvučnika usmeren je na postizanje potrebne krutosti.

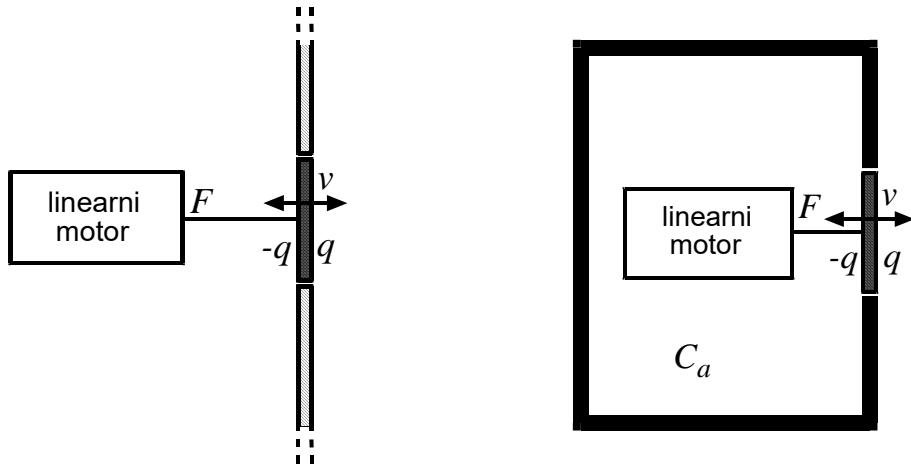
Danas se u zvučnicima praktično isključivo koriste linearni motori koji rade na elektrodinamičkom principu. Sve ostale vrste takvih motora koje se eventualno mogu sresti u nekim zvučnicima statistički gledano su zanemarljivo zastupljene i mogu se smatrati ekskluzivom. Tu na primer spada elektrostatički zvučnik. U njemu se koristi sila koja se javlja između dve nanelektrisane obloge kondenzatora. Kroz istoriju su se koristili i neki drugi principi za stvaranje pobudne sile, ali su oni vremenom iščezli jer je elektrodinamički princip superioran sa aspekta kvaliteta pretvaranja.

Osnovni koncept zvučnika sa slike 16.2 sa klipnom membranom i motorom postoji od samog njegovog pronalaska u drugoj polovini devetnaestog veka i kroz istoriju nije menjan do danas. Intenzivan razvoj zvučnika tokom proteklih decenija dešavao se samo u domenu detalja realizacije njegovih elemenata i materijala od kojih se izrađuju pojedini njegovi delovi. Svi pokušaji da se zvučna snaga na kontrolisan način proizvodi koristeći neke druge principe umesto krutog klipa nisu do danas dali rezultate prihvatljive za praktičnu primenu.

Odvajanje zračenja membrane sa prednje i zadnje strane

Karakteristično za koncept zvučnika sa slike 16.2 je da klipna membrana pri kretanju generiše akustički protok sa obe svoje strane. Ta dva protoka su jednaki i protivfazni kao što je označeno na slici, jer kada se s jedne strane membrane vazduh zgušnjava, s druge se razređuje, i obrnuto. Zbog konačnosti dimenzija membrane u okolnom prostoru neminovno dolazi do superponiranja zračenja koje nastaje sa njene dve strane. Zbog njihove protivfaznosti umanjuje se ukupni akustički efekat rada zvučnika, što se naziva akustički kratak spoj. Efekat je izražen dok god sama membrana ne postane dovoljno velika prepreka prostoriju zvuka, a to znači na dovoljno visokim frekvencijama.

Da bi se postiglo efikasno zračenje zvučnika neophodno je da se na neki način fizički razdvoje dve strane membrane, to jest dva protivfazna protoka. Teorijski je to moguće postići na dva načina: ugradnjom zvučnika u beskonačnu ploču i u kutiju. Oba principa razdvajanja su principijelno prikazana na slici 16.3.

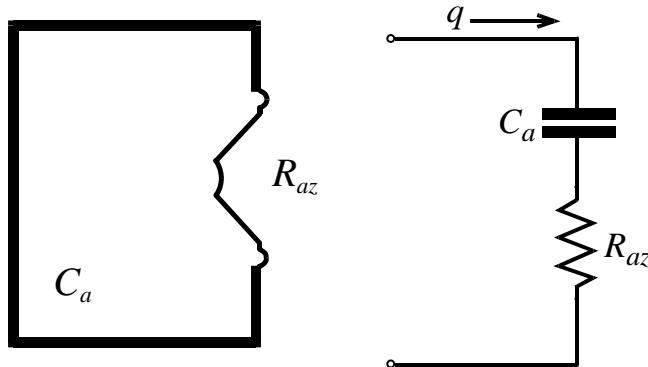


Slika 16.3 – Dva načina za odvajanje zračenje sa zadnje strane membrane zvučnika: ugradnja u beskonačnu ploču (levo) i u kutiju (desno)

Pojam „beskonačna“ ploča u koju se ugrađuje zvučnik znači da je ona dovoljno velika da zvuk koji nastaje sa zadnje strane membrane ne dospeva na prednju stranu, ili ako ipak nekako tu dospe obilazeći ploču oslabi u dovoljnoj meri da bude zanemarljiv. Takvo razdvajanje zračenja sa dve strane membrane ranije je uvedeno u opisu klipne membrane na slici 5.6. Postoje praktične okolnosti kada se primjenjuje upravo takav način ugradnje zvučnika. Jedan primer su sistemi za ozvučavanje u poslovnim zgradama, tržnim centrima i sličnim objektima gde se zvučnici ugrađuju u spušteni plafon. Tada zračenje sa zadnje strane membrane odlazi u prostor unutar plafona i ne dospeva u prostorije gde zrači samo njena prednja strana. Drugi primer takvog načina razdvajanja dve strane membrane zvučnika je takozvana „beskonačna“ merna ploča koja se koristi u laboratorijama za ispitivanje zvučnika. To je jedna masivna ploča dovoljno velikih dimenzija koja na sebi ima otvor u koji se prilikom ispitivanja ugrađuje zvučnik. Precizne dimenzije ove ploče definisane su jednim standardom sa idejom da ona bude dovoljno velika kako bi se uticaj energije koja se savije oko njene ivice i dospe na prednju stranu umanjio u dovoljnoj meri. Preporučene dimenzije stranica ploče za merenja u laboratorijama kreću se od oko 1,5 m do 3 m, što zavisi od veličine testiranih zvučnika i frekvencijskog opsega u kome ploča treba da razdvaja dve strane. Što je niža donja granična frekvencija zvučnika, to je potrebna merna ploča većih dimenzija. U svakom slučaju, merenje zvučnika ugrađenog u mernu ploču u anehočnim uslovima daje njegovu „neto“ karakteristiku, bez bilo kakvih uticaja koji su neminovni u realnosti.

U većini primena zvučnika postoji potreba da oni budu prenosivi i da se mogu po potrebi stavljati na razna pogodna mesta i premeštati. Zbog toga se ugradnja zvučnika u beskonačnu ploču koristi samo u posebnim okolnostima, a najširu primenu ima ugradnja zvučnika u kutiju kao na slici 16.3. Zadatak kutije je da zračenje membrane sa njene zadnje strane lokalizuje i stvorenu zvučnu energiju na neki način „potroši“. Zbog toga se

unutrašnjost kutije po pravilu ispunjava nekim poroznim materijalom koga karakteriše akustička otpornost da bi se zvučna energija u njemu trenjem pretvorila u toplotu.



Slika 16.4 – Akustička impedansa kojom je opterećena membrana zvučnika kada je ugrađen u kutiju.

Na niskim frekvencijama na kojima je talasna dužina zvuka dovoljno veća od unutrašnjih dimenzija kutije takav sistem se može opisati ekvivalentnom električnom šemom na principima opisanim u poglavlju 8. Kutija se ponaša kao akustička kapacitivnost C_a i njena vrednost je definisana izrazom (8.6). Akustički protok nastao sa zadnje strane membrane, koji je jednak onom na prednjoj strani, ide kroz takvu kapacitivnost. To je činjenica koja ima važan efekat na rad zvučnika u celini, jer impedansa koju vidi membrana postaje složenija, kao što je prikazano na slici 16.4. U opterećenju membrane pojavljuje se redna kapacitivnost koja unosi frekvencijsku zavisnost tako što neumitno utiče na zračenje membrane na najnižim frekvencijama. Pošto je prema izrazu (8.6) akustička kapacitivnost C_a direktno srazmerna zapremini kutije, jasno je da se postoje neki uslovi za veličinu kutije u koju se zvučnik ugrađuje.

Zidovi kutije u koju se ugrađuje zvučnik treba da budu dovoljno masivni da bi se minimizirala energija koja iz unutrašnjosti kroz njih dospeva u spoljašnju sredinu. Uzimajući sve u obzir, zvučnik ugrađen u kutiju postaje sistem složeniji od samog zvučnika, jer se u njegovom radu pojavljuje akustički uticaj kutije i njenih delova. Zbog toga se za takav način ugradnje koristi naziv „zvučnički sistem“, a kutija sa zvučnikom kao celina naziva se „zvučnička kutija“. Postoje matematički modeli kojim se utvrđuje potrebna zapremina kutije, a brojna su uputstva za izbor materijala i njene konstruktivne detalje.

Snaga zračenja membrane zvučnika

Snaga zračenja zvučnika funkcija je protoka koji stvara njegova membrana i otpornosti zračenja. U oblasti frekvencija gde se membrana ponaša kao tačkasti izvor otpornost zračenja je:

$$R_{az} = \frac{\rho c k^2}{\Omega_z} \quad (16.1)$$

gde je Ω_z prostorni ugao zračenja. Akustički protok koga stvara zvučni izvor proizvod je površine izvora S i njegove brzine v , što je ranije definisano izrazom (4.8). Na osnovu toga je snaga zračenja membrane zvučnika:

$$P_a = v^2 S^2 \frac{\rho c k^2}{\Omega_z} \quad (16.2)$$

U slučaju zvučnika u beskonačnoj ploči prostorni ugao zračenja je 2π , pa je snaga zračenja u tom slučaju:

$$P_a = \frac{1}{2} v^2 a^4 \pi \rho c k^2 \quad (16.3)$$

gde je a poluprečnik membrane. Ovaj izraz pokazuje od čega sve zavisi snaga zračenja membrane zvučnika u oblasti gde se ona ponaša kao tačkasti izvor, što znači na nižim frekvencijama. Taj izraz se može napisati i u obliku:

$$P_a \approx \xi^2 f^4 d^2 \quad (16.4)$$

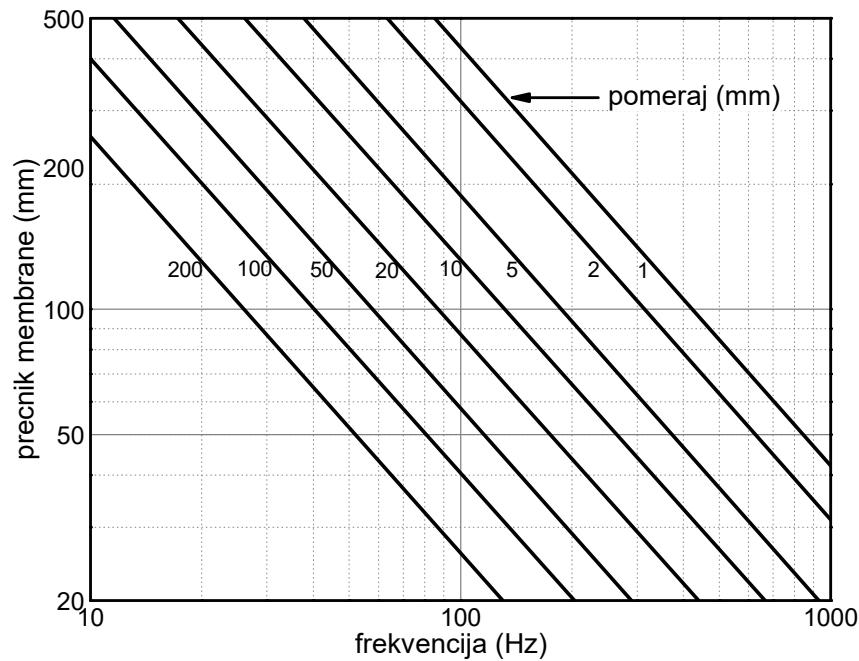
gde je ξ pomeraj membrane, a d prečnik membrane ($d = 2a$). Odavde se jasno vidi da je snaga zračenja membrane, to jest zvučnika, direktno srazmerna njenoj veličini, pomerajući frekvenciji. Na osnovu toga je nacrtan dijagram prikazan na slici 16.5 koji pokazuje potrebne veličine pomeraja i prečnika membrane u funkciji frekvencije da bi se u vazduhu generisala zvučna snaga $P_a = 1$ W. U oceni vrednosti sa dijagraoma treba imati u vidu da je snaga 1 W u akustičkom domenu veoma velika i podrazumeva vrlo visoke niove zvuka u okruženju.

Na osnovu relacije (16.4) i dijagrama sa slike 16.5 mogu se izvesti važni zaključci o osnovnim osobinama zvučnika u kontekstu njegove funkcije zvučnog izvora:

1. Na višim frekvencijama za istu izračenu snagu potrebni su manji pomeraji i manje dimenzije membrane nego na niskim. Zbog toga zvučnici koji emituju samo više frekvencije (u narodu poznati kao „visokotonci“) imaju male membrane i ostvaruju male pomeraje. Pomeraji njihove membrane uglavnom se ne mogu konstatovati gledanjem, a najčešće se ne mogu osjetiti čak ni kada se ona dodirne. To znači da njeni pomeraji mogu biti ispod praga osetljivosti čula dodira, a da ipak proizvode čujan zvuk.
2. Za zračenje niskih frekvencija zvučnici moraju imati velike membrane i mogućnost da ostvare veće pomeraje. S obzirom na ograničenja u maksimalnim pomerajima koja uvodi konstrukcija elektrodinamičkih linearnih motora zračenje zvuka na niskim

frekvencijama neumitno zahteva veće prečnike membrana zvučnika. Zbog toga najveće membrane imaju zvučnici za vrlo niske frekvencije, takozvani sabvuferi.

3. Pravljenje zvučnika manjih dimenzija koji bi očuvali sposobnost reprodukovanja niskih frekvencija zahteva razvoj linearnih motora koji bi imali sposobnost stvaranja većih pomeraja. Međutim, to je skopčano sa rešavanjem niza konstruktivnih detalja u izradi, a u tome postoje i stanovita realna ograničenja. Savremeni razvoj zvučnika je doneo značajan pomak u mogućnostima tih motora, ali i dalje u tom domenu ostaju neka suštinska ograničenja.



Slika 16.5 – Dijagram koji pokazuje odnos između frekvencije, pomeraja i prečnika membrane za zračenje zvučne snage $P_a = 1W$.

Usmerenost zračenja membrane

Na dovoljno niskim frekvencijama na kojima je membrana manja od talasne dužine zvuka u vazduhu ona se ponaša kao jednostavan tačasti izvor sa svim njegovim poznatim karakteristikama opisanim ranije. Sa porastom frekvencije u zračenju klipne membrane se događa ono što je ranije opisano za zvučne izvore konačnih dimenzija. Van ose membrane u prostoru se pojavljuju fazne razlike između akustičkih protoka izraženih sa pojedinih delova površine. Te razlike su posledica putnih razlika od pojedinih delova njene površine do tačke posmatranja. Zbog toga je u pravcu ose klipa zračenje uvek maksimalno, dok u pravcima koji odstupaju od ose dolazi do slabljenja njegovog zračenja. Globalna posledica takve pojave je usmerenost zračenja. Rani je je u teoriji zvučnih izvora prikazan analitički izraz (5.10) za faktor smera klipne membrane koji definiše njenu

usmerenost. Na slici 5.7 prikazan je dijagram usmerenosti klipne membrane u funkciji odnosa talasne dužine zvuka λ i prečnika membrane $2a$. Vidi se da sa porastom frekvencije zračenje postaje sve usmerenije. Dok je prečnik membrane veći od četvrtine talasne dužine zračenje membrane je praktično neusmereno, a iznad toga počinje njegovo lagano usmeravanje. Vidi se da na visokim frekvencijama zračenje membrane postaje veoma izraženo. U tome je karakteristična pojava nula zračenja i bočnih petlji u karakteristici.

Prikazana usmerenost klipne membrane objašnjava da je za eventualno neusmereno zračenje zvučnika u širokom opsegu frekvencija potrebno da membrana bude što manjih dimenzija. Zavisnost znage zračenja od dimenzije membrane, prikazana u izrazu (16.4), pokazuje da je to relativno jednostavno u slučaju da se od zvučnika zahtevaju manje snage zračenja. Međutim, za generisanje većih zvučnih snaga uslov neusmerenosti zahteva da se istovremeno u odgovarajućoj srazmeri povećaju pomeraji membrane. Na žalost, to nije tako jednostavno jer je veličina pomeraja određena ograničenjima konstrukcije linearнog motora. Zbog toga je usmerenost zračenja zvučnika na višim frekvencijama neumitna pojava.

Konstrukcija zvučnika

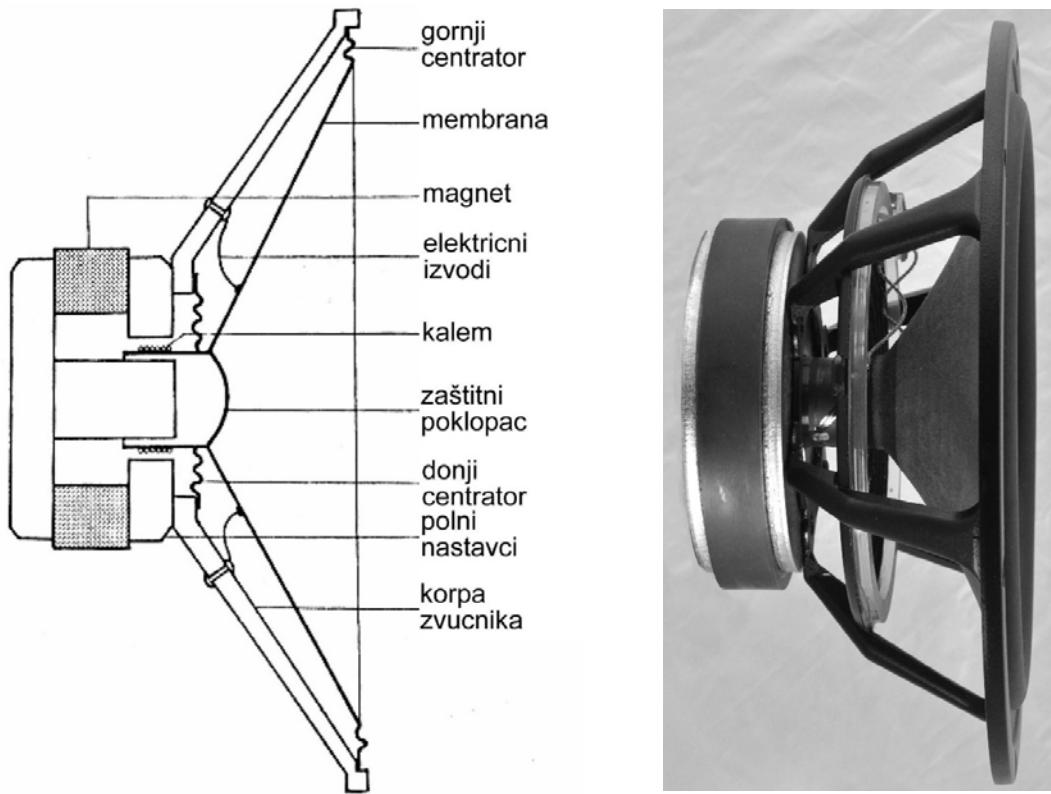
Zvučnici koji se danas najšire koriste imaju linearni motor koji radi na elektrodinamičkom principu. Zbog toga se za njih koristi naziv elektrodinamički zvučnici. Princip rada elektrodinamičkog pretvarača prikazan je ranije u poglavlju o opštoj teoriji elektroakustičkih pretvarača. U zvučnicima se takva konstrukcija prilagođava potrebni za primanjem većih električnih snaga i stvaranjem što većih sila za pomeranje membrane. Kao posledicu toga osnovni delovi motora prikazani na slici 14.18, a to su kalem sa namotanom žicom, magnet i polni nastavci, u nekim modelima mogu biti relativno velikih dimenzija i vrlo obusne mehaničke realizacije.

U konstrukciji savremenih zvučnika linerni motor i membrana su povezani u jedinstven mehanički sistem. Na slici 16.6 prikazani su naporedo šematski predstavljen struktura prosečnog zvučnika sa označenim glavnim delovima i fotografija jednog realnog zvučnika kako bi se moglo praviti poređenje. Njegova konstrukcija se može globalno podeliti na dva dela: fiksni i pokretni deo (takođeni kretni sistem). Fiksni deo zvučnika je sastavljen od magneta sa polnim nastavcima i korpe koja drži njegov pokretni deo. Primer zvučnika prikazan na desnom delu slike 16.6 ima korpu koja je sastavljena od masivnih metalnih stubova i prstena za koji je povezano vešanje membrane.

Pokretni deo zvučnika, to jest kretni sistem, sastoji se od membrane i kalema na kome su namotaji žice. Taj pokretni deo pričvršćen je za korpu zvučnika pomoću sistema vešanja koga čine dva elastična elementa označena na slici kao gornji i donji centror. Za centror se često koristi naziv „vešanje membrane“. Oni imaju zadatku da drže pokretni deo u ravnotežnom položaju i svojom elastičnošću ga vraćaju u taj položaj nakon svakog pomeranja. Istovremeno njihov zadatku je da obezbede precizan položaj kalema u sredini procepa. Prostor u kome se kreće kalem, predstavljen na slici 14.18, zahteva njegovo vrlo

precizno pozicioniranje. U slučaju da kalem sa žicom „struže“ o ivice procepa dolazi do oštećenja žice, a u reprodukovanim zvukom javlja se izobličenje. Na fotografiji zvučnika je prikazan model kod koga se u centralnoj zoni jasno vidi cilindar na kome je namotana žica, i koji ulazi u procep. Kalem je preko dva elastična provodnika povezan za priključne kleme postavljene sa spoljne strane korpe. One služe za povezivanje zvučnika sa izlazom pojačavača snage.

Zvučnik prikazan na slici 16.6 je namenjen za rad u širem frekvencijskom opsegu počevši od relativno niskih frekvencija. Zvučnici namenjeni emitovanju samo viših frekvencija imaju malo drugačiji izgled, mada se i u njima nalaze svi prikazani glavni delovi. Pošto su njihove membrane manjih prečnika, obično par santimetara, i prave vrlo male pomeraje, svi prateći mehanički delovi su prilagođen tome.



Slika 16.6 – Prikaz konstrukcije elektrodinamičkog zvučnika: šematski prikaz preseka zvučnika (levo) i bočni izgled jednog realnog zvučnika (desno)

Membrana zvučnika

Idealni klip sa slike 16.3 u zvučnicima se realizuje kao posebno formirana membrana. U njenoj izradi je bitno da se obezbedi krutost na svim frekvencijama od značaja za rad zvučnika. Istovremeno, membrana treba da bude dovoljno lagana kako bi se umanjila

masa koju pomera motor. Tražena krutost sa relativno laganim materijalom obebeđuje se izborom adekvatnog oblika. To su najčešće konus i kalota. Ideja konusnog oblika za postizanje krutosti lako se objašnjava jednostavnim papirnim fišekom poznatim iz svakodnevnog života. Naime, list papira je mekani materijal koji se vrlo lako savija kako god da na njega deluje neka sila. Međutim, kada se isti papir savije u fišek dobija se relativno kruta forma koja može da izdrži izvesnu mehaničku silu u pravcu ose konusa. Ta osobina je još na samom početku učinila da membrana zvučnika pravljena od tankog kartona ima, po pravilu, konusni oblik. Drugi geometrijski oblik kojim se od relativno mekanog materijala dobija kruta forma je kalota. Za nju je neophodno da se koriste materijali koji se mogu presovati, kao na prime plastika. Vrlo često se ova dva oblika kombinuju, pa je membrana globalno konusnog oblika, sa kalotnom formom u njenom centralnom delu.

Na slici 16.7 prikazane su primeri membrana zvučnika gde se vide kalotne i konusne forme. Generalno se može reći da su membrane većih prečnika uvek konusnog oblika, a manje membrane su kalotnog oblika, mada i tu postoje izuzeci. Često se kod zvučnika u sredini konusne membrane nalazi kalotno ukrućenje, kao na primeru sa levog dela slike 16.7. U oba slučaja sa slike konusna membrana je napravljena od neke vrste kartona, dok je kalotni oblik u centru membrane sa levog dela slike izrađen od plastike.



Slika 16.7 – Fotografije dve zvučničke membrane gde se vide konusne i kalotne forme

Linearizacija snage zračenja membrane

Izraz (16.2) pokazuje da je snaga zračenja zvučnika srazmerna brzini i otpornosti zračenja:

$$P_a \approx v^2 R_{az} \quad (16.5)$$

Obe ove veličine koje određuju snagu zračenja frekvencijski su zavisne, svaka na svoj način. Zbog toga je željena linearnost rada zvučnika po frekvencijama pitanje

komplementarnosti frekvencijskih promena brzine i otpornosti zračenja u rezultantu definisanu izrazom (16.5).

Na slici 16.8 principijelno su prikazani dijagrami promene brzine membrane, otpornosti zračenja R_{az} i snage zračenja P_a sa frekvencijom. Prema izrazu (4.17) u oblasti frekvencija u kojoj se membrana ponaša kao tačkasti izvor, a to znači u oblasti u kojoj je dovoljno manja od talasne dužine, otpornost zračenja raste sa kvadratom frekvencije. To znači da je nagib porasta otpornosti njenog zračenja 12 dB/oktavi. Kada prečnik membrane postane poredljiva sa talasnom dužinom otpornost zračenja postaje konstantna sa vrednošću ρc koju ima ravanski talas.

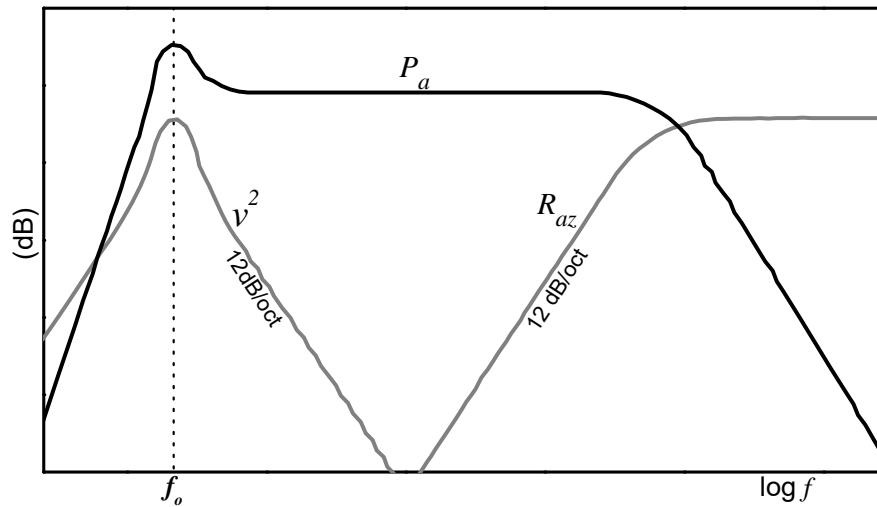
Frekvencijska zavisnost brzine kretanja membrane v pri konstatnoj pobudi nekom silom prikazana je ranije na slici 14.10. Njena vrednost je maksimalna na mehaničkoj rezonanci i opada na obe strane linearno sa frekvencijom. To sa obe strane rezonance stvara nagib dijagrama brzine 6 dB/oktavi. U izrazu (16.5) se vidi da snaga zračenja zavisi od kvadrata brzine, pa dijagram kvadrirane brzine ima sa obe strane oko rezonance nagib 12 dB/oktavi, kao što je prikazano na slici 16.8.

U dijagramu je ucrtana i resultantna snaga zračenja P_a prema izrazu (16.5). Relativni odnos tri krive duž ordinatne ose na dijagramu izabran je proizvoljno da bi se dobila čitljiva grafička predstava. Vidi se da su nagibi dijagrama kvadrata brzine i otpornosti zračenja jednake strmine, ali suprotni. Rezultanta takvog njihovog onosa je linearizacija izračene snage u intervalu od rezonantne frekvencije membrane do frekvencije kada membrana postaje dovoljno velika u odnosu na λ i počinje da generiše ravan talas. Iznad te frekvencije snaga zračenja počinje neumitno da opada.

Prema tome, sa dijagrama se može zaključiti da je radni frekvencijski opseg svakog zvučnika fizički ograničen sa dve jasne granice. Donja granica je određena rezonantnom frekvencijom membrane, pa izbor membrane, a to znači njene mase i elastičnosti vešanja, definiše zonu na frekvencijskoj osi u kojoj zvučnik počinje efikasno da radi. Gornja granica radnog opsega zvučnika direktno je određena prečnikom membrane. Za širenje radnog opsega zvučnika prema višim frekvencijama neophodno je smanjivati prečnik membrane. Međutim, problem konstrukcije zvučnika zadatog radnog opsega nije tako linearan, jer se smanjenjem prečnika membrane smanjuje i izračena snaga, kao što je pokazano na slici 16.5. To se može iskompenzovati korišćenjem motora koji može praviti adekvatno veće pomeraje. Na taj način je dizajn konstrukcije zvučnika koji treba da radi u nekom zadatom frekvencijskom opsegu uz zadatu snagu koju treba da emituje stvar izbora, tehnoloških mogućnosti, ali i kompromisa.

Činjenica da svaka membrana zvučnika ima neku gornju graničnu frekvenciju iznad koje opada njeno zračenje uslovilo je da se izrađuju posebne vrste zvučnika za više i niže frekvencije. Zbog toga zvučnički sistemi koji treba da pokriju čitav čujni opseg u sebi sadrže najmanje dva zvučnika koji u svom radu dele taj opseg: sa većom membranom za niže frekvencije i sa manjom membranom za visoke frekvencije. Više detalja o toj vrsti zvučničkih sistema nalazi se u narednom podpoglavlju. Jedan od načina da se proširi

frekvencijski opseg rada zvučnika je dodavanje manje membrane u sredinu glavne membrane, kao što je prikazano na desnoj strani slike 16.7.



Slika 16.8 – Objašnjenje načina linearizacije snage zračenja zvučnika (relativni položaj krivih duž ordinate je odabran da bi se dobio jasan dijagram).

Činjenica da svaka membrana zvučnika ima neku gornju graničnu frekvenciju iznad koje opada njeno zračenje uslovilo je da se izrađuju posebne vrste zvučnika za više i niže frekvencije. Zbog toga zvučnički sistemi koji treba da pokriju čitav čujni opseg u sebi sadrže najmanje dva zvučnika koji u svom radu dele taj opseg: sa većom membranom za niže frekvencije i sa manjom membranom za visoke frekvencije. Više detalja o toj vrsti zvučničkih sistema nalazi se u narednom podpoglavlju. Jedan od načina da se proširi frekvencijski opseg rada zvučnika je dodavanje manje membrane u sredinu glavne membrane, kao što je prikazano na desnoj strani slike 16.7.

16.2 Osnovne karakteristike zvučnika kao pretvarača

Sa aspekta korišćenja zvučnika kao uređaja u nekom elektroakustičkom sistemu postoji nekoliko numeričkih pokazatelja kojim se globalno opisuje njihov odziv pri pobudi audio signalom iz pojačavača. Najvažniji među njima su:

- efikasnost (faktor pretvaranja),
- električna snaga,
- nominalna impedansa,
- nivo izobličenja.

U nastavku su detaljnije opisane ove karakteristike.

Efikasnost (faktor pretvaranja)

Efikasnost rada zvučnika, to jest njegov faktor pretvaranja, može se definisati na nekoliko načina. U najopštijem slučaju može se posmatrati odnos generisane zvučne snage i uložene električne snage. Takav pristup vodi ka koeficijentu korisnog dejstva ranije definisanim izrazom (4.1). Zvučna snaga koju zvučnik emituje u vazduh odlazi u svim pravcima, to jest u prostorni ugao zračenja koji mu je ostavljen. Najšešće je to 4π ili 2π steradijana. Ovako definisan pokazatelj efikasnosti pretvaranja može biti relevantan na primer za određivanje nivoa reflektovanog zvuka koji će zvučnik stvarati u nekoj prostoriji. Naime, nivo reflektovanog zvuka je posledica kompletne izračene energije koja iz zvučnika dospeva u vazdušni prostor prostorije, kao što je to pokazano u poglavlju 12.3. Međutim, upotreba zvučnika u najvećem broju slučajeva podrazumeva da se negde direktno ispred njega nalaze potencijalni slušaoci. Tada kod njih dominira direktan zvuk, pa zbog toga ukupna zvučna snaga koju generiše zvučnik nije relevantan podatak. Šta više, u svim standardnim načinima reprodukcije zvuka uglavnom se zahteva da slušalac bude tačno u osi zvučnika. Zbog toga je kao podatak o radu zvučnika i njegovoj efikasnosti najčešće relevantno samo ono što utiče na direktan zvuk u pravcu njegove ose.

Svođenjem pitanja efikasnosti samo na zračenje koje zvučnik ostvari u pravcu ose usmerava moguću definiciju faktora pretvaranja na odnos između zvučnog pritiska na jediničnom rastojanju i električne pobude. Ulazna veličina zvučnika je električna snaga, pa se efikasnost onda definiše kao:

$$T_{p,P} = \frac{P}{\sqrt{U^2/Z}} \quad (16.6)$$

gde je P pritisak na rastojanju 1 m u smeru ose zvučnika, Z je nominalna impedansa zvučnika na kojoj se u električnom kolu sa pojačavačem i zvučnikom javlja napon U . Na taj način je ispod korena u imeniku razlomka izraz za električnu snagu na zvučniku. Za ovako definisanu efikasnost njena jedinica postaje $\text{Pa}/\sqrt{\text{W}}$.

S obzirom da se stanje u zvučnom polju uobičajeno izražava nivoom zvuka, u najširoj upotrebi je efikasnosti zvučnika koja je, umesto zvučnim pritiskom kao u izrazu (16.6), definisana nivoom zvuka koji on stvara na jediničnom rastojanju 1 m u svojoj osi pri pobudi jediničnom električnom snagom 1 W. Ova veličina se ponekad naziva osetljivost (*sensitivity*). To je jednobrojni podatak o nivou zvuka koji se označava sa $L_{1m,1W}$ ili kao podatak XX dB @ 1 W @ 1 m. Ovako definisana efikasnost se može naći u svim fabričkim podacima za zvučnike koji se danas koriste.

Izražavanja osetljivosti zvučnikom preko $L_{1m,1W}$ je pogodno jer za bilo koje drugo rastojanje od zvučnika nivo zvuka se lako izračunava na osnovu zakona opadanja nivoa zvuka (zakon „6 dB“). Ako je poznata efikasnost zvučnika, onda je nivo zvuka koji on stvara u pravcu ose pri pobudi bilo kojom električnom snagom P na proizvoljnem rastojanju r :

$$L = L_{1m,1W} + 10 \log P - 20 \log r \quad (16.7)$$

Odavde sledi da je maksimalni nivo zvuka koji zvučnik može da proizvede u svojoj osi funkcija efikasnosti i električne snage. Izraz (16.7) pokazuje da se isti nivo zvuka na zadatom rastojanju može postići zvučnikom veće efikasnosti i manje ukupne snage, ili sa zvučnikom manje efikasnosti ali čija je snaga adekvatno veća. To takođe objašnjava da na često pitanje kolika je potrebna snaga zvučnika u nekoj konkretnoj situaciji njihove primene nema jednoznačnog odgovora. On zavisi od efikasnosti primenjenih zvučnika.

Efikasnost zvučnika koji se danas najšire koriste kreće se u širokom rasponu. Postoji kategorija manje efikasnih zvučnika kod kojih je $L_{1m,1W}$ reda veličine 80 dB. Za neke namene se izrađuju visokoefikasni zvučnici, pre svega za potrebe ozvučavanja, čija vrednost parametra $L_{1m,1W}$ može biti i preko 100 dB. Generalno se može reći da manju efikasnost imaju zvučnici od kojih se zahteva visok kvalitet reprodukcije, kao na primer za kontrolu zvuka u studijima, dok se visoke vrednosti efikasnosti sreću kod zvučnika namenjenih ozvučavanju velikih prostora gde zadovoljenje nekih drugih ciljeva dopušta izvesne kompromise u domenu kvaliteta.

Električna snaga zvučnika

Električna snaga je osnovna veličina kojom se opisuju mogućnosti zvučnika kao pretvarača. Ona je značajna sa dva aspekta: određuje uslov za izbor pojačavača na koji se zvučnik povezuje, ali uz podatak o efikasnosti određuje mogućnosti zvučnika u generisanju nivoa zvuka u prostoru. Međutim, deklarisanje snage zvučnika nije jednoznačno zbog složene prirode talasnih oblika audio signala. Osnovni parametar je maksimalna električna snaga koju zvučnik može da primi, i ona se naziva nominalna snaga ili prosečna snaga (*average power*). Ovaj podatak se označava i kao dugovremena snaga, a u popularnoj literaturi naziva se „sinusna snaga“ ili „rms snaga“. Ona je određena efektivnom vrednošću pobudnog signala koji zvučnik može dovoljno dugo da prima, a da pri tome ne dođe do njegovog oštećenja i promene karakteristika usled prekomernog zagrevanja ili usled prevelike ekskurzije membrane koja bi dovila do njenog oštećenja. Kao „dovoljno dugo“ u standardnim mernim procedurama uobičajeno se usvaja interval od dva sata.

Nominalna snaga je dominantno određena termičkim mogućnostima konstrukcije zvučnika. Zbog male vrednosti koeficijenta iskorišćenja samo mali procenat dovedene električne snage prelazi u akustički domen i širi se zvučnim talasom u okolni vazduh. Ostatak dovedene električne snage ostaje u zvučniku i pretvara se u toplotu. Posledica toga je zagrevanje namotaj njegovog kalema i najbližih delova. U tom procesu postoje neke granične vrednosti temperature koju konstrukcija zvučnika može da izdrži bez deformacije i oštećenja, pa je time određena i granična vrednost električne snage koju zvučnik može da prima.

Na zvučnik se može dovesti snaga veća od nominalne, pod uslovom da se to dešava u dovoljno kratkom vremenskom intervalu i da kretni sistem zvučnika to može da realizuje.

Kratkotrajno povećanje disipacije toplote koje će pri tome nastati amortizuje se toplotnim kapacitetom konstrukcije zvučnika i procesom odvođenja toplote generisane u kalemu na njegove druge masivnije delove. Podatak o električnoj snazi koja se može dovesti na zvučnik u nekom kratkom vremenskom intervalu, a da pri tome ne nastane oštećenje, načelno se označava kao kratkovremena snaga. U popularnoj literaturi ranije se koristio izraz

„muzička snaga“.

U audio signalu uvek postoje amplitude koje su veće od efektivne vrednosti, i to je definisano podatkom o njegovom krest faktoru. Električna snaga koju zvučnik u tim kratkotrajnim maksimumima može prihvati bez oštećenja predstavlja podatak koji u opštem slučaju nije jednoznačno određen. Na primer, ako se zvučnik pobuđuje sinusnim signalom konstantne amplitude i on s njim razvija nominalnu snagu, trenutna vrednost snage u maksimumima tog talasnog oblika u obe poluperiode je za 3 dB veća od nominalne (dvostruko veća). Takav podatak se ponekad navodi u prospektnoj dokumentaciji pod nazivom programska snaga (*programme power*). Jasno je da je to po svojoj prirodi redundantna informacija.

Standardizovani postupak merenja kratkovremene snage definiše pobudu zvučnika belim šumom pripremljenim tako da mu nivo krest faktora bude 6 dB, to jest da mu vršne vrednosti amplitude budu dva puta veće od efektivne vrednosti. Kada se efektivna vrednost takvog mernog signala podesi da se na zvučniku razvija nominalna snaga, podatak o trenutnoj vrednosti snage u maksimumima (ako to konstrukcija zvučnika izdržava) naziva se vršna snaga (*peak power*). Zbog signala s kojim se vrši merenje vrednost dobijena na takav način veća je četiri puta od nominalne snage, to jest za 6 dB. Učestanost pojavljivanja takvih premašenja nominalne snage u vremenu određena je statističkim osobinama koje ima beli šum kao signal.

Prema tome, standardizovan sistem definisanja električne snage zvučnika koji se može naći u njihovim fabričkim podacima uključuje tri podatka. To su:

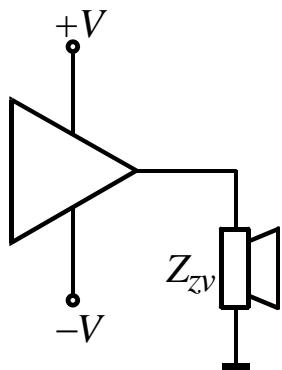
1. nominalna snaga – koju konstrukcija termički izdržava dva sata bez posledica,
2. vršna snaga – dva puta veća od nominalne,
3. programska snaga – četiri puta veća od nominalne,

Kada proizvođač pored podatka o nominalnoj snazi daje i vrednost vršne snage, to znači da konstrukcija kretnog sistema omogućava takve trenutne pomeraje membrane bez klipovanja. Ako nedostaje podatak o programskoj snazi, to znači da taj zvučnik ne može ostvariti u impulsu četvorostruko veću snagu.

Impedansa zvučnika

Impedansa zvučnika je važan parametar, jer od nje zavisi snaga koju će na njemu razvijati pojačavač. Naime, pojačavači snage imaju veoma malu izlaznu otpornost. Kod kvalitetnih pojačavača to može biti reda stotih delova Oma. Zbog toga izlazna struja pojačavača koja ide kroz zvučnik zavisi samo od napona napajanja izlaznog stepena pojačavača i

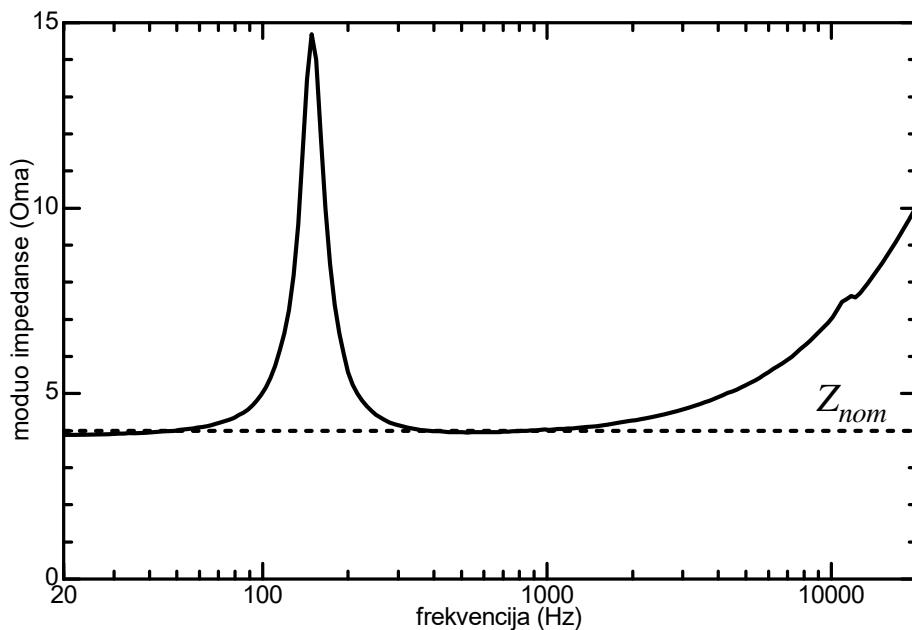
impedanse zvučnika. Na slici 16.9 prikazana je principijelna šema izlaznog stepena pojačavača snage povezanog na zvučnik. Snaga koja se razvija na zvučniku obrnuto je srazmerna impedansi povezanog zvučnika. U okolnostima kada je izlazna otpornost pojačavača veoma mala a napon napajanja V fiksiran, jedino impedansa zvučnika određuje snagu koja će se pri zadatom ulaznom signalu na njemu razvijati.



Slika 16.9 – Principijelna šema izlaznog stepena pojačavača snage i povezanog zvučnika

Prema tome, da bi se mogli dizajnirati elementi izlaznog stepena pojačavača neophodno je unapred poznavati impedansu zvučnika. To je dovelo do standardizacije vrednosti impedanse zvučnika koji se danas proizvode. Nominalne vrednosti impedanse elektrodinamičkih zvučnika su 8 Oma ili 4 Oma. Kroz istoriju razvoja zvučnika pojavljivale su se i drugačije vrednosti, ali su takvi zvučnici iščezli. U skladu sa tim, i pojačavači snage se deklarišu da rade sa jednom od ove dve definisane vrednosti impedanse zvučnika. Ako se na pojačavač priključi zvučnik čija je impedansa manja od deklarisane, povećavaće se izlazna struja, a time se povećava i snaga koja se razvija na zvučniku. Međutim, pri tome preti opasnost da veličina izlazne struje premaši granične mogućnosti elemenata u izlaznom stepenu, što može dovesti do njihovog pregorevanja. Zbog toga većina današnjih pojačavača snage ima ugrađenu zaštitu koja ga isključuje kada izlazna struja pređe granicu bezbednosti. Naravno da povećanje snage zbog manje impedanse zvučnika može predstavljati opasnost i za povezani zvučnik. Obrnuto, ako se impedansa zvučnika povećava u odnosu na nominalnu vrednost za koju je pojačavač deklarisan, on neće moći da dostigne snagu za koju je napravljen.

Impedansa zvučnika je kompleksna, jer u sebi sadrži izvesne reaktivnosti. Prvo, membrana je rezonantni sistem kao što je ranije prikazano u poglavљу 14.3. Ona je pozicionirana na početku radnog opsega zvučnika. Uticaj rezonance membrane se odražava i na impedansu zvučnika merenu na njegovim električnim priključcima. Drugo, kalem zvučnika ima neku svoju induktivnost koja se takođe odražava na vrednost impedanse. Zbog toga frekvencijska zavisnost impedanse zvučnika principijelno izgleda kao na slici 16.10. Vidi se jasan maksimum kao posledica rezonance membrane. Položaj tog maksimuma je istovremeno indikator donje granične frekvencije radnog opsega zvučnika. Na višim frekvencijama vrednost impedanse raste zbog uticaja induktivnosti kalema.

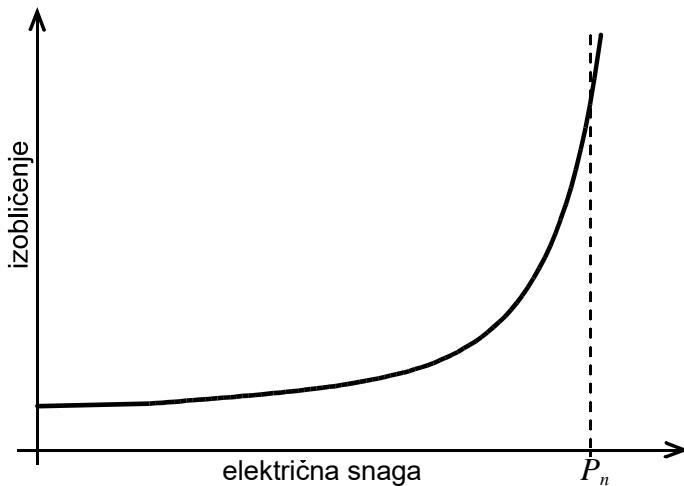


Slika 16.10 – Frekvencijska zavisnost modula impedanse jednog zvučnika (nominalna impedansa je 4 Oma)

Deklarisana vrednost impedanse zvučnika, to jest njena nominalna vrednost, označena je na slici 16.10. Ta vrednost se navodi na svakom zvučniku, i ona je uobičajeno 4 ili 8 Oma. Vidi se da zvučnik čija je impedansa izmerena i prikazana na slici ima nominalnu impedansu 4 Oma. Prekomerni uticaj rezonance membrane kontroliše se načinom ugradnje, to jest kutijom i njenim karakteristikama, čime se podešava Q faktor tako da se minimizira devijacija u toj oblasti frekvencija.

Izobličenja

Izobličenja su važna karakteristika zvučnika zbog toga što je ova vrsta elektroakustičkih pretvarača najlošija karika u svakom lancu prenosa akustičkih signala. Izobličenja koja nastaju u zvučnicima u proseku su za red veličine veća od izobličenja u pojačavačkim sklopovima. Postoji više uzroka nelinearnosti funkcije prenosa zvučnika. Oni su u najvećoj meri posledica nelinearnosti u pretvaranju ulazne struje u pomeraj membrane. Detalji konstrukcije kretnog sistema i magnetskog kola određuju koje će fizičke pojave u njima najviše doprinosti izobličenju.



Slika 16.11 – Principijelni dijagram zavisnosti izobličenja zvučnika od električne snage koja se dovodi iz pojačavača

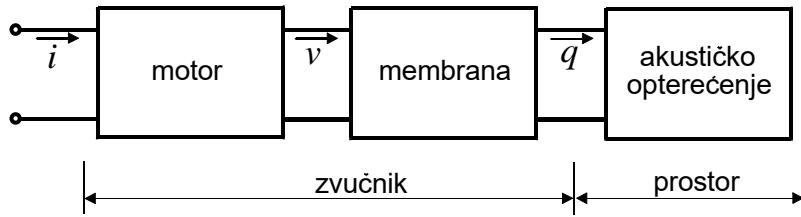
Karakteristično za zvučnike je da nivo izobličenja monotono raste sa porastom električne snage koja se na njih dovodi, a to znači sa veličinom pomeraja membrane. Ta zavisnost je principijelno prikazana dijagrom na slici 16.11. Sa povećanjem dovedene električne snage konstantno se povećava izobličenje koje je maksimalno u oblasti oko nominalne snage zvučnika P_n . U jednostavnijim (to jest jeftinijim) zvučnicima izobličenja pri nominalnoj snazi mogu biti reda desetak procenata, pa i mnogo više. Takođe je neumitna činjenica da pri radu zvučnika ukupna izobličenja, čak i pri malim snagama, samo kod najboljih zvučnika silaze ispod 0,5%. Sa slike 16.11 se zaključuje da se maksimalno moguća linearost zvučnika postiže samo pri snagama koji su dovoljno ispod njihove nominalne snage. To je razlog zbog koga je uvek poželjno koristiti zvučnike čija je nominalna snaga dovoljno veća od snage koja je realno potrebna.

16.3 Modelovanje rada zvučnika

Opisivanje funkcije zvučnika bazira se na elementima od koji se on sastoji i koji objedinjuju električni, mehanički i akustički domen. Tri osnova elementa svakog zvučnik, svaki za sebe, već su opisani i komentarisani ranije. To su:

- linearni električni motor,
- membrana i
- akustičko okruženje.

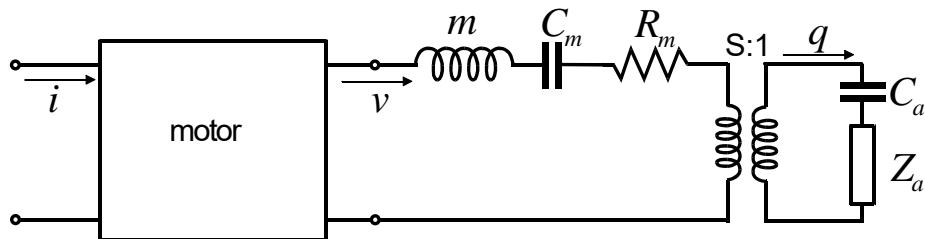
Ova tri elementa su prikazana u blok šemi zvučnika na slici 16.12. Svaki od njih se predstavlja svojom ekvivalentnom električnom šemom, pa je modelovanje zvučnika pitanje međusobne veze elemenata iz ova tri domena.



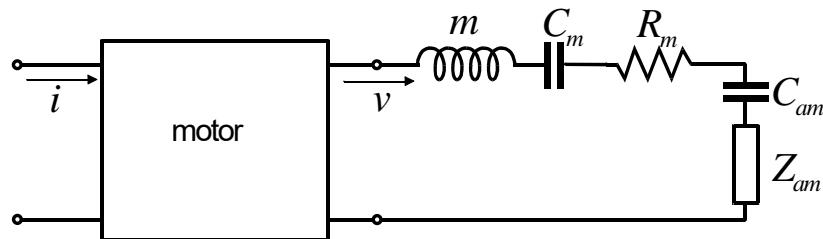
Slika 16.12 –
Principijelna blok-šema
strukture zvučnika

Ekvivalentna šema zvučnika

Model kojim se predstavlja akustičko okruženje zvučnika ranije je prikazan na slici 16.4. To je redna veza impedanse zračenja i akustičkog kapaciteta unutrašnjosti kutije. Ekvivalentna električna šema mehaničkog sistema membrane je takođe ranije prikazana na slici 14.9. Sprega između mehaničkog i akustičkog domena u ekvivalentnim električnim šemama realizuje se idealnim transformatorom čiji je prenosni odnos $S:1$, gde je S površina membrane. Takav spoj membrane sa akustičkim okruženjem ranije je prikazan na slici 14.14. Koristeći tu predstavu može se blok šema zvučnika sa slike 16.12 razviti na način koji je prikazan na slici 16.13.



Slika 16.13 – Blok šema zvučnika sa detaljnije razvijenim mehaničkim i akustičkim delom



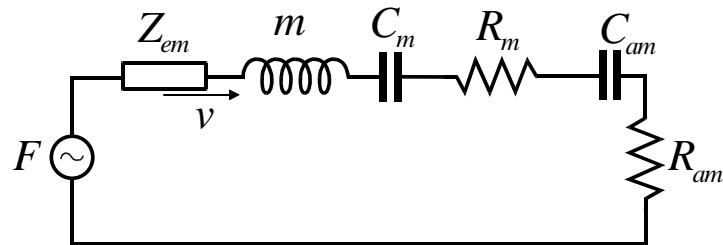
Slika 16.14 – Blok šema zvučnika sa akustičkim parametrima preslikanim u mehanički domen

Koristeći princip transformacije iz akustičkog u mehanički domen definisan izrazom (14.20) šema sa slike 16.13 može se prikazati kao na slici 16.14. Na šemi su:

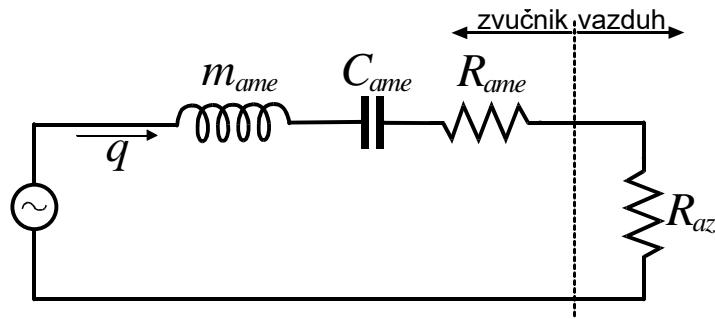
$$\begin{aligned} C_{am} &= S^2 C_a \\ Z_{am} &= S^2 Z_a \end{aligned} \quad (16.8)$$

Šema pokazuje da u mehaničkoj impedansi koja opterećuje motor figuriše redna veza mehaničkih parametara membrane i akustičkih parametara preslikanih u mehanički domen. S obzirom na realnu masu membrane m reaktivni deo impedanse zračenja, koji je takođe induktivnog karaktera, može se zanemariti. Vidi se da je ukupna elastičnost u kolu rezultanta redne veze elastičnosti vešanja membrane i elastičnosti koja potiče od vaduha zatvorenog u kutiji. Na taj način akustički kapacitet kutije može da utiče na rezonantnu frekvenciju, a time i na donju graničnu frekvenciju zvučnika. To objašnjava zašto je značajno da zapremina kutije bude adekvatno odabrana prema mehaničkim karakteristikama zvučnika. Treba imati u vidu da predstavljanje kutije na ekvivalentnoj električnoj šemi njenim akustičkim kapacitetom važi samo u dovoljno niskim frekvencijama.

Predstavljanje elektrodinamičkog motora njegovom ekvivalentnom električnom šemom bazira se na principima koji su ranije predstavljeni na slici 14.17. S obzirom na složenost zvučnika i činjenicu da se u njemu spajaju tri fizička domena, postoje razne mogućnosti da se ekvivalentna električna šema uprosti svođenjem na samo jedan domen. U literaturi se mogu naći razne varijante ekvivalentne šeme zvučnika u zavisnosti od toga što je potrebno analizirati ili potencirati. Jedna moguća varijanta šeme prikazana je na slici 16.15 sa električnim i akustičkim elementima preslikanim u mehanički domen. Uticaj motora je predstavljen generatorom sile. Na šemi je Z_{em} električna impedansa zvučnika preslikana u mehanički domen, a R_{am} je akustička otpornost zračenja, takođe preslikana u mehanički domen. Na toj otpornosti se razvija snaga zračenja. Preslikavanja iz akustičkog i električnog domena u mehanički domen vrši se koristeći idealne transformatore prikazane u poglavlju 14.



Slika 16.15 – Ekvivalentna električna šema zvučnika sa svim parametrima preslikanim u mehanički domen



Slika 16.16 – Jedna moguća ekvivalentna električna šema zvučnika sa svim elementima prebačenim u akustički domen

Šemu sa slike moguće se transformisati na razne načine u zavisnosti od toga u kom domenu se posmatra (električnom, mehaničkom ili akustičkom). Jedan takav primer je prikazan na slici 16.16, gde su svi elementi iste prirode predstavljeni jednom zbirnom akustičkom komponentom. Tako induktivnost m_{ame} u sebi sadrži masu kretnog sistema i induktivnost kalema, C_{ame} u sebi sadrži elastičnost vešanja membrane i elastičnost vazduha u kutiji, a R_{ame} sadrži mehaničku otpornost vešanja kretnog sistema i sve otpornosti iz električnog domena. Kada je zvučnik ugrađen u beskonačnu ploču vrednost C_{ame} sadrži samo elastičnost vešanja membrane. Na šemi je posebno izdvojena samo otpornost zračenja R_{az} na kojoj se razvija akustička snaga da bi se jasnije video uticaj svih elemenata zvučnika koji na to utiču.

Na šemi sa slike 16.15 vidi se da stepen iskorišćenja zvučnika zavisi od odnosa otpornosti zračenja i ukupne otpornosti u kolu sa slike. Pri tome, ukupna termogena otpornost u kolu je zbir unutrašnje otpornosti generatora (izlazna otpornost pojačavača i otpornost provodnika za vezu), otpornosti namotaja kalema, mehaničke otpornosti u vešanju kretnog sistema (nije prikazana na šemi), i otpornosti zračenja. Induktivnost kalema se sabira sa mehaničkom induktivnošću koja na šemi predstavlja masu kretnog sistema.

16.4 Složeniji zvučnički sistemi

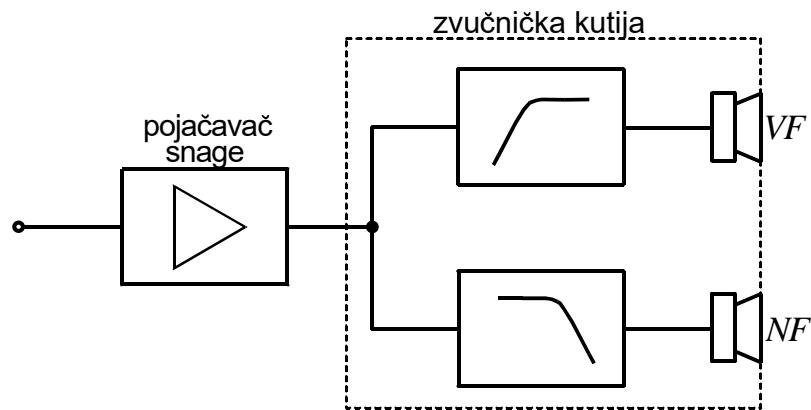
Da bi se zadovoljili različiti zahtevi koji se pojavljuju u korišćenju zvučnika kao elektroakustičkih pretvarača koriste se različiti složeniji zvučnički sistemi. Jedan od uobičajenih zahteva je pokrivanje što šireg frekvencijskog opsega, po mogućnosti počevši od neke dovoljno niske frekvencije do preko 20 kHz. U okolnostima kada jedna membrana ima fizička ograničenja koja su posledica njenih dimenzija, kao što je prikazano na slici 16.8, jasno je da jedan zvučnik ne može da zadovolji takav zahtev i pri tome obezbedi i druge uslove kao što su dovoljno velika snaga i linearnost u radu. Zahtev za ostvarivanjem željene snage, a to znači akustičkog protoka, onemogućava da se proizvoljno smanjuje prečnik zvučnika kako bi se povisila gornja granična frekvencija. Drugi mogući zahtev je u pravcu povećanja efikasnosti zračenja zvučnika da bi se

prevazišla njegova niska efikasnost zračenja. Uobičajena rešenja za ova dva slučaja prikazani su u nastavku. Najzad, postoji još jedan zahtev čije rešenje vodi ka usložnjavanju zvučničkih sistema, a to je postizanje nekog željenog oblika usmerenosti zračenja.

Višesistemske zvučničke kutije

Rešenje za realizaciju zvučničkih sistema koji pokrivaju čitav čujni opseg vodi ka kombinovanju u jedan sistem zvučnika specijalizovanih za delove tog opsega. Uobičajeno je da se prave zvučnici za donji deo čujnog opsega, do reda par kHz (u narodu poznati kao „niskotonci“), i zvučnici za gornji deo opsega („visokotonci“). Pokrivanje čitavog opsega se postiže njihovim kombinovanjem, kao što je prikazano blok-šemom na slici 16.17. Predstavljena je dvosistemska zvučnička kutija koja u sebi sadrži dva zvučnika: za gornji (VF) i donji deo čujnog opsega (NF). Postoje zvučnički sistemi kod kojih se čujni opseg deli na tri zvučnika.

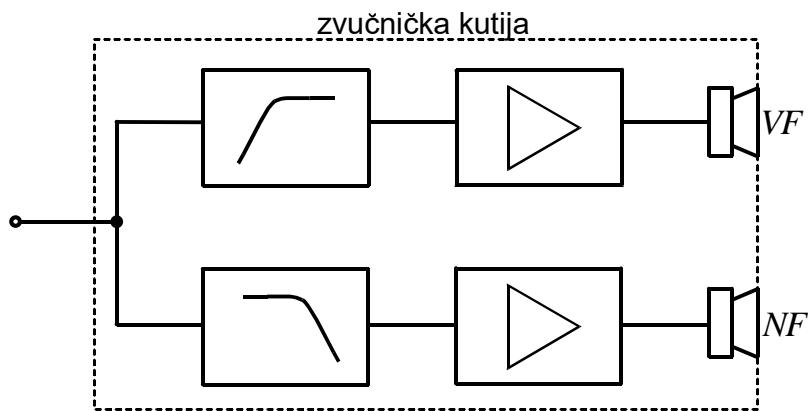
Da bi se razdvojili signali za dva specijalizovana zvučnika na ulazu u takvu zvučničku kutiju umeće se posebno filtersko kolo, što je simbolički naznačeno na blok šemi. To kolo se uobičajeno naziva skretnica. Filtri u njoj mogu biti različitih strmina, pa se koriste filtri drugog, trećeg ili višeg reda. Osnovna tema pri izboru skretnice je u njihovoj funkciji prenosa oko presečne frekvencije gde oba zvučnika emituju isti signal. Ono što se u dizajnu filterskih kola skretnica detaljno razmatra su njihove fazne karakteristike u toj zoni frekvencija, jer od toga zavisi ishod superponiranja izraženih signala. Realizacija pasivnih filtera ima svoja ograničenja, pa su razvijane razne teorije o optimalnim rešenjima. Specifičnost skretnice je u tome što sva snaga za zvučnike ide kroz njene elemente, pa njihova konstrukcija kod zvučničkih sistema velike snage uvodi neke posebne zahteve (na primer motanje induktivnosti dovoljno debelom žicom).



Slika 16.17 – Blok-šema dvosistemske zvučničke kutije sa posebnim zvučnicima za visoke i niske frekvencije i skretnicom

Dvosistemski zvučnički sistemi imaju immanentnu osobinu da se gornji i donji deo spektra emituje sa prostorno razdvojenih tačaka (dva odvojena zvučnika). U nekim okolnostima ta činjenica može biti uzrok deformacije zvučne slike, pre svega kada se zvučnička kutija nalazi dovoljno blizu slušaoca. Da bi se taj problem otklonio, u nekim sistemima se visokotonski zvučnik postavlja u centar niskotonskog zvučnika. Zbog svojih uobičajeno malih dimenzija visokotonski zvučnik ne remeti zračenje velike membrane. U nekim sofisticiranim rešenjima zvučničkih sistema koristi se integrisana konstrukcija oba zvučnika kod koje je unutar kalema većeg zvučnika postavljen sistem manjeg zvučnika.

Jedno od rešenja za minimizaciju problema pasivnih skretnica, a to znači podešavanja njihove fazne karakteristike i robusnosti komponenti, nađeno je u takozvanim aktivnim zvučničkim kutijama. Njihov koncept je prikazan blok-šemom na slici 16.18. Osnovna odlika ovog sistema je u tome što se unutar zvučničke kutije nalaze i pojačavači, i to posebno za VF i NF zvučnik. U tom slučaju se skretnica nalazi na ulazu u kutiju ispred pojačavača.



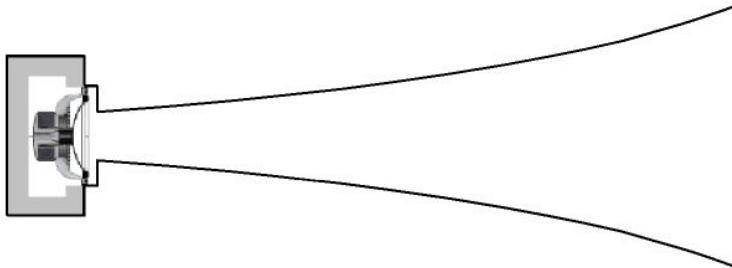
Slika 16.18 – Blok šema aktivne dvosistemske zvučničke kutije

Ovakav koncept ima dve važne prednosti. Prvo, skretnice u aktivnim kutijama se realizuju kao aktivni filtri, što daje veće mogućnosti za podešavanje faznih karakteristika dva filtra i otklanja tu vrstu nedostataka koje unose pasivne skretnice. Drugo, pojačavači se nalaze neposredno uz zvučnike, pa se eliminiše praktično svaki uticaj provodnika koji ih povezuju. Sa razvojem tehnologije pojačavača snage ovakav koncept zvučničkih sistema postaje sve više zastupljen u praksi, čak i u sistemima za ozvučavanje. Dalji korak u otklanjanju problema koje unose filtri skretnica je u digitalnim filtrima. To znači da se u zvučničku kutiju dovodi digitalni signal, pa posle skretnica vrši D/A konverzija i signal, vodi na pojačavače. Razdvajanje signala na dva opsega digitalnim filtima daje veće mogućnosti za kontrolu faza.

Zvučnici sa levkom

Jedan od imantentnih nedostataka zvučnika je njihov veoma mali stepen iskorišćenja. Pošto je on rezultat neprilagođenosti impedanse zvučnika na impedansu zračenja prostora, što je pokazano na slici 16.16, jedini teorijski mogući način da se stepen

iskorišćenja poveća je primena nekog elementa za prilagođenje te dve impedanse, što bi omogućilo povećanje akustičke snage zračenja zvučnika. Takav element u praksi je levak koji se dodaje ispred membrane zvučnika. Princip levka je prikazan na slici 16.19. Podrazumeva se da je zračenje sa zadnje strane membrane odvojeno, što je na primeru sa slike naznačeno kutijom. Osenčena površina u kutiji predstavlja apsorpcioni materijal.



Slika 16.19 – Šematska ilustracija primene levka ispred membrane zvučnika

Da bi se objasnila funkcija levka potrebno je uporediti impedasne zračenja u slučaju kada membrana zrači slobodno u prostor i kada se ispred nje nalazi levak. Snaga zračenja membrane zvučnika je:

$$P_a = q^2 R_{az} \quad (16.9)$$

gde je q protok, a R_{az} otpornost zračenja, to jest realni deo impedanse zračenja koju diktira spoljašnje okruženje. Izraz (16.1) pokazuje da je u oblasti gde zvučnik predstavlja tačkasti izvor, a to znači u oblasti niskih frekvencija, snaga zračenja:

$$P_a = q_o^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi} \quad (16.10)$$

U ovom izrazu se pretpostavlja da membrana zrači u čitav prostor, pa je prostori ugao zračenja 4π . U slučaju da je zvučnik ugrađen u ploču taj ugao je 2π .

Međutim, ako se pretpostavi da je membrana zvučnika postavljena na zatvorenom kraju jedne beskonačne krute cevi poprečnog preseka S , menja se vrednost impedanse zračenja koju vidi membrana. Snaga zračenja je tada:

$$P_a = q_o^2 \frac{\rho c}{S} \quad (16.11)$$

Upoređujući izraze za snagu zračenja izvora u slobodnom prostoru i u beskonačnoj cevi vidi se da ako važi uslov:

$$k^2 S \ll 4\pi \quad (16.12)$$

onda je snaga zračenja membrane u cevi mnogo veća od snage koju ista membrana razvija kada zrači u slobodan prostor.

Da bi se na neki način iskoristilo pojačanje efikasnosti zračenja membrane u cevi, potrebno je da cev ne bude beskonačna već neke konačne dužine kako bi se na njenom drugom kraju dobilo zračenje u prostor. Nažalost, u takvom slučaju dobitak snage ne može se iskoristiti jer se tada u cevi javlja refleksija od otvorenog kraja. To u njoj dovodi do pojave sopstvenih rezonanci, što menja impedansu koju vidi membrana. Realni deo impedanse zračenja koju tada vidi membrana nije više $\rho c/S$. Ona postaje funkcija dužine cevi L i impedanse koja postoji na otvoru cevi koji zrači u prostor. Otpornost zračenja membrane u cevi koja određuje snagu zračenja je sada:

$$R_{az} = \frac{R_{az\text{ otvora}}}{\cos^2(kL)} \quad (16.13)$$

Otpornost zračenja otvora uske cevi je mnogo manja od $\rho c/S$, pa je i otpornost koju vidi izvor mnogo manja, osim u okolini rezonanci cevi. Međutim, rezonantni vrhovi su uski, pa bi zračenje otvora cevi u tom slučaju bilo vrlo nelinearno po frekvencijama i samo na njenim rezonancama bi se video neki dobitak.

Ovaj problem se prevazilazi uvođenjem promenljivog poprečnog preseka cevi, a to znači levka, kao što je prikazano na slici 16.19. Pri tome je potrebno da se poprečni presek levka povećava dovoljno sporo da bi se sprečio diskontinuitet impedanse duž takvog kanala, i da otvor na kraju bude dovoljno velikog prečnika da bi refleksija na njemu bila zanemarljiva. Razvijene su različite teorije o tome po kojoj zakonitosti treba da se menjaju poprečni presek levka, pa se na primer široko primenjuju takozvani eksponencijalni levkovi.

Levkovi kao transformatori impedanse ispred membrane imaju i jedan važan nedostatak. Naime, na početku levka se mogu javljati veoma visoki nivoi zvuka, što uvodi izvesnu nelinearnost u proces prostiranja zvučnog talasa. Kao posledica toga javlja se nelinearno izobličenje. Prema tome, značajno povećanje efikasnosti zračenja ima svoju cenu. Zbog toga se levkovi kao deo zvučničkog sistema koriste u okolnostima kada se zahtevaju vrlo visoki nivoi zvuka sa relativno malim električnim snagama, a da se pri tome ne zahtevaju najviši nivoi kvaliteta reprodukcije. Zvučnici sa levkom se standardno koriste u nekim sistemima za ozvučavanje. Najpoznatiji primer primene levka su megafoni kod kojih se sa vrlo malim snagama (jer njihov pojačavač radi na baterije) u prostoru ispred njih postižu relativno visoki nivoi zvuka.

17. ZVUČNA ZAŠTITA I AKUSTIČKI KOMFOR

Pojava zvuka u čovekovom okruženju može se posmatrati sa dva aspekta. Prvi se odnosi na zvuk koji nosi neki koristan informacioni sadržaj. Takav je slučaj sa govorom i muzikom. Zahtev koji se postavlja u takvim okolnostima je da takav zvuk treba da stigne do slušalaca sa što manje degradacije da bi oni dekodovali željene informacije. U slučaju muzike primljeni zvuk treba da u nekim okolnostima zadovolji još i neke ustanovljene estetske kriterijume. Drugi aspekt posmatranja zvuka odnosi se na potrebu ljudi da se zaštite od raznih zvukova koji dolaze iz okruženja i ne nose nikakav informacioni sadržaj od značaja, ali ih ometaju u komunikaciji, u koncentraciji, remete spavanje i slično. Taj aspekt zvuka javlja kako u zgradama tako i na otvorenom prostoru. Na tom aspektu je zasnovana stručna podoblast akustike koja se uobičajeno naziva zvučna zaštita.

Zvučna zaštita kao tema u akustici nastala je iz potrebe čoveka da se zaštiti od zvukova koji se definišu kao buka, što je po definiciji svaki neželjeni zvuk. Da li će se neki zvuk smatrati bukom ili ne nije pitanje nivoa zvučnog pritiska koji se može izmeriti, nego činjenice da on svojom pojavom nekog ometa. Postoje zvukovi relativno visokog nivoa zvučnog pritiska koji se ne mogu označiti kao buka. To je, na primer, muzički zvuk na koncertima ili u klubovima gde su ljudi kupili kartu da bi prisustvovali događaju i zvuk koji čuju za njih nije buka. S druge strane, neki relativno tihi zvukovi mogu predstavljati buku ako svojom pojavom skreću pažnju, ometaju koncentraciju ili remete san. Takav je slučaj, na primer, sa zvukovima koji noću iz spoljašnje sredine dospevaju u spavaće sobe stanova. Oni su uglavnom niskog nivoa, ali u datim okolnostima ometaju san. Zanimljiva paradigma tihog zvuka koji se mora tretirati kao buka je kapanje vode iz pokvarene česme u tišini stana. Taj zvuk je izuzetno tih, ali njegove vremenske karakteristike, uz analitičku sposobnost čula sluha i prethodno iskustvo, čine da svojom pojavom mogu poremetiti koncentraciju. Mogu se takođe naći brojni primeri u prostorima muzičkih i drugih studija gde neki vrlo tihi zvukovi iz okruženja mogu da ometaju snimanje, pa se s toga nesumnjivo moraju označiti kao buka.

Zvučna zaštita je relativno široka inženjerska oblast koja se bavi teorijom i praksom zaštite od buke. Osnovna tema kojom se ova oblast bavi je analiza prolaska zvuka kroz različite akustičke sisteme prenosa u čovekovom okruženju. Cilj svake takve analize je da se na neki način obezbedi adekvatno slabljenje buke pre nego što dođe do potencijalnih slušalaca. Veliki značaj koji se u savremenom dobu pridaje ekologiji reflektovao se i na značaj zvučne zaštite u raznim oblastima inženjerstva: građevini, arhitekturi, saobraćaju, urbanizmu, mašinskoj industriji itd. Oblast zvučne zaštite vremenom je regulisana mnogim zakonima i standardima, čime je ustanovljena obaveza bavljenja zaštitom od

buke. Iz toga su proizišli razni konkretni zadaci. Tako zgrade moraju pružati dovoljan stepen zaštite od spoljašnje i unutrašnje buke, mašine moraju imati deklarisanu zvučnu snagu koja ne sme prelaziti neke granice, vozila moraju zadovoljavati određene standarde bučnosti, itd. Sve je to otvorilo brojne inženjerske zadatke.

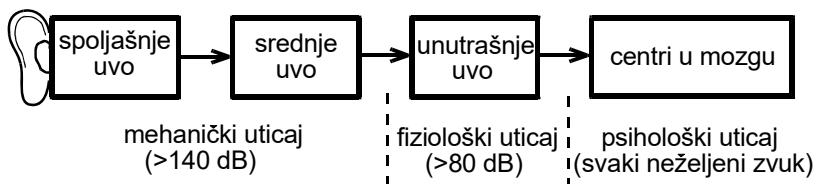
Sa inženjerskog aspekta najkompleksniji problem zvučne zaštite je u zgradama. Razlog je što neželjeni zvukovi do prostorije u kojoj se nalaze ljudi mogu dospevati brojnim putanjama: iz spoljašnjeg prostora kroz fasadu, iz susednih prostorija kroz zidove i tavanice, kroz instalacije, razne otvore, hodnike, kanale, kroz strukturu konstrukcije zgrade, itd. Zvučnom zaštitom u zgradama bavi se jedna posebna podoblast akustike koja se uobičajeno naziva građevinska akustika (*building acoustics*). U nazivu „zvučna zaštita“ implicitno se podrazumeva da su predmet zaštite ljudi, ili preciznije prostori u kojima oni duže borave. Zbog toga je u opisivanju zgrada uveden pojam „boravišna prostorija“ kojim se označavaju takvi prostori. U stanovima to su prostorije deklarisane kao „sobe“, a u poslovnim zgradama to su kancelarije, prostori za sastanke i slično. U normativima koji regulišu projektovanje zgrada definisana je obaveza da se obezbedi adekvatna zvučna zaštita boravišnih prostorija. U prostorijama unutar zgrada gde ljudi ne borave pitanje zaštite od buke se ne postavlja.

17.1 Dejstvo buke na čoveka i njegovo zdravlje

Postoje ozbiljni razlozi za bavljenje zvučnom zaštitom, to jest građevinskom akustikom. Naime, buka se smatra trećim najvećim zagađivačem čovekove sredine, posle vazdušnog zagađenja i nejonizujućih zračenja. Percepcija zvuka odvija se kroz fizičke procese u čulu sluha koji se mogu podeliti u tri faze:

- zvučna energija preko spoljašnjeg i srednjeg uva pobuđuje unutrašnje uvo,
- u slušnim ćelijama nastaju električni impulsni koji preko slušnog nerva idu do centralnog nervnog sistema,
- u centralnom nervnom sistemu vrši se analiza pristiglih impulsa i nastaje svest o postojanju zvuka.

Zbog toga dejstvo buke može imati različite nivoe delovanja na organizam, što je šematski prikazano na slici 17.1. Vrlo visoki nivoi buke, iznad 140 dB, mogu izazvati mehanička oštećenja u prenosnom putu kroz spoljašnje i srednje uvo, jer se pri tome javljaju veliki pomeraji pokretnih delova sa mogućnošću kidanja mekog tkiva. Bubna opna i slušne koščice imaju ograničene mogućnosti pomeraja, pa prekoračenje tih granica dovodi do njihove destrukcije. Dugovremeno izlaganje nešto nižim nivoima buke, ali višim od 80 dB, mogu dovesti do trajnih posledica u radu čula sluha zbog promena koje nastaju na nivou fiziologije rada unutrašnjeg uva. One se manifestuju slabljenjem slušnih sposobnosti, tačnije osetljivosti čula sluha. Međutim, manje je poznato da niži nivoi buke, nekad čak i vrlo niski, mogu pod određenim okolnostima prouzrokovati različite psihološke efekte. Oni su posledica procesa koji se odvijaju u psihološkoj sferi pod uticajem percepcije neželjenih zvukova. Prema tome, svi nivoi buke mogu imati neke specifične posledice na čulo sluha, a preko njega i na kompletan organizam.



Slika 17.1 – Različiti oblici delovanja buke na organizam u zavisnosti od nivoa pobude

U svakodnevnom životu problem buke se po pravilu svodi na psihološki uticaj, jer je čovek permanentno okružen raznih neželjenim zvukovima koji nisu prekomernih nivoa, ali ometaju. Kao rezultat javljaju se reakcije na svesnom nivou, gde se može postići izvesno navikavanje, i na nesvesnom nivou gde nije moguće navikavanje na zvukove. Zbog toga prisustvo buke u prostorima u kojima ljudi duže borave može uticati na zdravlje tako što izaziva stres usled osećaja stalne uznemirenosti, pad koncentracije pri radu ili izaziva zdravstvene poremećaje, najčešće kao posledica poremećaja sna.

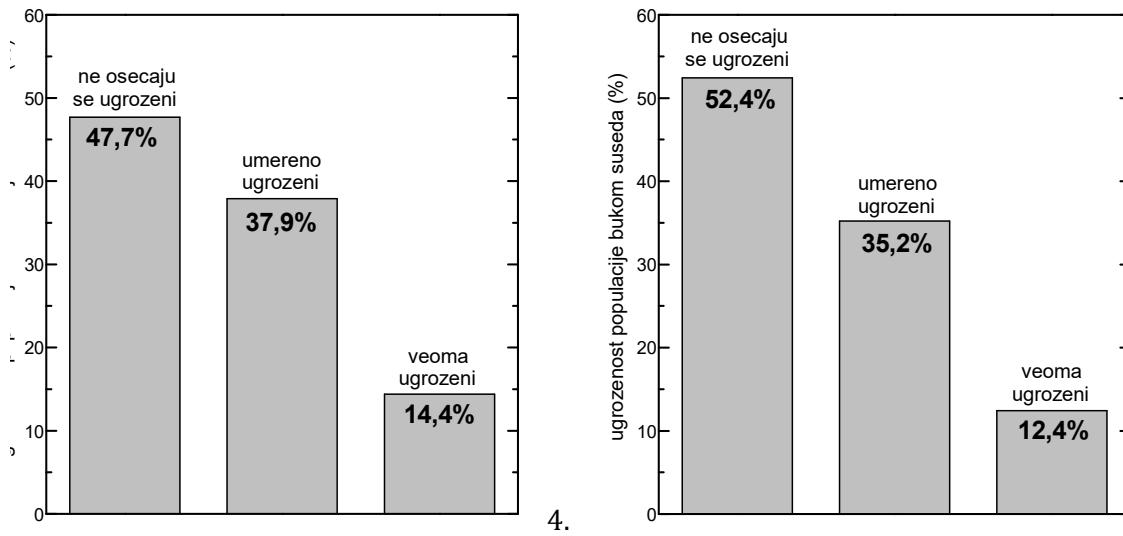
Iz tih razloga temom zaštite od buke bavi se Svetska zdravstvena organizacija (*World Health Organization - WHO*). Ona definiše zdravlje čoveka kao stanje kompletног fizičkog, mentalnog i socijalnog blagostanja, a ne samo odsustvo bolesti i nemoći. Zbog toga se efekat buke na zdravlje ne može jednostavno tumačiti kroz neka štetna fizička dejstva, već pre svega kao poremećaj blagostanja, a to znači kroz psihološki efekat buke. Takvo stanje u dužem vremenskom periodu može prouzrokovati i određene fizičke efekte.

Značaj buke je prevashodno u činjenici da prouzrokuje kratkotrajne psihološke odgovore autonomnog nervnog sistema. Brojna istraživanja su dokazala postojanje posledica usled dejstva buke. Može se javiti psihološka aktivacija u vidu povećanja frekvencije otkucaja srca, povećanja krvnog pritiska, periferne vaskularne rezistivnosti i slično. Pokazano je na primer da se u prisustvu buke koja ima karakter govora smanjuje mogućnost pamćenja verbalnog materijala. Takođe je dokazano da buka utiče na memoriju, na procese selektivnosti i mogućnost biranja strategije u odlučivanju pri izvršavanju kompleksnih zadataka. Najzad, buka utiče na ponašanje u smislu spremnosti na pružanje pomoći, povećanje agresivnosti i smanjenje socijalnog ponašanja. Ukratko, može se reći da buka na kompleksan način menja kvalitet života.

Značajno je pitanje zašto su ljudi toliko osetljivi na buku? Važan deo odgovora je u činjenici da svest o buci ne zahteva pažnju. Čovečije čulo sluha radi neprekidno, što znači i tokom noći, i predstavlja prirodni alarmni sistem za osluškivanje dešavanja u okruženju. U tom smislu ono predstavlja jedan od najvažnijih zaštitnih sistema čoveka. Upravo zbog toga je poremećaj sna verovatno najznačajniji štetni efekat koji se javlja u uslovima povećane buke u okruženju. Statistički posmatrano taj efekat ima najveće posledice po dobrobit čoveka. Poremećaji spavanja pod uticajem buke manifestuju se promenama u fazama spavanja i brojem buđenja. Smatra se da poremećaj sna nastaje kada se u toku noći u okruženju spavača dogodi više od 50 zvučnih događaja koji premašuju nivo od 50 dBA. Izlaganje buci tokom sna povećava krvni pritisak, frekvenciju otkucaja srca, amplitudu pulsa kao i pokrete tela. Kao posledica poremećaja sna javljaju se sekundarne

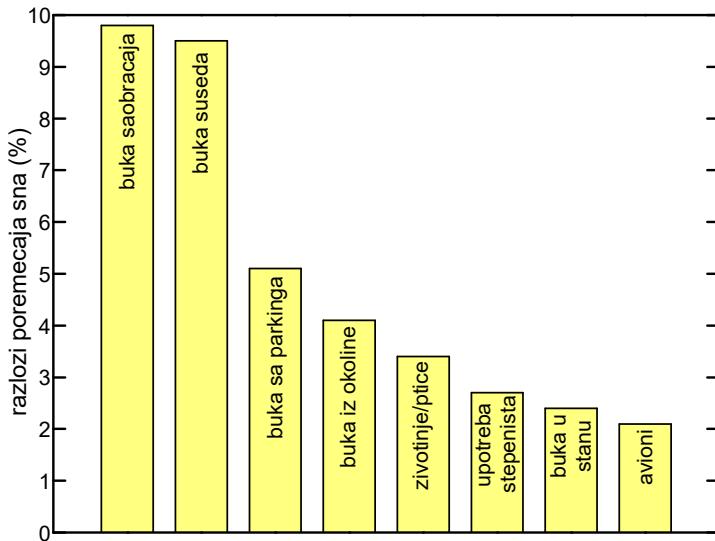
posledice u odvijanju dnevnih aktivnosti zbog smanjenja koncentracije. Najzad, nedostatak sna i/ili smanjen kvalitet sna izaziva prerano starenje organizma.

WHO je 1993. godine objavila dokument sa preporukama o zaštiti od buke. One su bazirane na brojnim istraživanjima u laboratorijskim i terenskim uslovima. Preporuke se odnose na utvrđivanje kriterijuma dozvoljenih nivoa buke u različitim okolnostima definisanim sa aspekta poremećaja sna, osećaja uznenirenosti i uslova u kojima govorna komunikacija postaje otežana. Jedan od kriterijuma koji su u ovom dokumentu predloženi, a koji treba da obezbede zaštitu od ozbiljnog uzneniranja, je da ekvivalentni nivo buke u čovekovom okruženju u toku dana ne prelazi vrednost 55 dBA. Da bi se većina populacije zaštitala od uzneniranja ekvivalentni nivo u toku dana ne treba da prelazi 50 dBA. Najzad, preporuka utvrđuje i da u toku noći ekvivalentni nivo u spoljašnjoj sredini ne treba da prelazi 45 dBA da bi se u prostorijama postigli preporučeni nivoi od 30 dBA pri otvorenim prozorima. Ovi kriterijumi su preuzimani i ugrađivani u nacionalnu regulativu koju donose države.



Slika 17.2 – Jeden rezultat istraživanja ugroženosti populacije bukom od saobraćaja (levo) i bukom iz komšiluka (desno)

Istraživanja sprovedena u nekoliko evropskih zemalja pokazala su da su najveći izvori buke, a to znači oni koji proizvode najveći stepen uzneniranja ljudi, saobraćaj i susedi iz komšiluka. Jedan rezultat takvog istraživanja prikazan je na slici 17.2 gde su pokazani procenti populacije koji se osećaju ugroženi ovim vrstama buke. Vidi se da je oko 50% analizirane populacije manje ili više ugroženo saobraćajem i komšijama. U Evropskoj uniji je oko 40% populacije tokom dana izloženo saobraćajnoj buci sa nivoima višim od 55 dBA, a oko 20% nivoima višim od 65 dBA. Istraživanja su pokazala da je više od 30% populacije tokom noći izloženo buci čiji nivo premašuje 55 dBA. Na slici 17.3 prikazan je rezultat jednog istraživanja glavnih uzroka poremećaja sna pod dejstvom buke tokom noći. Vidi se da je i u tom slučaju najveći uticaj saobraćaja i suseda.



Slika 17.3 – Jedan rezultat istraživanja razloga poremećaja sna bukom

17.2 Merenje nivoa buke

Proces zvučne zaštite u sredini u kojoj čovek boravi počinje i završava se kontrolom nivoa buke. Kontrola buke podrazumeva utvrđivanje stanja na način koji je relevantan za procenu ugroženosti ljudi, ali takođe i na način koji omogućava projektovanje intervencija da bi se nivo buke sveo u neke zadate granice. To u praksi znači merenje nivoa zvučnog pritiska i njegovog spektra u relevantnim tačkama da bi se utvrdilo postojeće stanje i procenio obim potrebnih intervencija na sanaciji.

Za to nužno je da postoji precizno definisan postupak kojim se stanje u zvučnom polju može kvantifikovati nekim numeričkim pokazateljima. Buka, kao i svaki drugi zvuk, predstavlja signal zvučnog pritiska određene dinamičke i vremenske strukture, pri čemu ta struktura može biti vrlo kompleksna. Naime, osnovne karakteristike buke kao signala su:

Jačina – koja za potrebe zvučne zaštite može biti iskazana preko nivoa zvuka L u zvučnom polju (na primer, nivo na poziciji sa koje se posmatra, nivo na nekoj poznatoj udaljenosti od izvora i slično) ili preko karakteristike izvora buke (zvučna snaga Lw).

Spektar – je značajan aspekt buke zbog toga što su sve potencijalne mere zvučne zaštite frekvencijski zavisne i različito deluju po frekvencijama. Poznavanje spektra buke daje mogućnost izbora adekvatnih i optimalnih rešenja zaštite koje maksimalno deluju upravo u oblasti frekvencija gde je njen spektralni nivo najkritičniji za slušaoce. Pored toga, zvukove sa diskretnim spektrom (tonove) čovek subjektivno doživljava na drugačiji način od buke koja ima stohastički karakter sa uniformno raspoređenom energijom po frekvencijama, pa je i zbog toga važno poznavati spektar buke.

Trajanje – je značajna karakteristika, jer vremenska dinamika buke utiče na njen subjektivni doživljaj. Na primer, pojava impulsnih zvukova čovek subjektivno doživljava na drugačiji način od buke monotonog karaktera.

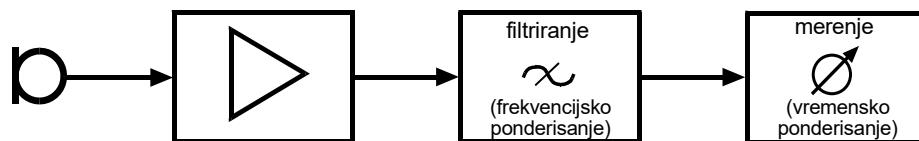
Zbog kompleksnosti prirode buke iskazivanje stanja takvog signala nekim numeričkim kvantifikatorima nije jednostavan i pravolinijski postupak. Za subjektivni doživljaj buke jednako su važni njeni jačina, spektar i trajanje. Međutim, iz praktičnih inženjerskih razloga mora postojati način da se stanje buke na neki način izražava nekom jednobrojnom parametrom kako bi se omogućilo poređenje različitih okolnosti i propisivanje granica dozvoljenog. Zbog toga je važno da odabrani jednobrojni parametar na neki način uključi sve tri karakteristike buke.

Osnovni jednobrojni pokazatelj kojom se kvantificuje ambijentalna buka je ekvivalentni nivo zvučnog pritiska L_{eq} . Ekvivalentni nivo se uvek definiše za neki zadati vremenski interval (t_1, t_2) i izračunava na sledeći način:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L(t)/10} dt \quad (17.1)$$

Vrednost ekvivalentnog nivoa se izražava u decibelima. Izraz (17.1) pokazuje da se ekvivalentni nivo dobija usrednjavanjem intenziteta zvuka u zadatom vremenskom intervalu, a to znači usrednjavanjem njegove energije. Taj vremenski interval se uobičajeno naziva vremenska konstanta merenja ili vremenska ponderacija. Zbog toga svaki podatak o izmerenoj ekvivalentnoj vrednosti nivoa buke mora da prati i podatak o primjenjenoj vremenskoj konstanti usrednjavanja da bi se dobijena vrednost mogla pravilno tumačiti.

Specifičnost merenja buke u odnosu na sve druge okolnosti merenja u zvučnom polju je u tome što numerički pokazatelj kojima se ona kvantificuje treba da budu na neki način korelisan i sa ljudskom percepcijom i doživljajem zvuka. To je uslov da bi se podaci dobijeni merenjem mogli koristiti za procenu stepena ugroženosti ljudi. Korelacija rezultata merenja sa subjektivnim doživljajem treba da u dovoljnoj meri postoji u okolnostima različitih spektralnih sadržaja i vremenskih promena signala. Jednostavan inženjerski način da se to postigne u prihvatljivoj meri je uvođenje adekvatnih vremenskih i frekvencijskih ponderacija u proceduru izračunavanja ekvivalentnog nivoa. Na slici 17.4 prikazana je opšta blok šema uređaja za merenje nivoa zvuka koji se uobičajeno naziva fonometar. Vidi se da signal iz mikrofona nakon prepojačavača prolazi kroz jedan filter pre nego što se dovede na sklop za merenje nivoa. Tim filtrom se realizuje frekvencijska ponderacija. Vremenska ponderacija, to jest usrednjavanje, realizuje se u delu uređaja gde se vrši merenje efektivne vrednosti.



Slika 17.4 – Blok-šema merača nivoa zvuka (fonometar)

Vremenska ponderacija podrazumeva izbor vremenske konstante merenja efektivne vrednosti, to jest intervala u kome se vrši usrednjavanje, koje je prilagođeno prirodi signala buke. Vremenom su uvedene standardizovane vrednosti vremenskih konstanti

usrednjavanja koje se primenjuju pri merenju ekvivalentnog nivoa buke. To su 125 ms (označena kao *fast*) i 1 s (označena kao *slow*). Kada buka sadrži impulsne pojave koristi se i kraća vremenska konstanta 10 ms. Vremenska ponderacija *fast* se u oznaci nivoa označava slovom *F*, a za *slow* se korist *S*. Tako se formiraju oznake kao što je na primer $L_{S,eq}$, koja označava da je taj ekvivalentni nivo buke dobijen primenom *slow* vremenske ponderacije.

U merenjima koja se vrše da bi se dobila globalna ocena stanja buke na nekoj lokaciji ili u prostoriji koriste se vremenske konstante čije je trajanje 15 minuta, pa čak i 24 sata. Po potrebi mogu se koristiti i drugi intervali usrednjavanja prilagođeni konkretnim okolnostima. Tako se, na primer, za ocenu stanja buke u urbanoj sredini koristi usrednjavanje u toku dana, večeri i noći. U svakoj državi podela dana na ove periode regulisana je određenim pravilnikom ili zakonom. Tako je u Srbiji određeno da period dana traje od od 06 do 18 časova, i ekvivalentni nivo izmeren usrednjavanjem u tom intervalu označava se sa L_{day} . Period večeri je od 18 do 22 časa i merenje nivoa u tom intervalu daje podatak o $L_{evening}$. Period noći traje u preostalom intervalu od 22 časa do 06 časova ujutru. Ekvivalentna vrednost nivoa buke u tom periodu označava se sa L_{night} .

U iskazivanju globalnog stanja buke na nekoj lokaciji tokom dana koriste se dodatne korekcije nivoa buke zbog različitih okolnosti njene percepcije, a sa idejom da se dobijena numerička vrednost prilagodila subjektivnoj percepciji i karakteru signala. Tako je normama za merenje buke definisan dvadesetčetvoročasovni ekvivalentni nivo zvučnog pritiska kao:

$$L_{den} = 10 \log_{10} \left[\frac{d}{24} 10^{(L_d + K_d)/10} + \frac{e}{24} 10^{(L_e + K_e)/10} + \frac{n}{24} 10^{(L_n + K_n)/10} \right] \quad (17.2)$$

gde su d , e i n vremenska trajanja dana, večeri i noći u satima, respektivno. Očigledno je da su ta trajanja $d = 12$ sati, $e = 4$ sata i $n = 8$ sati ($d+e+n = 24$).

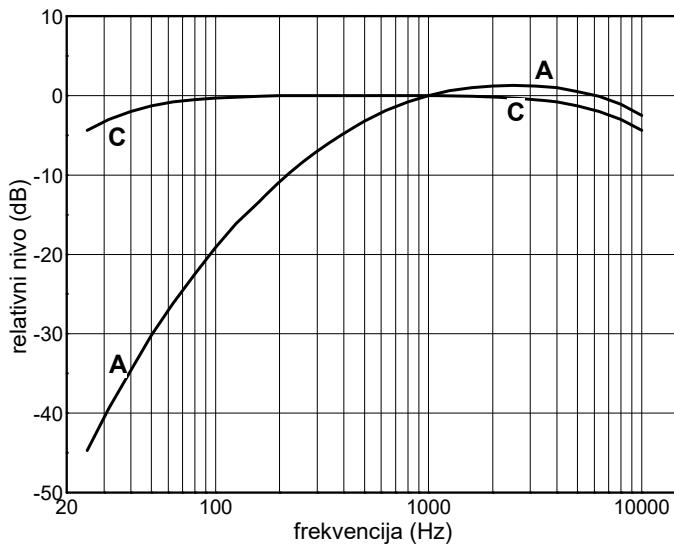
Uticaj različite percepcije buke na čoveka tokom dana uključen je korekcionim faktorima K_d , K_e i K_n . To su korekcionni faktori za dan, veče i noć, respektivno, i oni se uvode radi usaglašavanja vrednosti nivoa buke sa osetljivošću ljudi na buku tokom različitih delova dana. Prema jednoj evropskoj direktivi definisane su vrednosti $K_d = 0$ dB, $K_e = 5$ dB i $K_n = 10$ dB. To proizilazi iz činjenice da postoji veća osetljivost stanovništa na buku tokom večeri i noći u odnosu na period dana. Ovakvo definisana vrednost L_{den} korelisana je sa procentom stanovništva za koji se očekuje da će biti ugrožen bukom kojoj je izložen.

Pored standardno korišćenog ekvivalentnog nivoa zvučnog pritiska L_{eq} sa različitom vremenskom ponderacijom, za opisivanje buke se koriste i dodatni statistički deskriptori nivoa, takozvani kvantili. To su vrednosti nivoa buke koje su premašene u N procenata ukupnog vremena trajanja. Označavaju se sa L_N , gde se kao N najčešće koristi 1, 5, 10, 50, 90, 95 ili 99. Na primer, L_1 označava vrednost koju nivo buke premašuje u 1% vremena unutar posmatranog vremenskog intervala, L_{90} vrednost koja je premašena u 90% vremena itd.

Frekvencijska ponderacija nivoa buke ima zadatak da spektralnu raspodelu snage signala svede na jednobrojnu vrednost. To se postiže tako što se pre izračunavanja ekvivalentnog nivoa zvučnog pritiska vrši frekvencijska korekcija signala uz pomoć posebno definisanog filtra. Smisao ovog filtriranja je da se dobije podatak o vrednosti nivoa buke koji je u izvesnoj meri korelisan sa subjektivnim doživljajem jačine zvuka. To znači da se karakteristikom filtra na izvestan način aproksimira frekvencijska nelinearnost osetljivosti čula sluha koju pokazuje dijagram izofonskih krivih prikazan na slici 9.39. Naime, izofonske krive pokazuju da je pri istom intenzitetu zvučne pobude subjektivni doživljaj zvuka na niskim frekvencijama slabiji od doživljaja na srednjim frekvencijama. Kada bi se pri izračunavanju ekvivalentnog nivoa zvuka energija sabirala linearno po svim frekvencijama dobile bi se vrednosti koje nisu korelisane sa subjektivnim doživljajem. Na primer, sa izofonskih krivih se može videti da je zvuk frekvencije 20 Hz i nivoa oko 70 dB za slušaoca jedva čujan. To nije u skladu sa podatkom o 70 dB koji bi se dobio merenjem, jer na srednjim frekvencijama nivo 70 dB subjektivno se doživljava kao relativno jak zvuk.

Problem sa uvođenjem filtra za frekvencijsku ponderaciju je u tome što izofonske krive pokazuju da frekvencijska nelinearnost osetljivosti čula sluha nije konstantna, već je funkcija apsolutne vrednosti nivoa zvuka. Sa dijagrama izofonskih krivih se vidi da se krive koje odgovaraju različitim nivoima zvuka razlikuju međusobno. Generalno se može reći da se povećanjem nivoa zvuka razlika u osetljivosti čula sluha po frekvencijama smanjuje. Najveća frekvencijska nelinearnost odziva je pri nivoima bliskim pragu čujnosti. U rešavanju frekvencijske ponderacije inženjerski pristup je bio da se uvede jedan filter koji će u dovoljnoj meri da aproksimira tok izofonskih krivih, a bez pretenzija da tačno oponašaju promene sa nivoom. Preciznija simulacija rada čula sluha bi vodila u veoma komplikovana rešenja koja u svakodnevnoj praksi merenja buke ne bi imala opravданja.

Danas se za frekvencijsku ponderaciju pri merenju nivoa buke najšire koristi filter čija je frekvencijska karakteristika prikazana na slici 17.5. To je takozvani „A“ filter. Njegova karakteristika je dobijena aproksimacijom oblika izofonske krive za 40 fona, koja je malo pojednostavljena da bi bila izvodljiva pasivnim analognim kolima. Pošto je izvedena iz izofonske krive za 40 fona takva frekvencijska ponderacija pogodna je za merenje nivoa koji se kreću u rasponu 30-60 dB. Zbog pojednostavljenja oblika karakteristike u odnosu na oblik izofonskih krivih i zbog promenljivosti osetljivosti čula sluha po nivoima ovakva ponderacija nije uvek merodavan pokazatelj subjektivnog doživljaja. Takav slučaj je na primer kada se zvuk sastoji od više prostih tonova. Zbog toga dva zvuka istog nivoa izmerena A ponderacijom mogu imati različiti efekat na osećaj ugroženosti bukom. Međutim, frekvencijska ponderacija A filterom je jednostavan metod, pa njegova korisnost prevazilazi sve moguće nesavršenosti.



Slika 17.5 – Karakteristike standradnih filtrova koji se koriste za frekvencijsku ponderaciju pri merenju buke

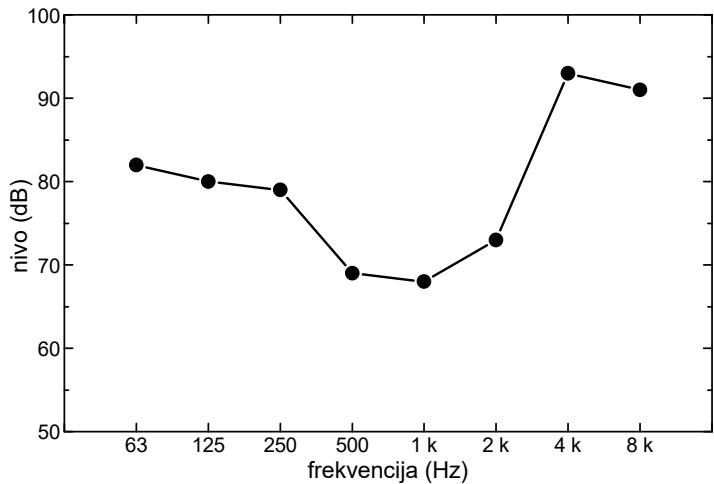
Za propisivanje dozvoljenih nivoa buke u raznim okolnostima i za iskazivanje rezultata njenog merenja najšire se koristi frekvencijsko ponderisanje A karakteristikom. U zakonskoj regulativi koja se odnosi na dozvoljene nivoe buke praktično svi zahtevi se zadaju u dBA.

Druga korišćena karakteristika filtra za frekvencijski ponderaciju je takozvani „C“ filter, čija je karakteristika izvedena iz izofonske krive za 90 fona. Za glasnije zvukove C filter je pogodniji od A filtra. Po nekada se u merenjima koristi i potpuno linearna karakteristika, što znači bez filtra, i ona se označava kao „Z“ ponderacija. Tokom istorije razvoja merne tehnike korišćen je još jedan tip filtra označen sa „B“. Njegova amplitudska karakteristika je između A i C filtra. Takođe se poneka koristi i „D“ filter koji se primenjuje za neka merenja pri ocenjivanju ugroženosti ljudi avionskom bukom.

Kada se u fonometru koristi frekvencijska ponderacija signala, onda se pri iskazivanju izmerenih vrednosti u dB dodaje oznaka koja definiše vrstu primenjene ponderacije. Tako izmerena vrednosti nivoa zvuka za signal koji je propušten kroz A filter dobija oznaku dBA ili dB(A). Analogno tome, rezultat merenja nivoa buke sa ponderacijom C filtrom označava se sa dBC ili dB(C). Oznaka za ekvivalentni nivo buke dobija dodatak A u indeksu, pa postaje $L_{A,eq}$.

Frekvencijskom ponderacijom A filtrom karakteristika percepције zvuka se uključuje u normiranje buke na jedan pojednostavljen način, pa postoje okolnosti kada takav pristup nije dovoljno precizan, a ni dovoljno informativan. Naime, takva jednobrojna vrednost ne daje indikaciju o frekvencijskom sadržaju kompleksnih zvukova. Zbog toga se takav pristup ne može koristiti za klasifikaciju i identifikaciju izvora buke, ali takođe ne može biti polazna osnova za projektovanje mera zvučne zaštite, jer je dejstvo svih realnih fizičkih intervencija frekvencijski zavisno.

Za detaljnije izražavanje stanja buke koriste se oktavni spektri. Jedan primer oktavnog spektra prikazan je na slici 17.6. To je spektar neke buke u kome se vidi da na niskim frekvencijama postoji izvestan porast nivoa zvuka, što se doživljava kao „tutnjava“, i izraženi nivoi na višim frekvencijama što je karakteristično za komponentu buke koja se doživljava kao šuštanje. Spektar buke je važan indikator njenog realnog sadržaja jer se samo polazeći od njega mogu razmatrati potencijalne intervencije na smanjenju ugroženosti. Zbog toga je prvi korak u svakoj sanaciji buke analiza njenog spektra da bi se utvrdilo u kom opsegu frekvencija se javlja najveća energija. U praksi sanacije buke uobičajeno se posmatraju oktavni spektri, a mere koje se preduzimaju prilagođavaju se njenom spektralnom sadržaju.



Slika 17.6 – Jeden primer
oktavnog spektra neke buke

Sabiranjem svih oktavnih nivoa dobija se ukupni nivo zvuka bez frekvencijskog ponderisanja, što znači linearno. To je u slučaju buke sa slike 17.6:

$$L = 10 \log \sum_{i=1}^8 10^{L_i/10} \quad (17.3)$$

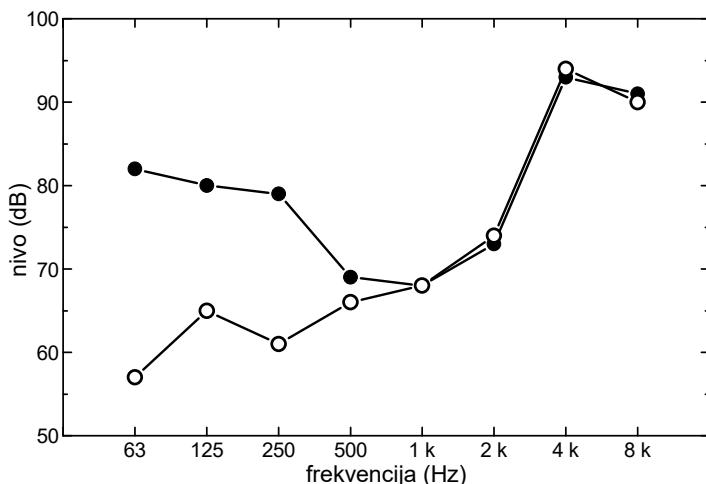
gde je L ukupni nivo buke, i redni broj oktave i L_i nivo buke u i -toj oktavi. U nekim okolnostima u analizi buke posmatra se i oktava na 31,5 Hz, što znači ukupno 9 oktava. U oblasti zaštite od buke ne razmatra se stanje iznad 8 kHz iz dva razloga. Prvi je da realni izvori buke u životnom okruženju ne generišu značajniju zvučnu snagu na tako visokim frekvencijama, a drugi da na tim frekvencijama postoje velika slabljenja usled dissipacije u vazduhu i na svim vrstama prepreka, pa se potreba za smanjenjem na vrlo visokim frekvencijama javlja izuzetno retko.

Na osnovu poznatog oktavnog spektra neke buke može se izračunati vrednost njenog ukupnog nivoa u dBA. Za to je potrebno poznavati korekciju koju unosi A filter u svim posmatrаниm oktavama, a koja se očitava sa A krive na slici 17.5. Ove korekcije su prikazane u Tabeli 17.1. Da bi se dobila vrednost nivoa buke u dBA potrebno je spektar posmatrane buke korigovati A filtrom. Kao ilustracija uzet je spektar sa slike 17.6 i korigovan A filtrom, što praktično znači da je u svakoj oktavi vrednosti nivoa zvuka

korigovana vrednošću iz Tabele 17.1. Na slici 17.7 grafički je prikazan rezultat takve korekcije. Sabiranjem svih korigovanih oktavnih vrednosti nivoa pomoću formule (17.3) dobija se ukupni nivo buke u dBA.

Tabela 17.1 – Korekcije A filtra po oktavama

frekvencija	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
korekcija A filtra	-25 dB	-15 dB	-8 dB	-3 dB	0 dB	+1 dB	+1 dB	-1 dB

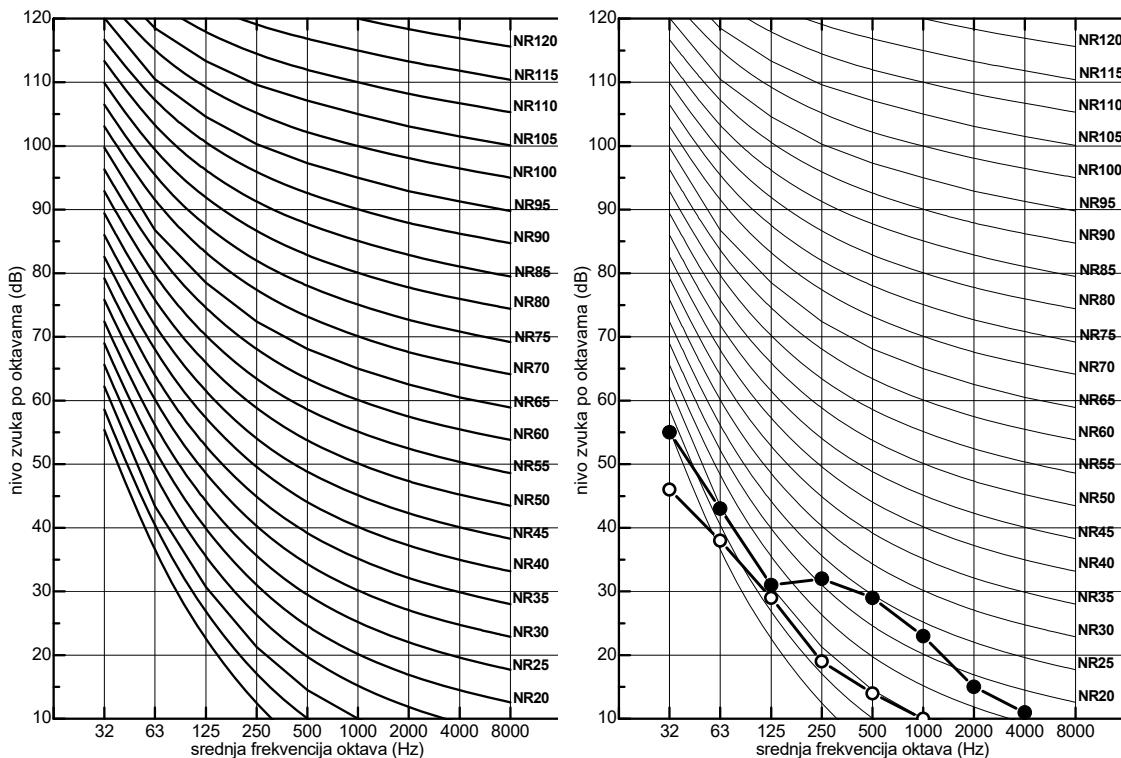


Slika 17.7 – Primer korekcije spektra buke: spektar buke sa slike 17.6 (pone tačke) i isti spektar korigovan A filtrom (kružići)

Prikazivanje stanja buke oktavnim spektrom daje o njenoj prirodi više informacija bitnih za inženjerske intervencije od jednobrojne vrednosti u dBA. Ipak, ostaje činjenica da je izražavanje stanja jednim brojem korisno zbog jednostavnosti takve ocene i mogućnosti lakog poređenja stanja buke u različitim okolnostima (na primer pre i posle preduzete sanacije). U tome je značajna i činjenica da je propisivanje graničnih vrednosti dopuštenog nivoa buke u različitim okolnostima moguće samo sa jednobrojnim vrednostima, i one se definišu u raznim pravilnicima. Da bi se na neki način kombinovala informativnost spektralne predstave buke i praktičnost jednobrojnog izražavanja njenog stanja uvedena je metoda kojom se oblik oktavnog spektra opisuje jednim brojem. To je postignuto uvođenjem skupa posebno definisanih standardnih krivih koje se nazivaju NR krive (*Noise Rating Curves*). One su utvrđene međunarodnim standardom i prikazane su na slici 17.8. Svaka od krivih se označava slovima NR i brojčanom vrednošću koju ima na frekvenciji 1000 Hz (na primer NR30, NR60, itd). Standardom su definisane krive od NR0 do NR130 u skokovima po 5. Na dijagramu sa slike 17.8 dve najviše krive nisu prikazane.

I u ovakvom načinu izražavanja stanja buke uključena je nelinarnost odziva čula sluha, jer NR krive na pojednostavljen način slede oblik izofonskih linija i monotono rastu ka nižim frekvencijama. To se jasno vidi poredeći sliku 17.8 sa dijogramom izofonskih linija sa slike 9.39. Zahvaljujući tome ovakav način normiranja spektra podrazumeva da će stanje definisano NR krivama biti na neki način korelisano sa subjektivnih doživljajem jačine zvuka. To dalje znači da spektralni nivo neke buke na niskim frekvencijama može biti značajno viši nego na srednjim i visokim frekvencijama, a da ocena stanja bude

prihvatljiva za ambijent u kome čovek boravi. Kao ilustracija te činjenice na desnom delu slike 17.8 prikazan je jedan takav primer gde su u dijagramu NR krivih ucrtana dva oktavna spektra neke buke. Za prvi spektar ucrtan punim kružićima konstatiše se da zadovoljava kriterijum NR25, jer se njegov nivo u oktavi na 500 Hz sa donje strane približava krivoj NR25. Vidi se da istovremeno u spektru dominira vrednost nivoa u oktavi na 63 Hz koja je čak 25 dB viša od nivoa u oktavi na 500Hz. Međutim, zbog karakteristike osetljivosti čula sluha ovaj niži deo spekta ne određuje subjektivni doživljaj jačine zvuka, već vrednosti u oktavama od 250 Hz do 1000Hz. Kao jednobrojna vrednost koja opisuje ucrtani spektar usvaja se prva kriva koja se nalazi iznad svih ucrtanih vrednosti, što je u ovom slučaju NR25, pa se kaže da buka zadovolja kriterijum NR25.



Slika 17.8 – NR krive (levo) i ucrtana dva oktavna spektra neke buke (desno)

Sličan slučaj prikazuje druga kriva sa slike 17.8 označena šupljim kružićima. Ona na 1000 Hz dodiruje krivu NR10, dok su sve ostale vrednosti ispod te krive. Zbog toga se zaključuje da ta buka zadovoljava kriterijum NR10, iako je u oktavi na 32 Hz nivo čak 35 dB viši od nivoa u oktavi na 1000 Hz. Međutim, ta vrednost je ispod granice čujnosti i nema značaja za subjektivni doživljaj jačine zvuka. Prema tome, u oba slučaja u najnižim oktavnim opsezima izmereni nivoi su relativno visoki, ali za subjektivni doživljaj jačine tog zvuka to nije od značaja s obzirom na smanjenje osetljivosti čula na niskim frekvencijama.

NR krive služe za normiranje oktavnog spektra buke, jer se kriterijum za maksimalno dopušteni nivo buke u nekom prostoru može zadati izborom jedne krive iz NR familije i uslovom da oktavni spektar buke ne sme da je premaši ni u jednoj oktavi. Dijagram NR

krivih se takođe uobičajeno koristi za prikazivanje rezultata merenja buke, kao što je to prikazano na slici 17.8.

Treba napomenuti da se još od pedesetih godina dvadesetog veka u anglosakonskim zemljama za svođenje oktavnog spektra buke na jednobrojnu vrednost koristi nešto drugačija familija krivih koje su označene kao NC (*Noise Criteria Curves*). Njihov globalni oblik je principijelno isti, što znači monotono rastući ka nižim frekvencijama, ali se u izvesnoj maloj meri razlikuju od prikazanih NR krivih sa slike 17.8. U praktičnom inženjerskom radu uobičajeno se uzima da su ova dva pristupa jednaka i da se vrednosti izražene u NC mogu zameniti sa vrednostima NR.

Između vrednost izražene u dBA i preko NR kriterijuma postoji izvesna veza. Ona se ne može generalno definisati, ali se najčešće uzima aproksimativno da spektru buke zadatom nekom vrednošću NR odgovara vrednost u dBA koja je za 5 dB veća. Na primer spektru buke NR30 odgovara približno vrednost nivoa od 35 dBA.

17.3 Akustički komfor

Za opisivanje stanja zvučnog polja u prostorijama sa aspekta ugodnosti percepcije raznih zvukova uveden je pojam „akustički komfor“. On je definisan međunarodim standardom zajedno sa drugim vrstama komfora koji se prepoznaju u zgradama: topotnim i vazdušnim. U tom standardu utvrđene su tri kategorije zahteva koje ljudi mogu imati u odnosu na zvukove u zgradama i koji određuju akustički komfor. To su:

- da se obezbedi dovoljno nizak nivo buke (zaštita od buke),
- da se spreči preslušavanje između prostorija (zaštita privatnosti),
- da se obezbedi zadovoljavajući kvalitet željenih zvukova.

Prvi zahtev, zaštita od buke, podrazumeva da je za postizanje akustičkog komfora potrebno sprečiti ometanja ljudi zvukom koji potiče od zvučnih izvora u okruženju. Postiže se dovoljno velikim slabljenjem zvuka na putanjama ka unutrašnjosti boravišnih prostorija. Drugi zahtev, zaštita privatnosti, podrazumeva obezbeđenje uslova da se čovekove aktivnosti ne čuju u okruženju. U fizičkom smislu to čini jedinstven problem sa zaštitom od buke, jer se oba zahteva postižu dovoljno velikim slabljenjem na putanjama prolaska zvuka. Može se reći da su zaštita od buke i zaštita privatnosti „dva smera iste ulice“ jer se posmatra prostiranje zvuka istim putanjama, ali u različitim smerovima: iz okruženja ka boravišnoj prostoriji i iz prostorije ka okruženju. Treći zahtev, obezbeđenje adekvatnog kvaliteta željenih zvukova, u prvom redu se odnosi na postizanje dovoljno dobre razumljivosti govora i muzike. To se u praksi realizuje adekvatnom strukturu impulsnog odziva prostora.

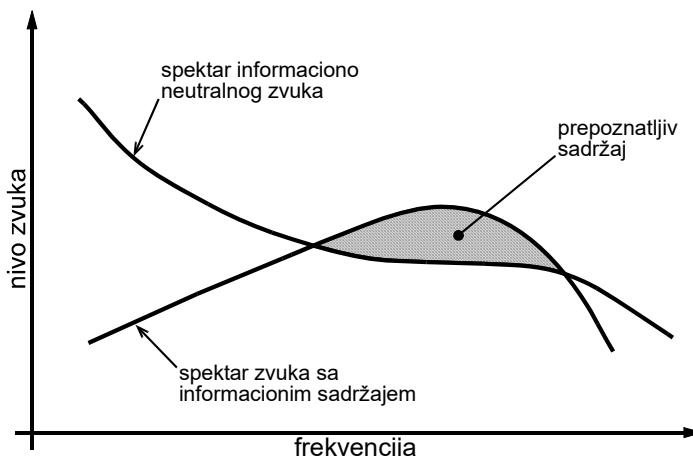
Definicija akustičkog komfora pokazuje da on u svojoj suštini sadrži dva aspekta: jedan se odnosi na akustiku prostorija, a drugi na zvučnu zaštitu. Tek postizanjem odgovarajućeg kvaliteta u ta dva domena postiže se kompletan akustički komfor. U oblasti akustike prostorija zvuk se posmatra sa stanovišta njegovog informacionog

sadržaja i teži se postizanju odgovarajućeg kvaliteta prenosa zvučnih informacija do slušaoca, a u nekim okolnostima razmatra se i odgovarajuća estetika zvučne slike. Ocena tog kvaliteta bazira se na subjektivnim stavovima slušalaca koji se preslikavaju na razne objektivne numeričke parametre izračunate iz strukture impulsnog odziva prostorije.

U oblasti zvučne zaštite zvuk, odnosno buka, vrednuje se energetskim nivoom zvučnog polja, a to znači efektivnom vrednošću zvučnog pritiska koji se meri fonometrom. Iako buka po definiciji podrazumeva pojavu ometanja i uzneniranja, u kriterijumuma zaštite od buke njen informacioni sadržaj najčešće se ne analizira. Međutim, postoje okolnosti kada ona po svojoj prirodi sadrži izvesne prepoznatljive zvučne informacije. Takav je slučaj kada buku čine govor ili muzika. Zvukovi sa prepoznatljivim informacionim sadržajem pri istom nivou zvučnog pritiska, to jest sa istom efektivnom vrednošću, mogu kod ljudi izazivati veće ometanje nego neutralni stacionarni zvukovi koje različiti uređaji proizvode u svom radu (npr. motori, ventilator i slično). To pokazuje da kompleksnost informacionog sadržaja zvukova i mehanizma njihove percepcije otežavaju opisivanje stanja buke samo jednim brojem. Takva pojava predstavlja važnu temu u projektovanju zvučne zaštite kada se definišu fizičke mere kojim treba obezbediti akustički komfor.

Različiti efekti buke na čoveka kada ona sadrži, ili ne sadrži zvučne informacije utiču na određivanje prihvatljivog nivoa ambijentalne buke. U opštem slučaju bitna karakteristika ambijentalne buke je odsustvo primetnog informacionog sadržaja. Takva buka nastaje superponiranjem mnoštva nezavisnih, nekoherentnih zvukova. Najbolji primer za to je saobraćajna buka koja je rezultat superponiranja zvukova brojnih vozila u širokom krugu oko mesta slušanja, i u kojoj se uglavnom ne prepozna ni jedan zvuk nekog konkretnog vozila (osim ako se slušalac nalazi dovoljno blizu nekom od njih). Bez informacionog sadržaja su i svi zvukovi koje stvaraju razni ventilatori i motori, koji često imaju prirodu blisku belom šumu.

Buka bez informacionog sadržaja svojim prisustvom određuje šta se u datim okolnostima može registrovati čulom sluha, a šta ne. Zvuk koji svojom energijom padne ispod nivoa ambijentalne buke postaje za slušaoca nečujan. Ovo je simbolički ilustrovano na slici 17.9. Prepostavljeno je postojanje neke buke bez informacionog sadržaja predstavljene spektrom. Prepoznatljiv sadržaj nekog zvuka koji slušalac želi čuti biće samo ono što u spektralnom domenu „iskače“ iznad postojeće buke (šrafirana zona). Sve druge komponente željenog zvuka ne mogu se prepoznati čulom sluha jer su maskirane, a to znači pokrivenе jačim zvukom postojeće buke. U okolnostima kada je neophodno omogućiti slušaocima da čuju neke tihe zvukove moraju se stvoriti uslove u kojima će ambijentalna buka u spektralnom domenu, kao na slici 17.8, biti dovoljno ispod očekivanih zvukova. Takav slučaj je u koncertnim salama gde je potreba dobra čujnost čak i kada samo jedan instrument na bini svira pianisimo.



Slika 17.9 – Ilustracija uticaja ambijentalne buke na čujnost zvukova iz okruženja

Različiti nivoi buke omogućavaju, ili neomogućavaju kvalitetan prijem korisnih zvukova. Uticaj neutralne buke u okruženju na govornu komunikaciju među ljudima iskazuje se procenama moguće čujnosti govora. U Tabeli 17.2 prikazana je procena posledica prisustva buke u okruženju slušaoca na mogućnost govorne komunikacije pri različitim vrednostima nivoa prisutne buke. Najniža prikazana vrednost nivoa buke u tabeli je realno očekivano stanje tihog ambijenta u životnoj sredini. Pri tom nivou buke moguća je dobra razumljivost govora i na većim rastojanjima, ali takvi ambijenti se teško ostvaruju. Niže nivoe ambijentalne buke u zgradama je moguće postići samo uz ozbiljne mere zvučne izolacije, i pri tome u sredini gde nema intenzivnih ljudskih aktivnosti. Sa porastom nivoa buke smanjuje se rastojanje od govornika na kome se može dobro razumeti govor.

Tabela 17.2 – Procena mogućnosti govorne komunikacije pri različitim nivoima ambijentalne buke

nivo buke u dBA	Opis posledica prisustva buke
30-35	vrlo miran ambijent; mogući sastanci do 50 osoba
35-40	miran ambijent; govor se dobro razume i do 10 m rastojanja odgovornika, mogući sastanci do 20 osoba
40-45	govor se dobro razume do 4m rastojanja od govornika
50-55	spontano pojačan govor, dobro se razume do 2 m rastojanja od govornika
60-65	moguć razgovor samo 2-3 osobe u neposrednoj blizini

Postoje okolnosti kada se zvuk koji ima prepoznatljiv informacioni sadržaj, kao što su govor i muzika, može okarakterisati kao buka jer je nekom slušaocu neželjen i ometa ga u radu ili snu. To na primer znači da je ometajuće slušati nečiji govor iz okruženja jer može otežati koncentraciju. U takvim okolnostima prisustvo nekog informaciono neutralnog zvuka, to jest buke, može da pomogne u postizanju akustičkog komfora tako što će maskirati zvuk koji svojim prepoznatljivim sadržajem ometa. Na tome se zasniva jedna uža inženjerska oblast koja se uobičajeno naziva zaštita privatnosti, jer se

maskiranje neutralnim zvukom može realizovati posebnim audio sistemom za ozvučavanje.

Zakonska regulativa u oblasti zaštite od buke

Ozbiljnost problema buke i njenog uticaja na čoveka učinila je da ta oblast na jedan kompleksan način bude zakonski regulisana. U svakoj državi postoji niz dokumenata – standarda, normi i pravilnika – koji regulišu tu oblast. U njima su:

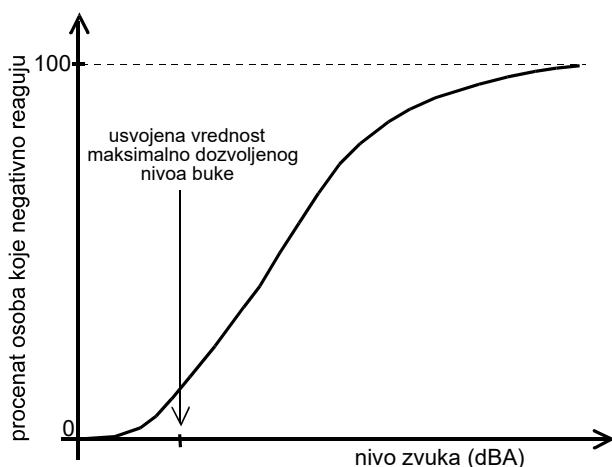
5. definisani numerički kvantifikatori stanja buke i zvučne izolacije, to jest fizičke veličine kojim se izražava stanje buke i zvučne izolacije,
6. propisane granične vrednosti tih kvantifikatora u različitim životnim okolnostima,
7. definisani postupci proračuna numeričkih kvantifikatora da bi se omogućila predikcija stanja buke,
8. definisani postupci merenja stanja buke i ostvarene zvučne izolacije.

Sve ono što predstavlja tehnički aspekt ove teme, a to su definicije numeričkih kvantifikatora, postupci proračuna i procedure merenja, usvojeni su na međunarodnom nivou izvesnim skupom standarda. To su u najvećoj meri takozvani „ISO standardi“ koje donosi međunarodna organizacija čiji je naziv „International Organization for Standardization- ISO“. Svaka država pojedinačno preuzima njihove standarde u svoju nacionalnu regulativu, čime se postiže ujednačenost u načinu opisivanja stanja buke i jednak pristup njenom merenju. Postoje procedure kojim se porede postupci merenja u različitim laboratorijama da bi se rezultati merenja istih veličina koja obavljaju različite ekipe što više ujednačili. Međunarodna organizacija ISO permanentno usavršava i dopunjava standarde u skladu sa novim stručnim saznanjima.

Međutim, opšte razlike među društvima, njihovim finansijskim mogućnostima, navikama, običajima i strategijama razvoja, ukratko realnost života u njima, uslovile su da zahtevane vrednosti numeričkih kvantifikatora svih vrsta definiše svaka država za sebe. To znači da su dopuštene vrednosti nivoa buke i minimalni zahtevi zvučne izolacije prepuštani svakoj državi da propisuje u skladu sa lokalnim potrebama, mogućnostima, navikama ljudi i slično. To je vremenom neumitno dovelo do izvesnog šarenila među državama u tome šta je dopušteni nivo buke na raznim mestima i u raznim okolnostima, kolika je zahtevana zvučna izolacija u zgradama i slično. Drugim rečima, ne postoje međunarodno propisani zahtevi u tom domenu.

U svemu tome zanimljivo je da se postupak izbora graničnih vrednosti dovoljenih nivoa buke zasniva na jednoj prirodnoj zakonitosti koja se u literaturi naziva „akustička dilema“. Ona je ilustrovana dijagramom na slici 17.10. Kriva sa slike načelno predstavlja rezultat subjektivnih ispitivanja dejstva buke kakva se sprovode u različitim sredinama. U ispitivanjima se analizira veza između nivoa buke u životnoj sredini i procenta populacije koji negativno reaguje na tu buku. Dijagram pokazuje da će pri bilo kom nivou buke postojati izvestan procenat ljudi koji smatraju da ih buka ometa i uznemirava.

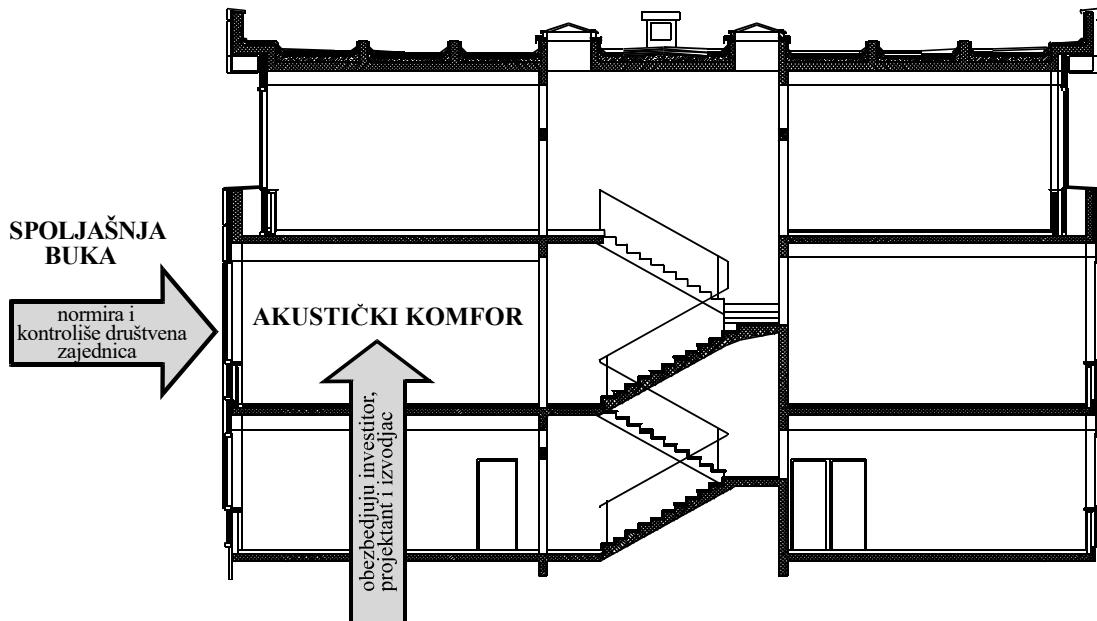
Naravno, što je nivo buke viši, veći je i procenat populacije koji oseća njene posledice. Ovo je na izvestan način nagovorešeno u rezultatima ispitivanja sa slike 17.2. Kada se usvajaju vrednosti dopuštenih nivoa buke polazi se od prethodno zauzetog stava koliki procenat populacije sa osećajem ugroženosti tom bukom može biti prihvatljiv u datim okolnostima. Naziv „akustička dilema“ proizišao je iz činjenice da nije jednostavno odrediti koliki procenat ugrožene populacije je „prihvatljiv“. Na osnovu usvojene vrednosti prihvatljivog procenta sa jedne takve krive može se očitati koliki nivo buke to obezbeđuje.



Slika 17.10 – Dijagram koji principijelno ilustruje „akustičku dilemu“

Ovaj prikaz „akustičke dileme“ uzgred pokazuje da je stanje buke u životnoj sredini pri kome se niko neće osećati ugroženim moguće postići tek pri vrlo niskim nivoima. Dostizanje takvih okolnosti u najvećem broju realnih slučajeva može se smatrati nedostiznim, jer zahteva velike investicije u zaštitu i prevenciju, a često nije ni moguće iz raznih tehničkih razloga. S druge strane, ekstremno niski nivoi buke mogu otvoriti neke nove probleme, jer tada počinju da se čuju neki zvukovi koji su u drugim okolnostima neprimetni. Otuda zvučna izolacija nema za cilj postizanje „nultog“ nivoa buke, već onog koji u dovoljno velikom procentu ne izaziva uzinemiravanje ljudi.

U realizaciji mera zaštite od buke, a to znači u zakonskoj i drugoj regulativi kojom se to postiže, postoje dva osnovna aspekta. Oni su ilustrovani na slici 17.11. Prvi aspekt je zaštita od buke u spoljašnjoj sredini. Ona iz okruženja „napada“ fasade zgrada i tako dospeva u unutrašnjost prostorija u kojima čovek boravi. Jasno je da ta buka takođe deluje na ljude kada se nalaze van zgrada. Ipak, njihov boravak i spoljašnjoj sredini je relativno kratak, osim u zonama namenjenim rekreaciji, pa je problem buke u spoljašnjoj sredini u tehničkom smislu prevashodno pitanje zvučne energije koja ulazi u prostorije zgrada, kroz otvorene ili zatvorene prozore. Drugi aspekt zaštite od buke odnosi se na unutrašnjost zgrada u kojima je zadatak da se obezbedi adekvatan akustički komfor za ljude koji tu borave, kao što je označeno na slici 17.11. To se postiže raznim merama građevinske akustike, zajedno sa akustičkim dizajnom prostorija.



Slika 17.11 – Ilustracija dva aspekta u sprovođenju zaštite od buke u životnoj sredini da bi se obezbedio akustički komfor: buka u spoljašnjoj sredini i buka u prostorijama unutar zgrada

Za zaštitu od buke u spoljašnjoj sredini odgovorna je takozvana „društvena zajednica“, a to su pre svega država, a onda i manje društvene celine (gradovi, opštine). Oni propisuju maksimalno dopuštene vrednosti nivoa buke u različitim zonama naselja. Te vrednosti se utvrđuju kroz podelu teritorije naselja na takozvane akustičke zone. One se određuju prema nameni teritorije, a to znači prema osetljivosti njenog sadržaja na ugrožavanje bukom i realnim prisustvom izvora buke (saobraćaj, industrija i slično). Za svaku takvu zonu propisan je neki maksimalno dozvoljeni nivo buke u spoljašnjoj sredini.

Kao ilustracija, u Tabeli 17.3 prikazane su definicije akustičkih zona koje se koriste u Srbiji i maksimalno dopuštene vrednosti ekvivalentnog nivoa buke u njima. Definicije zona i propisane dopuštene vrednosti nivoa buke u njima razlike su u raznim državama. Za poštovanje propisanih vrednosti nivoa buke u spoljašnjoj sredini društvena zajednica ima mehanizme kao što su inspekcijske službe, komunalna policija i akreditovane firme koje vrše merenje nivoa buke.

Drugi aspekt zakonske regulative o zaštiti od buke odnosi se na unutrašnjost zgrada i obuhvata sve što je potrebno za obezbeđenje akustičkog komfora u njima. Za ostvarenje tog zadatka odgovorni su svi učesnici u izgradnji zgrade: investitor, projektanti i graditelji. U tom domenu propisane su neke minimalne granične vrednosti zvučne izolacije između prostorija određenih namena i maksimalno dopušteni nivoi buke u prostorijama. Kao ilustracija, u tabeli 17.4 prikazane su preporučene maksimalne vrednosti nivoa buke za koje se smatra da obezbeđuju uslove akustičkog komfora u datim prostorima. Te vrednosti predstavljaju polazne osnove pri projektovanju zgrada. U svemu tome najvažniji je stav vlasnika zgrade da želi u njoj postići odgovarajući nivo akustičkog komfora. Na tržištu zgrada i prostora u njima (stanova, kancelarija) i kupac

može postaviti pitanje u kojoj meri je obezbeđen akustički komfor i u tom domenu definisati kvalitet onoga što traži.

Tabela 17.3 – Definicije akustičkih zona u naseljima i granične vrednosti dozvoljenog nivoa buke u njima (prema važećem pravilniku u Srbiji)

9. zona	10. Namena prostora	11. nivo buke u dB(A)	
		12. dan i veče	13. noć
1	Područja za odmori rekreaciju, bolničke zone i oporavilišta, kulturno-istorijski lokaliteti, veliki parkovi	50	40
2	Turističkim područja, kampovi i školske zone	50	45
3	Čisto stambena područja	55	45
4	Poslovno-stambena područja, trgovačko-stambena područja i dečija igrališta	60	50
5	Gradski centar, zanatska, trgovačka, administrativno-upravna zona sa stanovima, zona duž autoputeva, magistralnih i gradskih saobraćajnica	65	55
6	Industrijska, skladišna i servisna područja i transportni terminali bez stambenih zgrada	Na granici ove zone nivo buke ne sme prelaziti graničnu vrednost zone sa kojom se graniči	

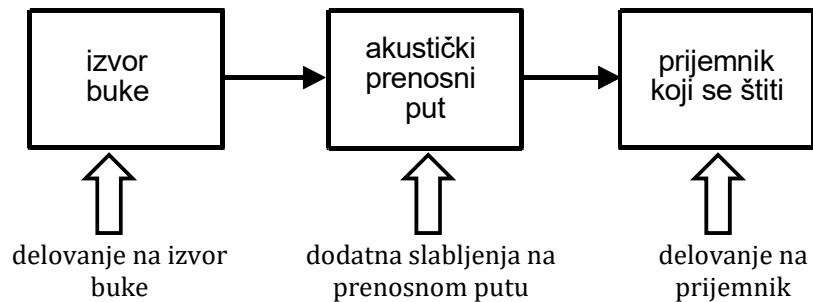
Tabela 17.4 – Maksimalno dozvoljene vrednosti ekvivalentnog nivoa buke u raznim vrstama prostorija prema važećem normativu u Srbiji

14.	15. Namena prostora	16. nivo buke u dB(A)	
		17. dan i veče	18. noć
19. 1	20. sobe u stanovima, bolničke sobe, hotelske sobe viših kategorija	21. 35	22. 30
23. 2	24. hotelske sobe nižih kategorija, spavaonice u domovima	25. 40	26. 35
27. 3	28. kabineti na fakultetima	29. 35	30. 35
31. 4	32. amfiteatri, kabineti u školama, čitaonice, biblioteke	33. 40	34. 40
35. 5	36. sobe za rad sa decom	37. 45	38. 45

17.3 Osnovni principi zaštite od buke

Kada se razmatra neki konkretni problem zaštite od buke mogu se prepoznati tri osnovna elementa koji su međusobno povezani. To su izvor zvuka koji je neko karakterisao kao buku, akustički put prenosa kroz koji se zvučna energija prostire i prijemnik koji treba zaštiti od te buke. Veza ova tri elementa prikazana je simbolički

blok-šemom na slici 17.12. U inženjerskoj oblasti zaštite od buke prijemnik je po definiciji čovek, mada postoje okolnosti kada to može biti i mikrofon. To je na primer slučaj u raznim studijima za snimanje zvuka gde treba umanjiti nivo buke na mestu mikrofona ispod neke prihvatljive granice.



Slika 17.12 – Simbolički prikaz procesa zaštite od buke

Intervencije za zaštitu prijemnika smanjenjem buke mogu se nezavisno primenjivati na svakom od tri elementa sa slike 17.13, koji su takođe označeni u slici. Tako se može razmatrati:

- 39. delovanje na izvor buke da bi se smanjila izračena zvučna snaga,
- 40. delovanje na akustičkom prenosnom putu da bi se oslabila zvučna energija i tako umanjio nivo zvuka na mestu prijemnika, i
- 41. delovanje na prijemniku (slušaocu) da bi se umanjio nivo zvuka koji deluje neposredno na čulo sluha, preciznije na bubne opne slušaoca.

U svakom konkretnom slučaju zaštite od buke prave se kombinacije intervencija na ova tri elementa da bi se ostvario željeni cilj zaštite prijemnika. U zavisnosti od konkretnih okolnosti potrebno slabljenje nivoa buke se raspodeljuje na ova tri domena delovanja.

Zaštita na izvoru buke

Zaštita na izvoru buke podrazumeva razne fizičke intervencije i inovacije kojim se smanjuje zvučna snaga izračena u prostoru. Takve intervencije mogu ići u tri pravaca. Prvi je poboljšanje u konstrukciji izvora. To je proces koji se odvija isključivo u fabrikama gde se oni proizvode, preciznije u njihovom odelenju razvoja. Dobar primer toga je automobilska industrija gde se permanentno odvija razvoj sve tiših motora. Danas je već dostignut takav nivo razvoja da buka automobila u saobraćaju ne potiče od motora, već dominantno od drugih njegovih delova. Sličan primer je industrija mlaznih motora za avione. Motori savremenih aviona neuporedivo su tiši od onih koji su proizvedeni pre više desetina godina. Izvestan problem u ovom pristupu je u tome što je za smanjenje zvučne snage takvih izvora buke potreban dugotrajan istraživački proces, uglavnom podstaknut razvojem ekološke svesti, ali pre svega prinudom zakonske regulative u oblasti ekologije.

U ovu vrstu intervencija može se svrstati i poznata priča iz novina o ugradnji uređaja, takozvanih limitera, koji u restoranima sa muzikom treba da ograniče maksimalni nivo zvuka reprodukovanih zvuka i obezbede da ni pod kakvim uslovima buka u okruženju ne pređe zakonski dozvoljenu granicu. Sistemi za ozvučavanje po ugostiteljskim objektima specifična su vrsta izvora buke u urbanim sredinama, a korišćenje limitera je jedan od načina da se ograniči njihova zvučna snaga.

Drugi pravac delovanja u zaštiti od buke na izvoru može biti njihovo oklapanje. Ovakav pristup je primenjim na mašinama i uređajima koji proizvode buku. Oklapanje se realizuje raznim oblicima zaštitnih obloga, kontejnera i sličnih sredstava napravljenih od dovoljno masivnog materijala koji predstavljaju izvesnu prepreku širenju zvuka. Dometi ovakvog delovanja zavise od materijala primjenjenog za izradu oklopa i detalja izrade, jer svaki nezaštićeni otvor na oklopu umanjuje njegovo dejstvo. Problem sa ovakvim pristupom je u tome što se oklapanjem radi smanjenja buke ne sme ugroziti rad samog uređaja. Kod nekih uređaja postoji potreba za intenzivnim hlađenjem, kao na primer kod svih bučnih uređaja pokretanih motorima sa unutrašnjim sagorevanjem (dizel-agregati, kompresori i slično). S druge strane nekim uređajima neophodan je stalni pristup radi kontrole. Sve to otežava smanjenje buke oklapanjem takvih izvora.



Slika 17.13 – Isti dizelagregat u dve varijante koje se mogu nabaviti: osnovni uređaj (levo) i ugrađen u kontejner radi smanjenja buke koju stvara u okolini.

Jedan standardni primer delovanja na izvoru buke prikazan je na slici 17.13. Pokazan je jedan dizel-agregat koji se može nabaviti u dve varijante: bez i sa zaštitom od buke. Kod takvih uređaja zaštita se realizuje posebnim kontejnerom u koji se agregat fabrički ugrađuje. Kontejner mora imati elemente koji obezbeđuju nesmetan protok vazduha za hlađenje motora. To podrazumeva postojanje dovoljno velikih otvora na kontejneru, što je u suprotnosti sa osnovnom idejom oklapanja kao mere zaštite. S druge strane, ako su ti otvori nedovoljne površine ugroziće se hlađenje motora. Zbog toga se u kontejneru na otvorima za hlađenje ugrađuju posebni prigušivači zvuka, koji takođe ne smeju ugroziti protok vazduha. Sve to značajno povećava veličinu kontejnera u odnosu na osnovne

gararite agregata, što se može videti i na slici. Zbog delikatnosti oklapanja mašina uglavnom se podrazumeva da to izvodi fabrika koja ih proizvodi. Treći pravac delovanja na izvoru buke je kontrola njihovog režima rada. Naime, u slučaju da razne praktične okolnosti ne omogućavaju adekvatnu zaštitu na izvoru, jedina preostala mera su zakonske norme koje regulišu korišćenje zvučnih izvora, to jest kontrolišu režim njihovog uključivanja. Na primer, na gradilištima gde se koristi veliki broj teških mašina kontrolišu se nivoi buke koju sve one združeno proizvode. Ako u okruženju dođe do premašenja zakonski dozvoljene vrednosti nivoa buke, neke od mašina se moraju isključiti dok se ne stvori prilika za njihovo ponovno aktiviranje. Drugi primer takvog delovanja su neki aerodromi koji su smešteni u neposrednoj blizini naselja. Postoje primjeri gde im je posebnom odlukom zabranjen rad noću da ne bi buka aviona ugrožavala stanovnike u okruženju. Najzad, u takvu meru spadaju i razne uredbe kojim se ograničava radno vreme ugostiteljskih objekata sa muzikom, jer oni predstavljaju izvore buke za svoju okolinu.

Zaštita na prenosnom putu

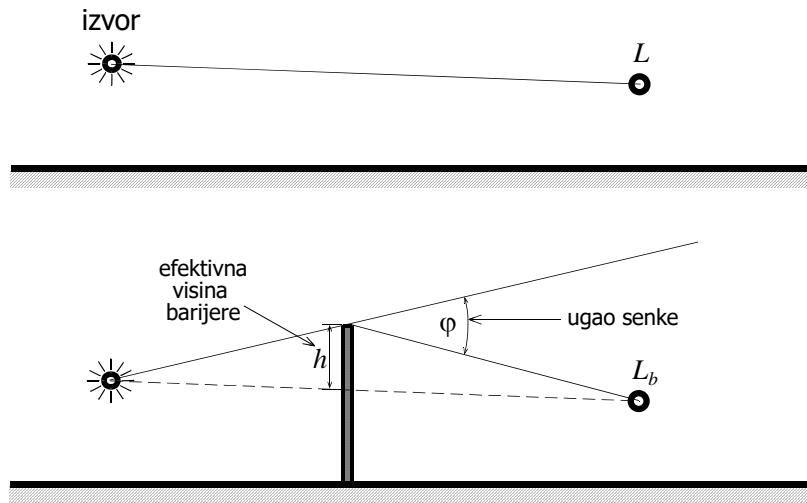
Način na koji se realizuje zaštita na prenosnom putu zavisi od njegove fizičke prirode i okruženja u kome se nalaze izbor buke i prijemnik. U praksi takva zaštita podrazumeva vrlo raznolike metode i sredstva. U tom domenu se razlikuju dva moguća slučaja. Jedan je kada se put prenosa buke od izvora do mesta prijema u celini nalazi na otvorenom prostoru, a drugi je kada on bar jednim delom obuhvata unutrašnjost nekog građevinskog objekta.

U slučaju da se i izvor buke i prijemnik nalaze na otvorenom prostoru, jedina moguća intervencija na prenosnom putu za postizanje zvučne zaštite su razne vrste fizičkih prepreka, to jest barijera, postavljenih između njih. Svaka prepreka na putu prostiranja čini da zvučna energija dospeva do prijemnika samo difrakcijom, to jest savijanjem oko ivica prepreke. Takva putanja podrazumeva da postoji slabljenje u odnosu na stanje koje bi bilo bez te prepreke. Klasičan primer ovakve zaštite je postavljanje takozvanih „akustičkih“ barijera pored puteva. To su zidovi izgrađeni od nekog pogodnog, dovoljno masivnog materijala i postavljeni na pozicijama gde će se postići najveće slabljenje zvučne energije kada difrakcijom dospeva do prijemnika. Postavljanje barijere duž magistralnih puteva postalo je manje-više standardno rešenje za smanjenje nivoa saobraćajne buke na mestu bliskih objekata u kojima borave ljudi. Međutim, svaka fizička prepreka na putu prostiranja, a to znači svaki zid, zgrada ili čak veštačko brdo od nanete zemlje ispoljava isti fekat.

Zaštitno dejstvo akustičke barijere principijelno je prikazano na slici 17.14. Ako u nekoj tački prostora prisutni izvor buke stvara nivo zvuka L koji je prema nekim kriterijumima suviše visok, postavljanje barijere između izvora i te tačke uneće izvesno smanjenje nivoa. Nova vrednost nivoa buke iza barijere biće L_b . Doprinos barijere kvantificuje se slabljenjem koje se definiše kao razlika:

$$\Delta L = L - L_b \quad (17.4)$$

Veličina ovog slabljenja generalno zavisi od visine barijere, pri čemu viša barijera unosi veće slabljenje. Međutim, ta zavisnost nije jednostavna jer postoji uticaj i drugih parametara. Veličina ΔL iz izraza (17.4) funkcija je frekvencije, a to znači talasne dužine, i geometrijskih parametara koji proizilaze iz prostorne konfiguracije tri relevantne tačke: vrha barijere, položaja izvora i položaja prijemne tačke u kojoj treba postići sniženje nivoa zvuka. U praksi se to može svesti na tri geometrijska podatka: talasnu dužinu λ , efektivnu visinu barijere h i ugao senke φ . Definicije parametri h i φ označene su na slici 17.14.

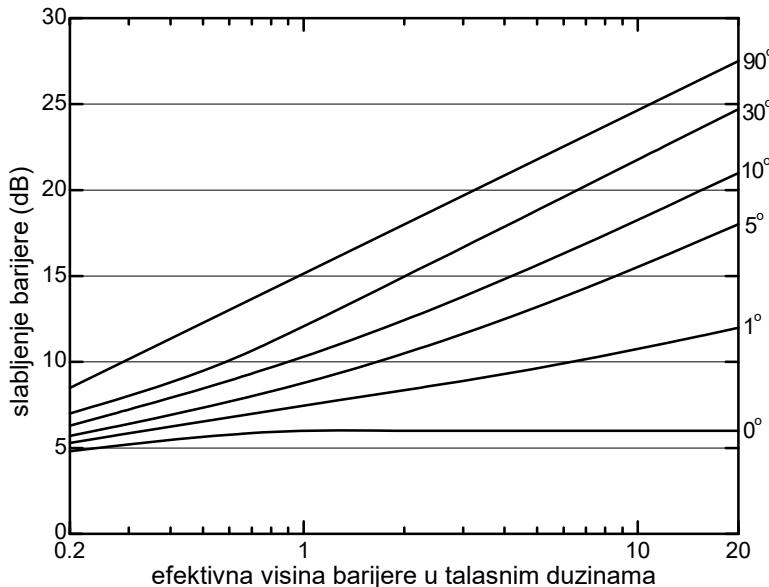


Slika 17.14 - Ilustracija primene barijere za smanjenje nivoa zvuk; na slici su označeni relevantni geometrijski parametri efektivna visina barijere h i ugao senke φ

Za većinu inženjerskih aplikacija u kojima se vrši predikcija veličina slabljenja ΔL koje unosi barijera u literaturi se uglavnom prikazuje dijagramima. Jedan takav dijagram prikazan je na slici 17.15. Efektivna visina barijere koja je predstavljena na apscisi, normalizovana je u odnosu na talasnu dužinu, a parametar na dijagramu je ugao senke. Sa dijagraoma se može proceniti zavisnost slabljenja od talasne dužine, to jest frekvencije. S obzirom da slabljenje zavisi od geometrijskih parametara i talasne dužine, mogući su i drugi načini prikazivanja slabljenja, pa je ovaj sa slike 17.14 samo jedan od njih.

Posmatrajući geometrijsku konfiguraciju sa slike 17.14 i dijagram slabljenja sa slike 17.15 vidi se da je pri zadatoj visini akustička barijera efikasnija, to jest unosi veće slabljenje, ako se nalazi bliže referentnim tačkama. To znači da se najveće slabljenje postiže ako je ona postavljena neposredno uz izvor buke ili neposredno uz prijemnik zvuka. Tada je ugao senke maksimalan, pa je i uneto slabljenje nivoa zvuka najveće moguće koje se može postići zadatom visinom barijere. Nasuprot tome, najgori slučaj je kada se barijera nalazi na sredini rastojanja između izvora i prijemnika, jer je tada ugao senke najmanji mogući. S obzirom da se u svim konkretnim intervencijama zaštite pomoću barijera zahteva što veće smanjenje nivoa buke na široj teritoriji gde se mogu nalaziti potencijalni slušaoci,

jedino racionalno rešenje je da se barijera uvek postavlja što bliže izvoru buke. Otuda se barijere pored puteva postavljaju što bliže ivici kolovoza.



Slika 17.15 - Dijagram slabljenja koje unosi barijera; parametar je ugao senke

U opisu efekta koji se dobija postavljanjem barijere i u definiciji dijagrama sa slike 17.15 podrazumevju se dve stvari. Prvo, prepostavka je da je barijera beskonačne dužine. U tom slučaju ne postoji mogućnost da zvuk difrakcijom obilazi oko barijere sa njene leve i desne strane. U praksi to nikada nije slučaj, jer je širina akustičke barijere uvek konačna. Zbog toga je zvučno polje iza nje rezultanta superponiranja komponente koja prelazi preko njene gornje ivice i komponenti koje dospevaju obilaskom s obe njene strane. U analizi stanja buke iza barijere potrebno je uzeti u obzir i te putanje. Drugo, pretpostavlja se da je zanemarljiva energija koja prolazi direktno kroz materijal barijere. To je pitanje masivnosti materijala od koga je napravljena, a teorijski aspekt tog procesa objašnjen je u nastavku, u delu o zvučnoj izolaciji zidova.

Kada prenosni put buke obuhvata unutrašnjost neke zgrade moguća su tri različita slučaja:

- kada su izvoru buke i prijemnik unutar zgrade i pri tome u istoj prostoriji,
- kada je izvor buke u spoljašnjoj sredini a prijemnik u zgradici, i
- kada su izvor i prijemnik u zgradici, ali u različitim prostorijama.

Svaki od slučajeva ima svoje specifičnosti zbog kojih se različito pristupa rešavanju problema.

Kada se izvor i prijemnik nalaze u zajedničkoj prostoriji, sva moguća rešenja za smanjenje nivoa buke su u domenu akustičkog dizajna prostorija, to jest njenog enterijera. Ranije je pokazano da se zvučno polje koje stvara neki izvor zvuka može razložiti na dve komponente: direktni i reflektovani zvuk. Ove dve komponente simbolički su prikazane na slici 12.1. Vidi se da u neposrednoj blizini izvora dominira direktni zvuk. Nivo zvučnog

pritiska direktnog zvuka određen je samo zvučnom snagom izvora i rastojanjem od njega. To znači da se na tu komponentu zvučnog polja ne može uticati nikakvim intervecijama na prenosnom putu, osim delovanjem na samom izvoru (npr. oklapanjem). Na rastojanju r_c označenom na slici nivoi direktnog i reflektovanog zvuka su jednaki. Sa daljim povećanjem rastojanja dominira nivo reflektovanog zvuka.

Za sve prijemnike koji se nalaze u prostoriji, a nisu u neposrednoj blizini izvora, zaštita se postiže intervcijama kojim se snižava nivo reflektovanog zvuka. U poglavljiju o akustici prostorija je pokazano da to podrazumeva povećanje ukupne apsorpcije A u prostoriji. Povećavanje apsorpcije će na dijagramu uticati na pomeranje linije nivoa reflektovanog zvuka naniže. Takva vrsta intervcije spada u oblast akustičkog dizajna prostorija, jer je unošenje dovoljno velike apsorpcione površine pitanje uređenja enterijera. Ako je u pitanju prostorija u kojoj je izgled enterijera važan, intervcije na smanjenju buke moraju da budu kompromis estetike i akustike. Sa slike 12.1 se vidi da u zoni direktnog zvuka oko izvora unošenje dodatne apsorpcije u prostoriju ne menja stanje zvučnog polja jer dominira energija koja dorektno stiže od izvora. Za osobe koje se nalaze u toj zoni nikakva intervcija u prostoriji neće promeniti stanje buke.

Zanimljivo je da se smanjenje nivoa direktnog zvuka u nekim tačkama okruženja izvora u prostoriji može postići postavljanjem barijera. Tada važi isti princip kao za barijere na otvorenom prostoru, pa će direktni zvuk kao komponentu zvučnog polja biti umanjen za ΔL prema izrazu (17.4). Treba imati u vidu da eventualno prisustvo barijere radi umanjenja nivoa direktnog zvuka na mestu nekih ugroženih osoba ne menja nivo reflektovanog zvuka, jer ukupna zvučna energija koja odlazi u prostoriju ostaje nepromenjena.

Najzad, kada su izvor i prijemnik u zgradama, ali u različitim prostorijama, ili kada je prijemnik u zgradama a izvor van zgrade, zaštitu od buke karakteriše činjenica da se zvuk između njih prostire višestrukim složenim putanjama. Zaštita se tada realizuje uvođenjem odgovarajućih mera na svim prisutnim putanjama prolaska zvuka. To otvara jednu posebnu oblast građevinske akustike koja se naziva zvučna izolacija. Ona je šire obrađena u nastavku jer zahteva detaljnija objašnjenja mehanizma prolaska zvuka kroz pregrade u kompleksnoj strukturi građevinskih objekata.

Zaštita na prijemniku

Zaštita na prijemniku podrazumeva korišćenje takozvanih „ličnih zaštitnih sredstava“. To je sve ono što se postavlja direktno na, ili u uši čoveka da bi se umanjila zvučna energija koja dospeva do bubne opne. Lična zaštitna sredstva se pojavljuju u dva osnovna fizička oblika: čepovi za uši i štitnici (takozvani antifoni). Obe vrste su prikazane na slici 17.16.

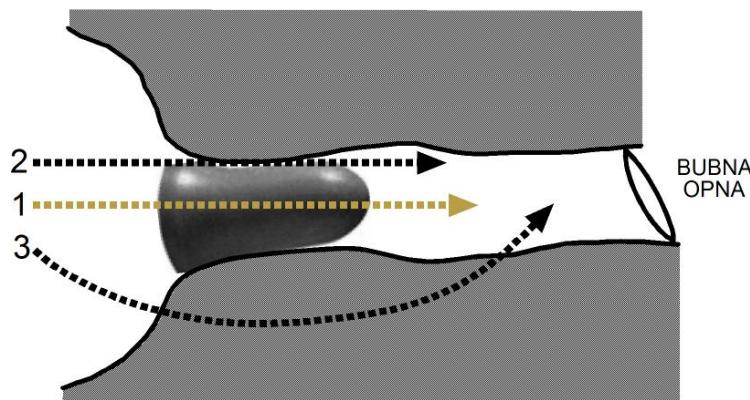
Čepovi za uši su najjednostavniji oblik ličnog zaštitnog sredstva, a i najšire primenjivani. Oni se umeću direktno u slušni kanal i tako ostvaruju smanjenje zvučne energije koja dospeva do bubne opne. Izrađuju se od nekih mehaničkih materijala da bi se prilagodili širini slušnog kanala, da ne bi iritirali njegove zidove, a i da bi se elastičnošću materijala

postiglo dobro zaptivanje kada stoje u kanalu. Potreba da čepovi budu lagani i mekani ograničava vrste materijala koje se mogu koristiti, a time i najveće slabljenje buke koje se na takav način može postići.



Slika 17.16 – Lična zaštitna sredstva: levo - čepovi za uši, desno - štitinici (antifoni).

Na slici 17.17 šematski su prikazani putevi prolaska zvuka kada se u slušni kanal postavi čep. Osnovno zaštitno dejstvo je slabljenje na putu zvučne energije kroz njegov materijal, što je putanja na slici označena sa 1. Kod čepova potpuno izrađenih od penastog materijala to slabljenje ne može biti veliko. Da bi se maksimiziralo slabljenje zvuka u neke od njih se postavlja umetak od nekog tvrđeg materijala, čak i od metala. Paralelno tom putu postoji izvesno „curenje“ zvučne energije uz zidove slušnog kanala, što je putanja zvuka na slici 17.17 označena sa 2. Najzad, čak i da čep postiže beskonačno slabljenje na putanjama 1 i 2, koštana provodnost uvodi putanju označenu na slici sa 3 i tako limitira maksimalno moguće slabljenje buke.

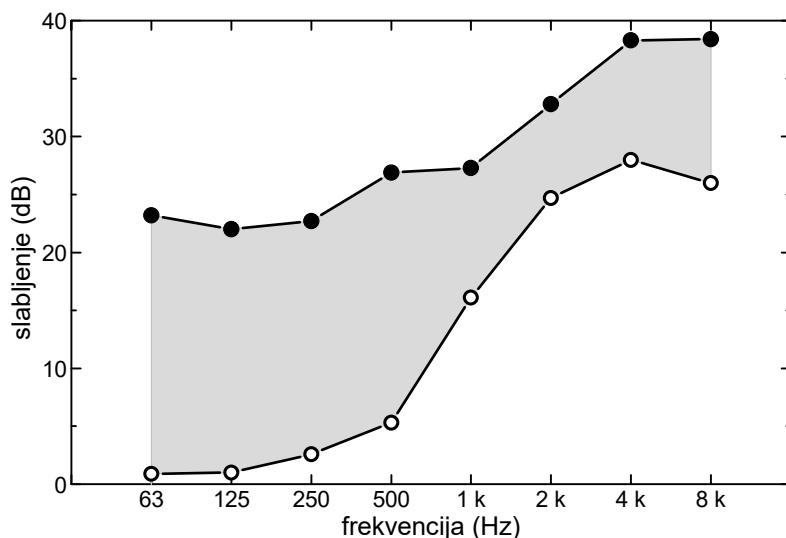


Slika 17.17 – Šematski prikaz putanja prolaska zvuka koje određuju veličinu slabljenja buke pru korišćenju zaštitnih čepova za uši

Podaci iz kataloga proizvođača pokazuju da čepovi unose slabljenje buke koje okvirno može biti u opsegu od oko 15 dB do 35 dB, mereno u dBA. Međutim, pri tumačenju ovih karakteristika treba imati u vidu da veličina slabljenja buke zavisi od načina kako su čepovi postavljeni u slušnom kanalu, jer u putanji 2 sa slike 17.17 uvek postoji izvesna prirodna varijabilnost. Postoje podaci da pri sukcesivnom ponavljanju stavljanja čepova u uši standardna devijacija vrednosti postignutog slabljenja može biti i preko 5 dB, što

zavisi od modela. To treba imati u vidu kada se procenjuje očekivani nivo zaštite čepovima.

Čepove za uši kao zaštitno sredstvo karakteriše izražena frekvencijska zavisnost veličine slabljenja koje se njima postiže. Većina proizvoda na tržištu na najnižim frekvencijama ima slabljenje od samo desetak decibela, a neki i manje, dok veličina slabljenja na 4 kHz može biti i preko 30 dB. Kao ilustracija varijabilnosti po frekvencijama na slici 17.18 prikazan je opseg vrednosti u kome se kreće slabljenje velikog broja čepova za uši koji se mogu naći na tržištu (vrednosti preuzete iz kataloga nekoliko proizvođača). Zajedničko za sve modele je manje-više montoni rast slabljenja sa frekvencijom.



Slika 17.18 – Prikaz opsega vrednosti slabljenja nivoa buke zaštitnih čepova za uši koji se mogu naći na tržištu (prema podacima proizvođača)

U novije vreme razvijena je klasa čepova za uši namenjenih muzičarima. Naime, konstatovano je da su oni konstantno izloženi visokim nivoima zvuka, posebno u savremenoj muzici. Utvrđena je pojava da dugotrajno profesionalno bavljenje muzikom dovodi tokom vremena do izvesnih oštećenja čula sluha, čak i kod onih koji sviraju klasične muzičke instrumente. Da bi se njima u izvesnoj meri zaštitio sluh tokom svakodnevnih vežbanja razvijena je namenska kategorija čepova koju karakteriše relativno linearizovana frekvencijska karakteristika slabljenja zvuka. Na taj način se čuva boja zvuka koji muzičar čuje kroz čepove i ne menjaju se bitno njegove karakteristike.

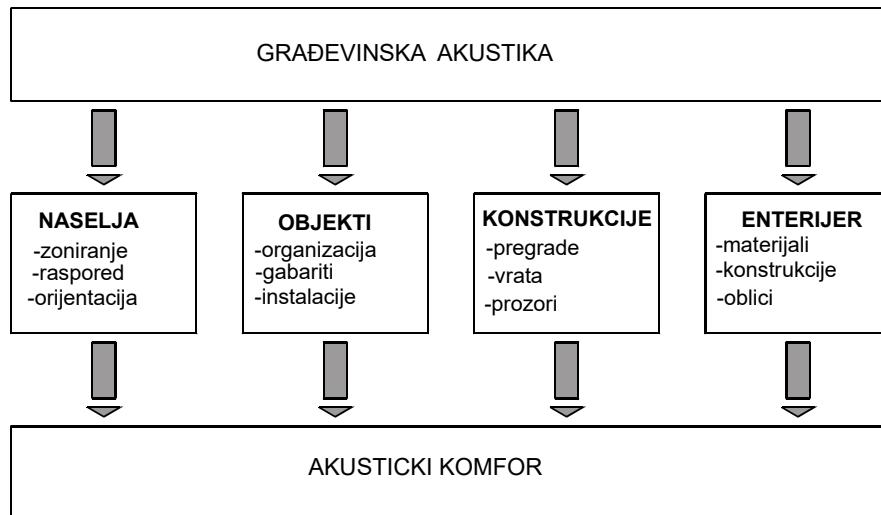
Štitinici za uši predstavljaju lično zaštitino sredstvo koje u celini pokriva ušne školjke. Zbog toga je moguće slabljenja buke nešto veće nego sa čepovima za uši. Prema podacima proizvođača slabljenje koje se može postići kreće se u rasponu od oko 20 dB do preko 35 dB. U poređenju sa čepovima, štitinici imaju manju standardnu devijaciju pri ponovljenim stavljanjima, samo oko 2 dB, pa to čini njihovu izvesnu prednost. U posebno bučnim okolnostima preporučuje se kombinacija čepova i štitnika preko njih da bi se povećala zaštita.

Specifičnost ličnih zaštitnih sredstava je u tome što njihovo dugotrajno nošenje nije moguće jer stvara određenu nelagodnost. Čepovi za uši moraju se umetnuti dublje u slušni kanal da bi se postiglo očekivano slabljenje, što može biti neprijatno. Štitinici za uši zbog kvalitetnog naleganja moraju vršiti izvestan pritisak na glavu, što takođe može biti

neprijatno u dužem vremenu. Zbog toga je primena ove vrste zaštite ograničena na okolnosti kraćeg izlaganja buci, kada druge metode za smanjenje nivoa buke ne mogu biti primenjene, ili njihova primena nije racionalna. To je na primer slučaj pri povremenim ulascima u bučne mašinske prostorije radi neke kontrole, kada se vrše neke radne operacije sa bučnim alatima i slično. Ukratko, lična zaštitna sredstva ne mogu biti trajno rešenje problema prekomerne buke.

17.4 Akustički komfor u zgradama

Postizanje akustičkog komfora u zgradama predstavlja najkompleksniji tehnički zadatak akustičkog projektovanja. Razlog kompleksnosti je dvojak: problem se mora posmatrati iz nekoliko relativno raznorodnih domena, pa se može reći da je multidisciplinaran, a uz to postoji raznolikost fizičkih putanja kojim zvučna energija prolazi kroz strukturu svake zgrade, što je ponekad teško sagledati. Ta kompleksnost u postizanju akustičkog komfora kao tehničkog zadatka šematski je ilustrovana na slici 17.19. Akustički kvalitet zgrada, a time i čovekovog neposrednog životnog okruženja, dostiže se kada su svi zahtevi sa prikazane šeme optimalno rešeni.



Slika 17.19 – Šematski prikaz postizanja akustičkog komfora u zgradama

Prvi korak u obezbeđenju akustičkog komfora u boravišnim prostorijama unutar zgrada je planiranje naselja u celini, što znači na urbanističkom nivou. To obuhvata izbor odgovarajućih lokacija za zgrade koje su dovoljno udaljene od postojećih i budućih dominantnih izvora buke, zatim raspoređivanje zgrada na zadatom terenu u odnosu na osetljivost njihovog sadržaja na buku, i najzad pravilnu orientaciju zgrada u prostoru. Na primer, poželjno je da zgrade čiji sadržaj nije osetljiv na buku, kao što su razne poslovne zgrade, tržni centri i slično, budu postavljene između izbora buke, na primer prometne saobraćajnice, i zgrada sa osetljivijim sadržajem. Tako one deluju kao barijere koje štite

osetljive zgrade od buke. Orientacija zgrada podrazumeva minimizaciju veličine njihovih fasada koje su okrenute ka dominantnim izvorima buke u okruženju.

Na nivou jedne zgrade značajan udio u obezbeđenju akustičkog komfora ima pravilno organizovanje njene unutrašnjosti, to jest raspoređivanje različitih sadržaja u njoj. To u praksi znači da se definišu prostorije čiji je sadržaj osetljiv na buku, na primer boravišne prostorije u stanovima, i prepoznaju one prostorije u kojima se mogu naći jači izvori buke. U organizaciji prostora unutar zgrade potrebno je izbeći da bilo koje prostorije iz ove dve kategorije budu prostorno postavljene neposredno jedna uz drugu. Pitanje gabarita naznačeno u slici 17.19 označava da je u rešavanju unutrašnjosti zgrade potrebno na kritičnim mestima predvideti dovoljno prostora za primenu mera zvučne zaštite, jer svaka takva mera zahteva neki prostor. Na primer, kod koncertnih dvorana u kojima se zahteva izrazito nizak nivo buke jedini način da se strogi kriterijumi ispoštuju jeste da na svakom ulazu u salu postoji dodatna prostorija kao tampon zona, a za to treba predvideti mesta. Najzad, pitanje instalacija proizilazi iz činjenice da su mašinske instalacije u zgradama najznačajniji izvor buke a sve vrste instalacija mogu biti putanje prolaska buke između prostorija. Zbog toga se njihov izbor i položaj u zgradama mora projektovati u skladu sa zahtevima akustičkog komfora.

Sledeći nivo na kom se rešava problem akustičkog komfora je izbor konstrukcije zgrade i pregradnih elemenata, zidova, tavanica, prozora i vrata, kojim se međusobno razdvajaju unutrašnje prostorije ili prostorije i spoljašnja sredina. Unutar zgrade buka iz jednog prostora u drugi prodire brojim putanjama: direktno kroz građevinski material pregrade, njihove spojeve, kroz različite vazdušne šupljine u pregradama, kroz instalacije, itd. Zvučna zaštita na ovom nivou podrazumeva analizu svih putanja kojim zvuk dopire iz jednog prostora u drugi i intervencije na svim takvim putanjama.

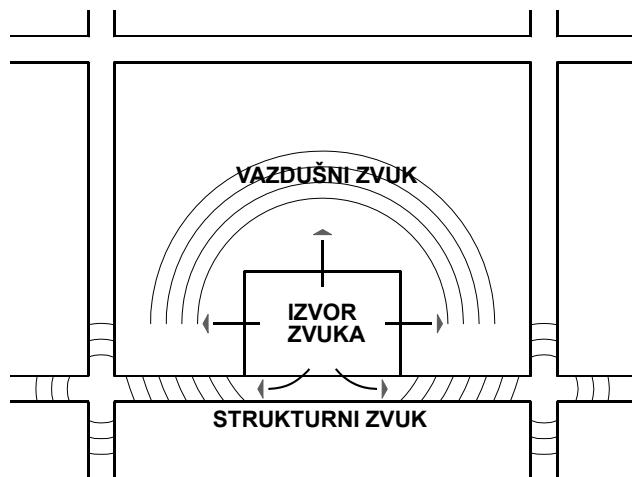
Najzad, u prostorijama u kojima se zahteva obezbeđenje akustičkog komfora postavljaju se neki zahtevi koji utiču na enterijerska rešenja pri izboru materijala, enterijerskih konstrukcija i unutrašnjih oblika. Ovaj nivo rešavanja problema akustičkog komfora postaje najznačajniji ako su ljudi i potencijalni izvori buke u istoj prostoriji, jer je tada dizajn enterijera jedina raspoloživa mera.

Treba imati u vidu da sve vrste fizičkih intervencija prikazanih u šemi sa slike 17.19 imaju ograničene efekte u domenu zaštite od buke, izraženo u decibelima. Zbog toga je neizostavan još jedan domen delovanja u postizanju akustičkog komfora, i on se odnosi na ljude kao izvor buke. Zbog toga su neophodne i zakonske norme koje regulišu ponašanje ljudi u zgradama, a to je takozvani „kućni red“.

Principi zvučne izolacije u zgradama

Zvučna izolacija je pojam kojim se definišu mere za smanjenje prodora zvuka između prostora u zgradama. To obuhvata teoriju prenosa zvuka kroz unutrašnjost građevinskih objekata i praktične metode za kontrolu takvih procesa. Zvučna izolacija je najvažnija tema građevinske akustike. U zgradama se po načinu nastanka razlikuju dva fizička oblika

zvuka: vazdušni zvuk koji nastaje kada zvučni izvor stvara oko sebe zvučno polje u vazduhu i struktturni zvuk kada se fizička struktura zgrade, a to znači građevinski materijal, direktno mehanički pobuđuje na oscilovanje. Ova dva pojedinačna oblika šematski su prikazana na slici 17.20. Kao posledica prodora vazdušnog ili struktturnog zvuka kroz pregradne elemente (zidove i tavanice) u prostorijama koje se štite od buke u vazduhu se pojavljuje zvučno polje. Praktične metode za smanjenje uticaja ova dva oblika zvuka se razlikuju, pa je podela na vazdušni i strukturi zvuk odredila i dve osnovne oblasti delovanja u građevinskoj akustici.



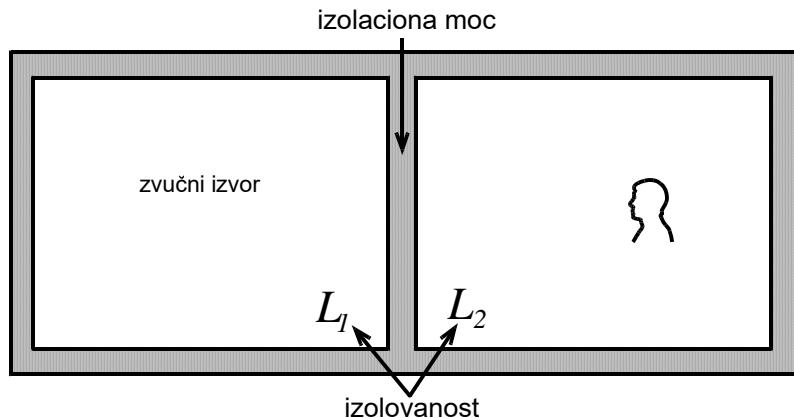
Slika 17.20 – Ilustracija uz objašnjenje pojave vazdušnog i struktturnog zvuka

Problem zvučne zaštite u zgradama svodi se na odnos dve prostorije: u jednoj se nalazi izvor neželjenog zvuka (predajna prostorija), a druga je prostor koji se štiti i u kome treba obezbiti dovoljno nizak nivo buke (prijemna prostorija). Ti prostori su po pravilu sobe u zgradama, ali prostor sa izvorom zvuka može biti i spoljašnja sredina a prijemna prostorija je soba sa prozorima kroz koje taj zvuk prolazi. U praksi zvučne izolacije dve posmatrane prostorije najčešće se nalaze jedna pored druge ili jedna iznad druge, ali to ne mora uvek da bude slučaj.

U zvučnoj izolaciji najčešći slučaj je da su dve susedne prostorije kao što je prikazano na slici 17.21. Definisane su dve veličine kojim se opisuje veza zvučnog polja u predajnoj i prijemnoj prostoriji. Prva kvantifikuje sposobnost pregrade koja razdvaja dve prostorije da umanji zvučnu energiju koja prolazi kroz nju i naziva se izolaciona moć (R). Druga veličina definiše razliku između nivoa zvuka u predajnoj i prijemnoj prostoriji i naziva se zvučna izolovanost. Zadatak zvučne zaštite u zgradama je podešavanje izolovanosti između pojedinih prostorija. Između izolacione moći i izolovanosti pregrada postoji analitička veza koja će biti pokazana u nastavku.

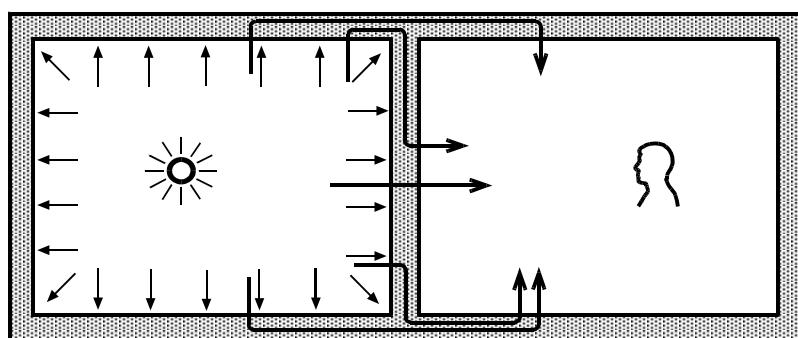
Jedan od praktičnih problema zvučne izolacije proizilazi iz veoma velikog dinamičkog opsega čovekovog čula sluha. To može da se ilustruje jednim primerom. Ako u jednoj prostoriji neko tokom večeri sluša reprodukovani muziku realno je da pri tome može stvarati nivo zvuka 90 dB. Ako je susedna prostorija iza zida spavača soba nekog drugog

stana u njoj izolacijom treba obezbediti da nivo ne prelazi 30 dB (videti podatke prikazane u Tabeli 17.4). U tom slučaju pregrada između dve prostorije treba da propusti samo milioniti deo energije koja u prostoriji sa muzikom napada njenu površinu. Očigledno je da se u pretpostavljenom slučaju zahteva veliko slabljenje zvučne energije u pregradi, a realizacija tolikog slabljenja u praksi veoma je složen tehnički problem.



Slika 17.21 – Predajna i prijemna prostorija sa označenim osnovnim veličinama od značaja za zvučnu izolaciju

Za rešavanje problema zvučne izolacije između prostorija potrebno je razumevanje svih putanja kojim zvučna energija prolazi iz pobudne u prijemnu prostoriju i procese koji se pri tome odvijaju. Kada u predajnoj prostoriji radi neki zvučni izvor u njoj se formira difuzno zvučno polje. Zvučna energija je približno konstantna po zapremini prostorije i na svih šest unutrašnjih površina prelazi u građevinski materijal. Ovaj proces je šematski prikazan na slici 17.22. Molekuli vazduha koji osciluju predaju deo svoje energije molekulima materijala u pregradi. Ta energija je relativno mala, jer se u tom procesu veći deo energije reflektuje nazad u prostoriju.



Slika 17.22 – Putanje prolaska zvuka između dve susedne prostorije

Zvučna energija koja je predstavljena oscilovanjem molekula građevinskog materijala dalje putuje kroz materijal u vidu različitih tipova talasa. Kretanje takvih zvučnih talasa odvija se znatno većim brzinama od brzine u vazduhu i sa relativno malim slabljenjem pri

prostiranju. Na osnovu toga u prijemnoj prostoriji površine zidova, poda i plafona postaju zvučni izvori koji deo svoje energije oscilovanja predaju molekulima vazduha. Njihovo ponašanje se može razumeti u smislu da deluju kao zvučnici koji emituju zvuk u prostoriju. Takvim mehanizmom u prijemnoj prostoriji nastaje zvučno polje na osnovu energije koja dolazi iz predajne prostorije.

Na stvaranje zvučnog polja u prijemnoj prostoriji dominantno utiče putanja zvuka kroz pregradu koja neposredno razdvaja dve prostorije, u slučaju sa slike 17.22 to je pregradni zid. Ta putanja je označena na slici strelicom kroz pregradu. Međutim, postoje i druge putanje zvuka preko bočnih pregrada koje se združeno nazivaju bočno provođenje. Te putanje su na slici 17.22 takođe označene strelicama.

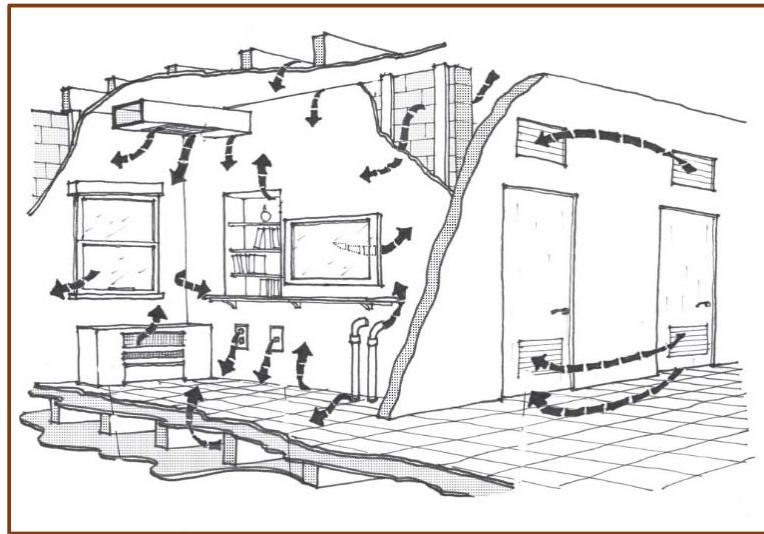
Putanje bočnog provođenja mogu se podeliti na tri grupe. Prva grupa su putanje u kojima direktna pregrada primi zvučnu energiju i izrači je na drugu stranu, ali deo energije koju je primila odlazi na bočne pregrade i preko njih se izrači u prijemnu prostoriju. Drugu grupu čine putanje u kojima bočne pregrade prime energiju i izrače je preko odgovarajućih bočnih pregrada u drugu prostoriju. Najzad, treću grupu čine putanje u kojima bočne pregrade deo primljene energije proslede pregradi koja neposredno razdvaja dve prostorije i preko nje stižu do prijemne prostorije. Naravno da sve vrste otvora (na primer za provlačenje instalacija) ako postoje predstavljaju dodatne putanje prolaska zvuka. Sve nabrojane putanje postoje i u slučaju kada su predajna i prijemna prostorija jedna iznad druge.

Može se zaključiti da zvučna energija prolazi između susednih prostorija:

- 42. kroz pregradu koji ih razdvaja
- 43. kroz bočne zidove (takozvano bočno provođenje)
- 44. kombinovanim putevima
- 45. kroz otvore, fuge i kroz instalacije

Termin izolaciona moć odnosi se na transmisiju zvuka kroz neki određeni pregradni element. Međutim obzirom da zvuk prolazi iz jednog prostora u drugi višestrukim putanjama može se govoriti i o nekoj ukupnoj izolacionoj moći čitave pregradne konstrukcije. Takva izolaciona moć naziva se terenska izolaciona moć. Ona kvantifikuje izolaciona svojstva pregradne konstrukcije u celini uzimajući u obzir sve postojeće putanje prolaska zvuka u konkretnim okolnostima, gde zvuk može prolaziti kroz materijal građevinskih pregrada, kroz vazdušne prostore u objektu, kroz instalacije, i slično. Jedna ilustracija mogućih puteva prolaska zvuka u zgradama prikazana je na slici 17.23.

O zvučnoj izolaciji može se govoriti i kada se dve prostorije ne dodiruju neposredno, ali su slabljenja zvučne energije tada uglavnom toliko velika, da je inženjerski gledano dovoljno razmatrati zvučnu izolaciju samo između susednih prostorija koje su razdvojene nekom zajedničkom pregradom, zidom ili tavanicom.



Slika 17.23 Skica mogućih putanja prolaska zvuka u građevinskom objektu

17.5 Izolaciona svojstva pregrade i izolovanost

Ukupna izolaciona moć neke konstrukcije zasniva se na izolacionim svojstvima pojedinačnih pregradnih elemenata povezanih u sklop. Najznačajniji element u ukupnoj zvučnoj izolaciji je pregrada koja neposredno radvaja dve prostorije, predajnu i prijemnu, ali od značaja su izolaciona svojstva i svih ostalih pregrada kao što su bočni zidovi, pod i plafon preko kojih se ostvaruju bočni putevi prolaska zvuka.

Proračun izolacionih svojstava pregrade zasniva se na modelovanju fizičkih procesa koji se odvijaju u građevinskom materijalu pogodjenom zvučnim poljem. Kada zvučni talas iz prostorije najde na pregradu ukupna upadna snaga će se delimično reflektovati, a delimično će preći u pogodenu pregradu. Na slici 17.24 prikazana je raspodela zvučne energije koja je pogodila neku pregradu. Deo energije koji je ušao u pregradu će se disipirati, deo će se širiti kroz samu pregradu, a deo će biti izračen s druge strane u susednu prostoriju. Tako pogodena pregrada postaje izvor zvuka u susednoj prostoriji sa akustičkom snagom zračenja P_{atr} . Odnos izračene prema upadnoj zvučnoj snazi P_a definije koeficijent transmisije:

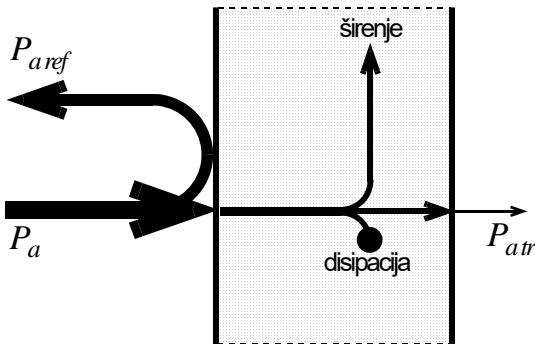
$$\tau = \frac{P_{atr}}{P_a} \quad (17.5)$$

Izolaciona moć pregrade definisana se kao:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} [\text{dB}] \quad (17.6)$$

U čvrstim materijalima mehanička energija može biti predstavljena različitim oblicima talasa. Za razliku od fluida u kojima se zvučna energija prenosi samo longitudinalnim talasima, u čvrstим materijalima javljaju se mnogo složeniji oblici oscilovanja materije i različiti oblici talasnog kretanja, kao što je prikazano u poglavlju 1.3. U čvrstим

materijalima javljaju se transferzalni, površinski, espanzionalni i savijajući talasi. Tip talasa koji je moguć u nekim specifičnim okolnostima zavisi, pored ostalog, i od forme ili konfiguracije materijala koji se posmatra. U masivu velikih dimenzija javljaju se dominantno longitudinalni i transferzalni talasi, dok se u pločama i šipkama javljaju još i dilatacionalni, površinski, savijajući i fleksionalni talasi. Različiti talasi se međusobno povezuju na graničnim površinama i spojevima. Na taj način sprečavanje prostiranja nekog tipa talasa ne znači da se njegova energija neće pojavit na nekom drugom mestu.

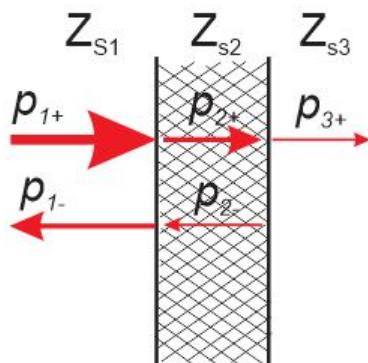


Slika 17.24 Tokovi zvučne energije koja je pogodila pregradu

Specifična kombinacija transferzalnih i fleksionalnih, ili savijajućih talasa čini da površina materijala dobija veće brzine i pomeraje koji kao posledicu imaju zračenje zvučne energije. Procesi koji se dešavaju u samoj pregradi, način na koji se prostiru fleksionalni talasi i njihova veza sa izračenom zvučnom energijom su složeni i počivaju na reševanju talasne jednačine unutar pregrade.

Zvučna izolacija jednostrukih pregrada

Da bi se razumeli osnovni procesi koji određuju izolacionu moć jednostrukih pregrada polazi se od jednostavnih modela koji omogućava da se sagledaju osnovni principi prenošenja zvučne energije. Proses prenošenja zvučne energije kroz pregradu može se posmatrati kao problem tri sredine prikazan na slici 17.25. Posmatra se normalna incidencija zvučnih talasa na pregradu



Slika 17.24. Prostiranje ravanskog talasa kroz tri sredine

Za slučaj prikazan na slici 17.24 i oznake koje su navedene mogu se definisati sledeći izrazi:

$$\begin{aligned}
 \underline{p}_{1+} &= \hat{\underline{p}}_{1+} e^{j(\omega t - k_1 x)} \\
 \underline{p}_{1-} &= \hat{\underline{p}}_{1-} e^{j(\omega t + k_1 x)} \\
 \underline{p}_{2+} &= \hat{\underline{p}}_{2+} e^{j(\omega t - k_2 x)} \\
 \underline{p}_{2-} &= \hat{\underline{p}}_{2-} e^{j(\omega t + k_2 x)} \\
 \underline{p}_{3+} &= \hat{\underline{p}}_{3+} e^{j(\omega t - k_3(x-l))} \tag{17.7}
 \end{aligned}$$

Na graničnim površinama mora da postoji jednakost pritiska i normalne komponente brzine.

$$\begin{aligned}
 \underline{p}_{1+} + \underline{p}_{1-} &= \underline{p}_{2+} + \underline{p}_{2-} \\
 \frac{\underline{p}_{1+} - \underline{p}_{1-}}{\rho_1 c_1} &= \frac{\underline{p}_{2+} - \underline{p}_{2-}}{\rho_2 c_2} \\
 \underline{p}_{2+} e^{j(-k_2 l)} + \underline{p}_{2-} e^{j(k_2 l)} &= \underline{p}_{3+} \\
 \frac{\underline{p}_{2+} e^{j(-k_2 l)} - \underline{p}_{2-} e^{j(k_2 l)}}{\rho_2 c_2} &= \frac{\underline{p}_{3+}}{\rho_1 c_1} \tag{17.8}
 \end{aligned}$$

Koeficijent transmisije zvučne energije kroz pregradu određen je odnosom incidentnih talasa u prvoj i trećoj sredini.

$$\frac{\underline{p}_{3+}}{\underline{p}_{1+}} = \frac{1}{\cos k_2 l + j \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} - \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \right) \sin k_2 l} \tag{17.9}$$

Pošto koeficijent transmisije predstavlja odnos incidentnih energija onda se može pisati da je:

$$\tau_0 = \left| \frac{\underline{p}_{3+}}{\underline{p}_{1+}} \right|^2 = \frac{1}{\cos^2 k_2 l + \frac{1}{4} \left(\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} - \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \right)^2 \sin^2 k_2 l} \tag{17.10}$$

Posmatrajući izraz 17.10 može se zaključiti da postoje okolnosti kada pregrada uopšte ne izoluje, to jest kada je $\tau_0 = 1$. Taj slučaj će se desiti kada postoji prilagođenje $\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2$.

Drugi slučaj javlja se kada je $k_2 l = n\pi, n = 1, 2, 3, \dots$, to jest kada se javlja rezonanca u materijalu 2 i kada se impedansa koja postoji u $x = 0$ preslikava u impedansu u $x = l$. Ovaj slučaj nije karakterističan za uobičajene građevinske materijale. Na primer ako se posmatra betonska pregrada brzina prostiranja zvuka u betonu je oko 3500 m/s, pa za

debljinu zida od 20 cm najniza rezonanca se javlja na 5500 Hz gde je slabljenje u samom materijalu 2 toliko veliko da će ono odrediti ukupan koeficijent transmisije.

Sa praktičnog stanovišta mnogo je interesantniji slučaj kada je $k_2 l \ll 1$. Tada izraz 17.10 može da se uprosti i postaje:

$$\tau_0 = \left| \frac{p_{3+}}{p_{1+}} \right|^2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} - \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \right)^2 k_2^2 l^2} \quad (17.11)$$

Za početak se može posmatrati normalna incidencija talasa. Ako se prepostavi da je $\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1$ i $\rho_2 l = m_s$ (m_s je površinska masa pregrade u kg/m²) izraz za koeficijent transmisije približno iznosi:

$$\tau_0 \approx \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega m_s}{2\rho c} \right)^2} \quad (17.12)$$

Izolacionu moć pregrade se onda može jednostavno izračunati kao:

$$R_0 = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m_s}{2\rho c} \right)^2 \right] \approx 20 \log \left(\frac{\omega m_s}{2\rho c} \right) \quad (17.13)$$

Izraz 17.13 se naziva "zakon mase". On pokazuje da izolaciona moć pregrade raste sa porastom frekvencije i sa povećanjem površinske mase pregrade. Dvostrukim povećanjem debljine pregrade na svakoj frekvenciji se povećava izolaciona moć za 6 dB, dok povećanjem frekvencije izolaciona moć pregrade raste sa 6 dB/oktavi.

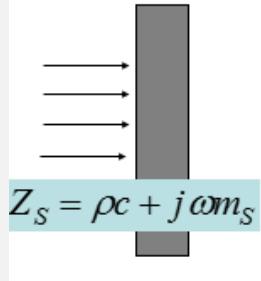
Izraz (17.13) izведен je za slučaj normalne incidencije zvuka. Kada zvučni talas dolazi pod uglom θ normalna komponenta brzine koja je figurisala u prethodnom izvođenju postaje $v \cos \theta$, pa će i izraz za izolacionu moć za talase koji dolaze pod uglom biti promenjena i postaje:

$$R_\theta \approx 20 \log \left(\frac{\omega m_s \cos \theta}{2\rho c} \right) \quad (17.14)$$

Kada se razmatra zvučna izolacija pretpostavlja se da pregradu pogađa difuzno polje u predajnoj prostoriji, to jest da će pregrada biti pogodena sa talasima koji dolaze na nju pod svim uglovima između 0 i $\pi/2$. U difuznom polju verovatnoća pojave pojedinih uglova definisana je funkcijom $\sin 2\theta$. Prema tome, ukupan koeficijent transmisije za sve incidentne uglove biće:

$$\tau = \int_0^{\pi/2} \tau_\theta \sin 2\theta d\theta \quad (17.15)$$

Ukupna izolaciona moć pregrade za sve incidentne uglove određuje se prema formuli (17.6). Izolaciona moć masivne pregrade u funkciji frekvencije za različite površinske mase prikazana je na slici 17.25.



$Z_s = \rho c + j\omega m_s$

Do sličnog rezultata moglo se doći i sledećim rezonovanjem. Pregrada se može modelovati kao element sa koncentrisanim parametrima, s obzirom da je za realne debljine materijala talasna dužina mnogo puta veća od debljine pregrade, tako da unutar pregrade nema procesa prostiranja. Na primer ako je pregrada od betona ($c = 3500 \text{ m/s}$, $\rho_{\text{beton}} = 2300 \text{ kg/m}^3$) za frekvenciju $f = 100 \text{ Hz}$ talasna dužina je $\lambda = 3500/100 = 35 \text{ m}$. To za dva reda veličine prevaziđa normalne debljine betonskih pregrada koje se kreću u rasponu od 10 cm do 30 cm. Impedansa koji vidi talas je $Z_s = \rho c + j\omega m_s$.

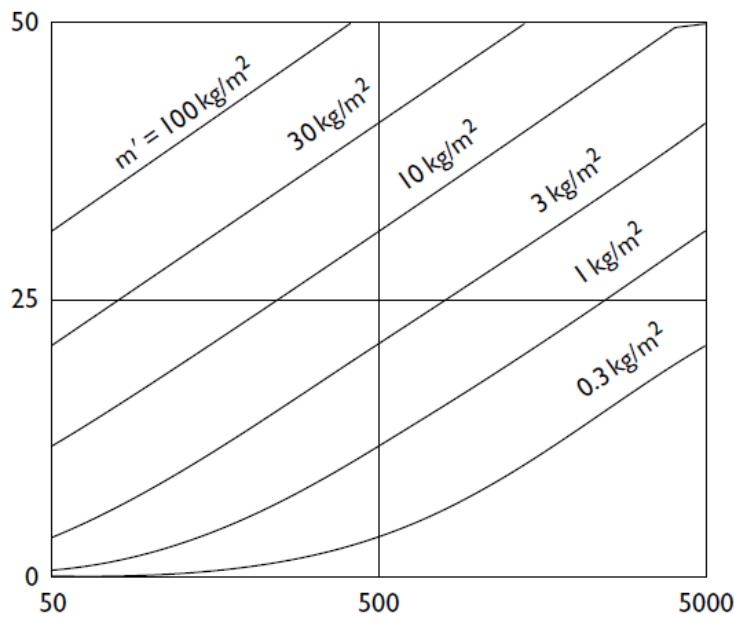
Sa stanovišta sredine iz koje dolazi talas koeficijent apsorpcije α može se uzeti kao mera energije koja je nestala iz te sredine, ondosno kao energije koja se nije reflektovala. Prema tome:

$$\alpha = 1 - |r|^2$$

gde je r koeficijent refleksije. $\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho c}{Z_s + \rho c} \right|^2$

Koeficijent transmisijske je približno:

$$\tau \approx 1 - \left| \frac{Z_s - \rho c}{Z_s + \rho c} \right|^2 \approx \left| \frac{2\rho c}{Z_s} \right|^2 = \left| \frac{2\rho c}{\omega m_s} \right|^2$$



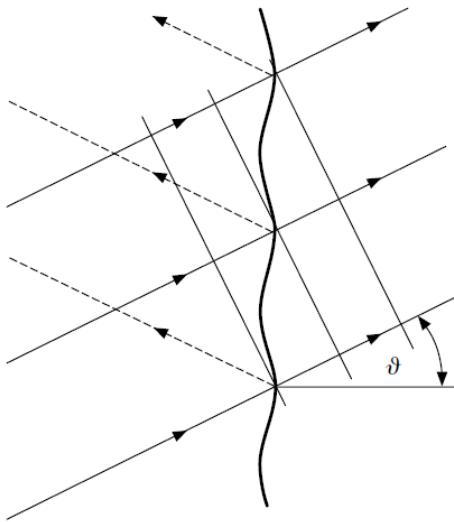
Slika 17.25. Frekvencijska zavisnost izolacione moći jednostrukih pregrada za različite površinske mase pregrade

Zakon mase izведен je pod pretpostavkom da se pregrada ponaša kao kruti klip pobuđen zvučnim poljem. Međutim, pregrada će se tako ponašati samo pri normalnoj incidenciji talasa. Kada je pogađaju zvučni talasi pod nekim uglom, u pregradi se javljaju savijajući ili fleksioni talasi koji imaju svoj uticaj na njenu resultantnu izolacionu moć. Fleksioni talasi imaju brzinu prostiranja koja je zavisna od frekvencije, pa prema tome i talasna dužina fleksionih talasa takođe zavisi od frekvencije. To znači da je pregradu disperzivna sredina za fleksione talase. Za razliku od toga, brzina longitudinalnih talasa u čvrstima materijalima nezavisna je od frekvencije.

Kada talasi nailaze na pregradu pod nekim uglom u njoj će se javiti savijajući talasi šematski prikazani na slici 17.26. Kada se projekcija na površinu pregrade talasne dužine zvučnih talasa u vazduhu poklopi sa talasnom dužinom fleksionih talasa λ_f to jest kada je:

$$\frac{\lambda}{\sin \theta} = \lambda_f$$

u pregradi će se javiti jedna vrsta resonance koja će povećati oscilacije u samoj pregradi. Zbog toga će se izolaciona moć pregrade smanjiti i ona će gotovo bez gubiaka prenosi zvučnu energiju.



Slika 17.26 Fleksioni talasi u krutoj pregradi pri ugaonoj incidenciji zvučnog talasa

Brzina fleksionih talasa u pregradi definisana je obrascem:

$$c_f = \sqrt{1,8 \cdot l \cdot f \cdot c'_m} \quad (17.16)$$

gde je c'_m brzina longitudinalnih talasa u materijalu. Brzina longitudinalnih talasa u čvrstom materijalu određena je gustom materijala ρ_m , Jungovim modulom elastičnosti E i Poasonovim brojem σ koji za standardne građevinske materijale ima vrednost 0,25. Obrazac za izračunavanje brzine longitudinalnih talasa je:

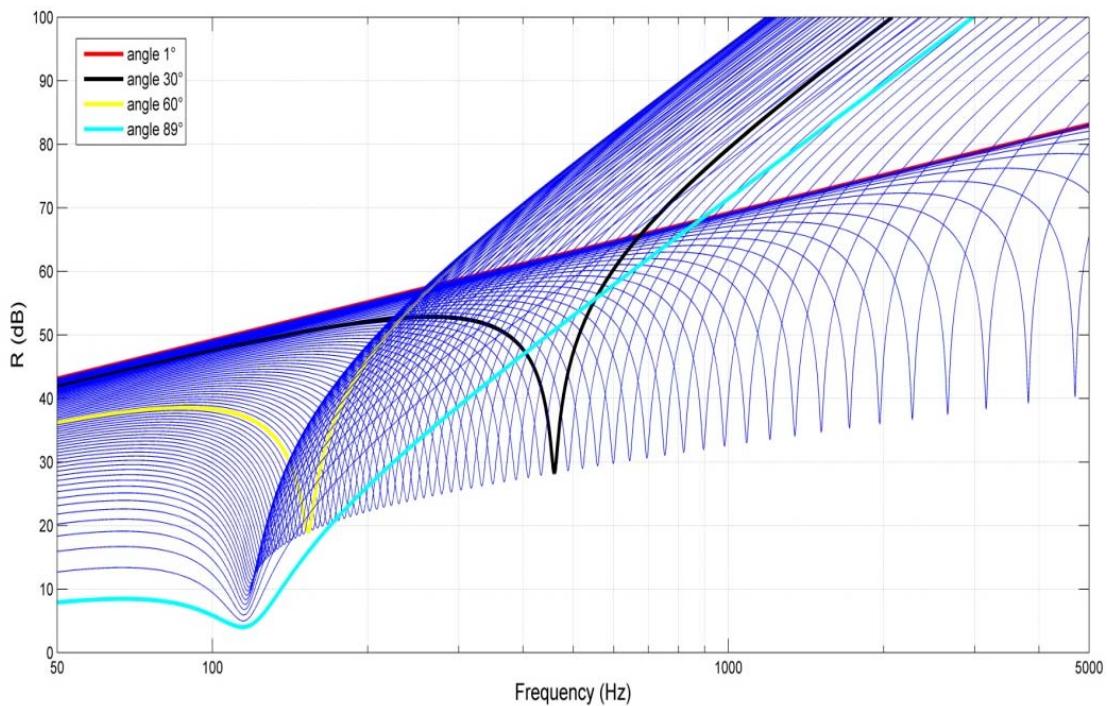
$$c'_m = \sqrt{\frac{E}{\rho_m(1-\sigma^2)}} \approx \sqrt{\frac{E}{\rho_m}} \quad (17.17)$$

Do pojave koincidencije će doći kada je talasna dužina zvuka u vazduhu λ manja od talasne dužine fleksionih talasa λ_f . Taj slučaj će biti uvek kada je brzina fleksionih talasa veća od brzine prostiranja zvuka u vazduhu, što je praktično uvek slučaj.

Najniža frekvencija koincidencije javlja se za ugao $\theta = \pi/2$. Tada je $\lambda_f = \lambda$. Frekvencija koincidencije je tada:

$$f_k = \frac{c^2}{1,8\rho_m l} = \frac{c^2}{1,8l} \sqrt{\frac{E}{\rho_m}} \quad (17.18)$$

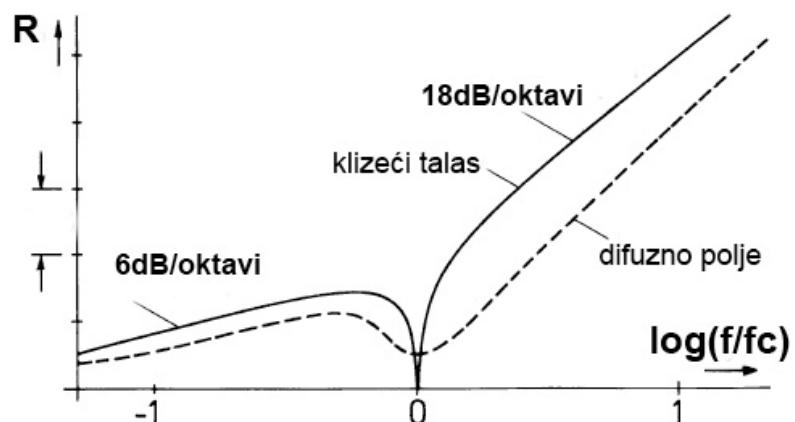
Prema tome, za svaki incidentni ugao postoji neka frekvencija pri kojoj dolazi do pojave incidencije. Ovo je prikazano na slici 17.27.



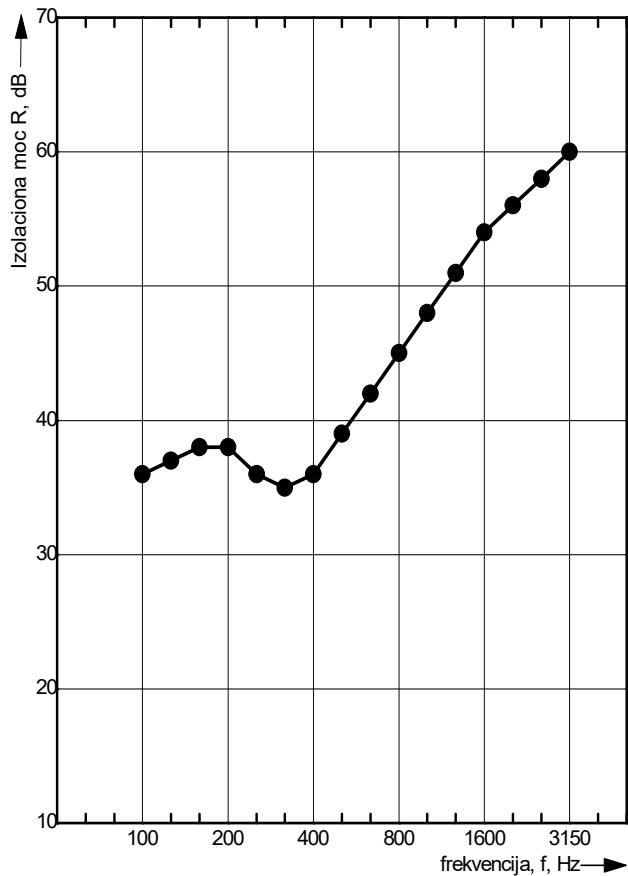
Slika 17.27. Frekvencija koincidencije za različite uglove incidencije

Ukupna izolaciona moć pregrade na svim frekvencijama, kao i u slučaju zakona mase, dobija se sumiranjem ponašanja za sve uglove incidencije. Iako se za različite uglove incidencije koincidencija javlja na različitim frekvencijama, ukupno smanjenje izolacione moći koje je ilustrovano na slici 17.28 biće veoma blisko frekvenciji koincidencije za klizeći ugao incidentnih talasa ($\theta = \pi/2$).

Pojava koincidencije kao posledicu ima smanjenje izolacione moći u okolini frekvencije koincidencije i odstupanje izolacione moći od zakona mase. Zbog toga zakon mase praktično važi samo na frekvencijama ispod frekvencije koincidencije. Nakon toga kriva izolacione moći ima veću strminu.



Slika 17.28. Principijelni oblik krive izolacione moći jednostrukih masivnih pregrada za klizeći talas i difuzno polje



Slika 17.29. Primer izolacione moći realne pregrade dobijen merenjem u laboratorijskim uslovima (jedan zid o opeke)

Kompletno prethodno razmatranje napravljeno je pod pretpostavkom da se radi o tankoj ploči beskonačnih dimenzija. U realnosti pregradni element je konačnih dimenzija i učvršćen na svojim ivicama drugim pregradnim elementima, bočnim zidovima, podom i plafonom. Priroda njihovog spoja i karakteristike tih bočnih elemenata, njihove površinske mase, odrediće izolaciona svojstva pregrade na konkretnoj poziciji u zgradbi. Na slici 17.29 prikazana je kriva izolacione moći jedne realne jednostrukе homogene masivne pregrade.

Proračun zvučne izolovanosti

Izolaciona moć koja je razmatrana u prethodnom poglavlju, dominatno određuje kolika će biti izolovanost jednog prostora od drugog, ili jedne prostorije u odnosu na buku koja postoji u spoljašnjoj sredini. Kada su poznate karakteristike buke u nekoj prostoriji i izolaciona svojstva pregrade koja ih deli može se jednostavno odrediti nivo zvuka koji se može očekivati u susednoj prostoriji.

Zvučna izolovanost dva prostora definisana je izrazom

$$D = 10 \log \frac{J_1}{J_2} = L_1 - L_2 \quad (17.19)$$

Posmatrajući situaciju prikazanu na slici 17.22 kada u predajnoj prostoriji radi izvor Zvuka, u njoj se javlja difuzno zvučno polje srednjeg intenziteta zvuka J_1 . Sve zidove, pa i pregradni, pogađa upadna snaga koje je jednaka (pogledati sliku 12.2 i jednačinu 12.5):

$$P_u = \frac{J_1 S_{12}}{4} \quad (17.20)$$

Za prijemnu prostoriju pregradni zid postaje izvor zvuka. Snaga zračenja tog izvora zvuka određena je upadnom snagom i koeficijentom transmisije zida:

$$P_{a2} = P_u \tau \quad (17.21)$$

Kao posledica rada ovakvog izvora u prijemnoj prostoriji se formira difuzno polje intenziteta J_2 . Ako je u prijemnoj prostoriji ukupna apsoprcija A_2 , onda je:

$$J_2 = \frac{4P_{a2}}{A_2} \quad (17.22)$$

Povezujući prethodne izraze dobijamo da je

$$J_2 = \frac{4P_{a2}}{A_2} = \frac{J_1 S_{12} \tau}{A_2} \quad (17.23)$$

Na osnovu izraza 17.23 dobijamo da je zvučna izolovanost kao:

$$D = 10 \log \frac{J_1}{J_2} = R + 10 \log \frac{A_2}{S_{12}} \quad (17.24)$$

Prema tome, izolovanost dva prostora zavisi od izolacione moći pregradnog elementa, ali i od površine pregrade i apsorpcionih karakteristika prijemne prostorije.

Izolovanost između dve prostorije je veća kada je veća izolaciona moće pregrade, kada je manja površina pregradnog zida i kada je prijemna prostorija prigušena. U slučajevima kada je prijemna prostorija prigušena ne može se prepostaviti da je u njoj formirano difuzno polje sa u kome važi obrazac 17.22. U takvim slučajevima mora se u prijemnoj prostoriji odvojeno posmatrati direktni i reflektovan zvuk. U zonama blizu pregradnog zida intenzitet direktnog zvuka je približno P_{a2} / S_{12} (na nekoj udaljenosti r od zida treba uzeti nešto između P_{a2} / S_{12} i $P_{a2} / 2\pi r^2$). Prema tome, može se smatrati da je:

$$J_2 = J_D + J_R = P_{a2} \left[\frac{1}{S_{12}} + \frac{4(1-\alpha_2)}{A_2} \right] \quad (17.25)$$

Izolovanost je u tom slučaju:

$$D_{\min} = 10 \log \frac{J_1}{J_2} = R - 10 \log \left[\frac{1}{4} + \frac{S_{12}(1-\alpha_2)}{A_2} \right] \quad (17.26)$$

Za jako prigušene prijemne prostorije približno je:

$$D_{\min} = R + 6\text{dB} \quad (17.27)$$

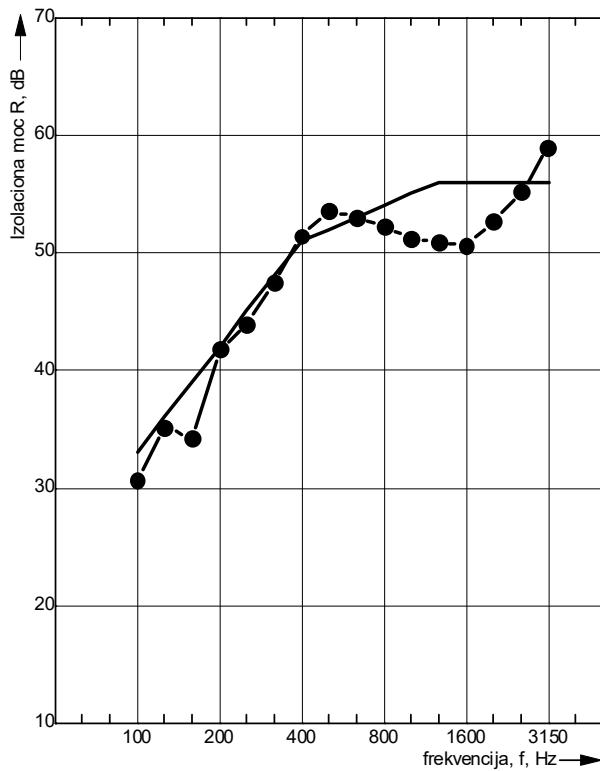
Kada je pregradni zid sastavljen iz delova koji imaju različite izolacione moći onda se ekvivalentna izolaciona moć zida izvodi pod pretpostavkom da je energija koja je pogodila svaki deo pregrade koji imaju različite izolacione moći proporcionalna procentualnoj veličini svakog pojedinačnog dela. U tom slučaju ekvivalentna izolaciona moć se izračunava na sledeći način:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_1 S_1 + \tau_2 S_2 + \tau_3 S_3 + \dots}{S_{\text{tot}}} \quad (17.28)$$

Izražavanje izolacione moći jednim brojem

Izolaciona moć i izolovanost su frekvencijski zavisne veličine. Njihova frekvencijska zavisnost izražava se oktavnim ili 1/3 oktavnim vrednostima. U praksi je pogodno da se za njihovo predstavljanje umesto krive (ili tabele) koristi neki pokazatelj izolacione moći koji se izražava jednim brojem.

Takva jednobrojna vrednost se naziva merodavna (engleski: *weighted*) izolaciona moć i obeležava sa R_w . Ova jednobrojna vrednost dobija se posebnim postupkom u kome se koristi poređenje sa takozvanom standardnom krivom. Na slici 17.30 prikazana je jedna realna kriva izolacione moći i standardna kriva koja se koristi za proračun jednobrojne vrednosti. Izolaciona moć koja bi se poklapala sa standardnom krivom imala bi merodavnu izolacionu moć 52 dB. Tu vrednost standardna kriva ima na frekvenciji 500 Hz. Način proračuna merodavne izolacione moći određen je standardom SRPS ISO717. Algoritam predviđa da se standardna kriva pomera sve dok zbir svih nepovoljnih odstupanja (vrednosti ispod standardne krive) ne bude manji od 32 (za 1/3 oktavne opsege), pri čemu ni jedna pojedinačna vrednost nepovoljnog odstupanja ne sme da bude veća od 8 dB. Standardna kriva se pomera vertikalno u koracima od po 1 dB. Kada se postigne zadati uslov očita se vrednost pomerene standardne krive na frekvenciji 500 Hz i očitani broj se usvaja kao vrednost merodavne izolacione moći.



Slika 17.30 Kriva izolacione moći jedne pregrade i standardna kriva (puna linija) koja služi za izračunavanje jednobrojne vrednosti izolacione moći

Merenje izolacione moći

Proračun terenske izolacione moći kompletne pregradne konstrukcije počiva na poznavanju laboratorijskih izmerenih izolacionih moći svih zidova. Laboratorijske izolacione moći pojedinačnih zidova mere se u za to specijalno napravljenim laboratorijskim prostorima. Takav prostor se od dve prostorije formirane od masivnih zidova, predajne i prijemne. Između njih se ugrađuje zid čija se izolaciona svojstva ispituju. Prostorije se dodato razdvajaju dilatacijom u bočnim konstrukcijama da bi se onemogućio prodor preko putanja bočnog provođenja. Postupak merenja izolacionih svojstava ugrađenog pregradnog zida zasniva se na merenju nivoa zvuka u predajnoj i prijemnoj prostoriji kada se u predajnoj prostoriji nalazi izvor zvuka koji emituje šum dovoljno visokog nivoa.

Za nekoliko pozicija izvora zvuka u predajnoj prostoriji meri se ekvivalentni nivo zvuka (za svaku poziciju izvora meri se u nekoliko prijemnih mernih mesta) i u predajnoj i u prijemnoj prostoriji. Osim toga u prijemnoj prostoriji se meri vreme reverberacije, površina pregradnog zida i svi potrebni podaci da se proceni zapremina prijemne prostorije. Na osnovu izmerenog vremena reverbracije i zapremine prostorije određuje se ukupna apsorpcija prijemne prostorije primenom Sabinovog obrasca:

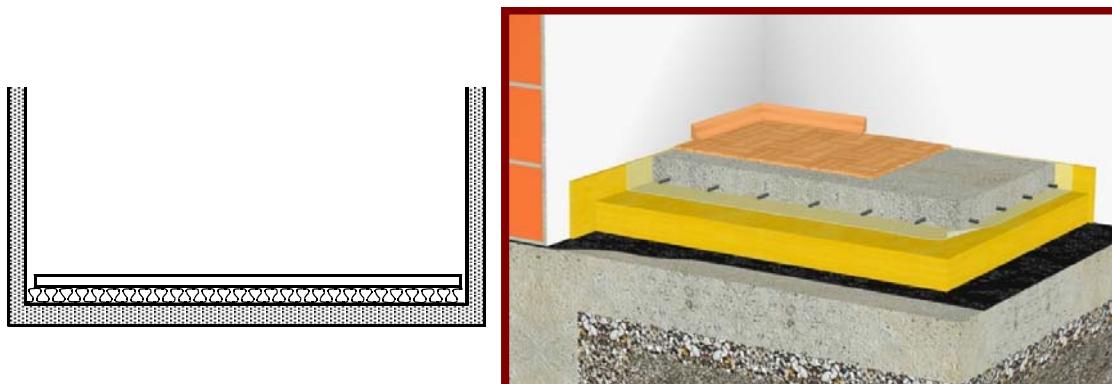
$$A_2 = \frac{0,16V}{T}$$

Primenom formule (17.24) izračunava se izolaciona moć R .

Izolacija od udarnog zvuka

Na početku je slikom 17.20 pokazano da se u zgradama osim vazdušne buke javlja i strukturni zvuk, za koji se u nekim okolnostima koristi naziv udarni zvuk. On nastaje direktnom mehaničkom pobudom građevinskog materijala (poda ili zida). Najčešći izvori strukturne buke u zgradama su koraci, pomeranje predmeta po podu, mašine koje pri radu stvaraju vibracije i preko oslonaca pobuđuju pregrade i slično. Kao i slučaju pobude vazdušnim zvukom, sila koju je materijal primio prostire se kroz materijal u vidu različitih tipova talasa. Za količinu izračene zvučne energije u drugim prostorijama odgovorni su u najvećoj meri fleksioni talasi. Kada je u pitanju izolacija od strukturnog, odnosno udarnog zvuka, otežavajuće okolnosti su što beton i čelik kao najčešći konstruktivni elementi imaju veoma mali faktor prigušenja pa se strukturni zvuk prostire kroz njih sa malim slabljenjem.

Efikasna zvučna izolacija od udarnog zvuka ostvaruje se prevashodno prevencijom, tako što se izvori strukturne buke izoluju na svom izvoru i time spreči ulazak strukturnog zvuka na mestu pobude. Za smanjenje buke izazavane udarnim zvukom na mestu njegovog nastanka u podove se postavlja jedan elastični sloj i dodatna masa oslonjena na taj elastični sloj. Takva konstrukcija se naziva plivajući pod. Na slici 17.31 prikazan je princip postavljanja plivajućeg poda. Elastični sloj sa dodatom masom formira mehanički niskofrekvenčni filter. Ekvivalentna električna šema takvog mehaničkog filtra prikazana je na slici 17.32



Slika 17.31 Plivajući pod prikazan šematski (levo) i način izvođenja (desno)

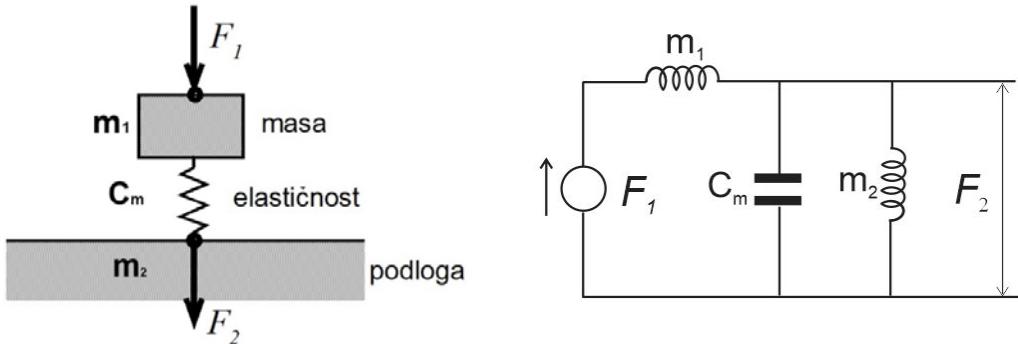
Ako se prepostavi da je izvor strukturnog zvuka mehanička sila F_1 zadatak plivajućeg poda je da sila F_2 koja se prenosi na osnovnu konstrukciju mase m_2 bude minimizirana. Izolacija od udarnog zvuka se definiše kao:

$$L = 20 \log \frac{F_1}{F_2} \quad (17.29)$$

Posmatrajući ekvivalentnu električnu šemu mehaničkog sistema prikazanog na slici 17.32 može se zaključiti da će sila preneta na masu m_2 biti velika u području rezonance

sistema. Zbog toga se rezonanca $\omega_0 = 1/\sqrt{C_m m_1}$ bira da bude što niža. U tom slučaju, smatrajući da je masa osnovne podne konstrukcije m_2 dovoljno velika, iznad frekvencije rezonance odnos pobudne i prenute sile biće:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \quad (17.30)$$



17.32. Mehanički filter plivajućeg poda i njegova ekvivalentna električna šema

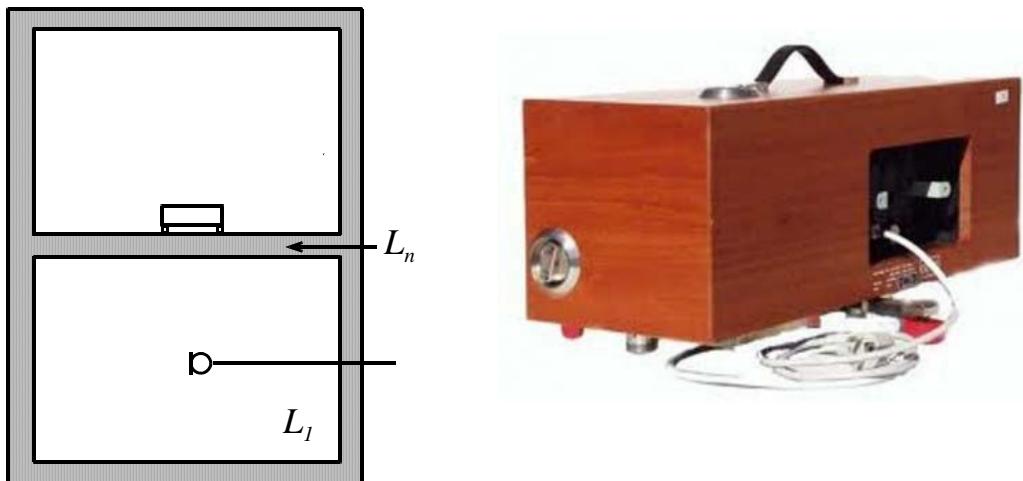
Zvučna izolacija od udarnog zvuka onda iznosi:

$$L = 20 \log \frac{F_1}{F_2} = 20 \log \frac{\omega^2}{\omega_0^2} = 40 \log \frac{\omega}{\omega_0} \quad (17.31)$$

Iz prethodnog obrasca se može zaključiti da izolacija od udanog zvuka iznad rezonance ima porast od 12dB/oktavi. Ovaj teorijski porast izolacije upbičajeno ima neki svoj praktični maksimum zbog dejstva raznih parazitskih pojava koje nisu predstavljene ekvivalentnom šemom.

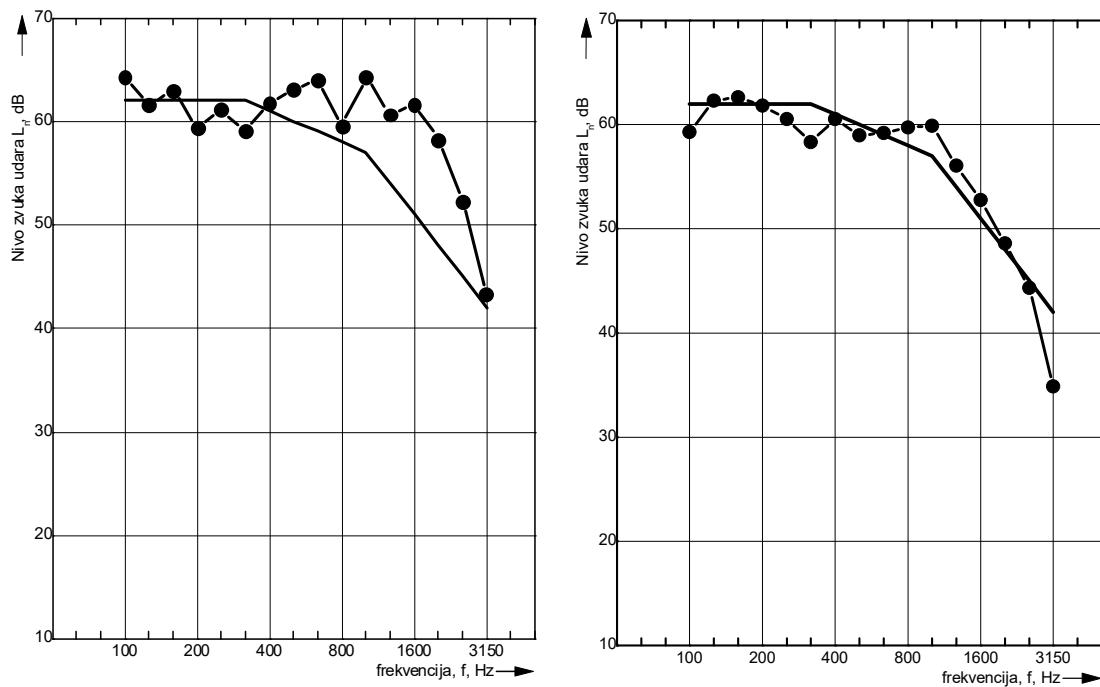
Merenje zvučne izlovanosti od udarnog zvuka

Kod udarnog zvuka nije moguće meriti izolaciona svojstva na isti način kao kod izolacije od vazdušnog zvuka. Kada se meri izolacija od vazdušnog zvuka izračunava se relativna razlika nivoa zvuka koji postoji u predajnoj i prijemnoj prostoriji. U slučaju udarnog zvuka nemoguće je meriti vrednost na strani pobude pošto se radi o mehaničkoj pobudi koja se dešava direktno na površini pregrade. Zato je uveden kalibrirani izvor udarnog zvuka kao pobuda, a meri se samo nivo L1 u prijemnoj prostoriji. Postupak merenja i standardni izvor udarne pobude prikazani su na slici 17.33. Standardni izvor strukturne buke naziva se *tapping* mašina (koristi se i izraz „tapkalica“). Umesto da se meri relativna razlika pobude i prijema, kao kod merenja izolacije od vazdušnog zvuka, predmet merenja je apsolutna vrednost nivoa koji takav standardni izvor mehaničke pobude stvara u prijemnoj prostoriji. Ta vrednost se naziva normalizovani nivo udarnog zvuka L_n .



Slika 17.33 princip merenja izolacije od udarnog zvuka i izgled uređaja za kalibriranu mehaničku pobudu

Kao i u slučaju izolacije od vazdušnog zvuka, i nivo normalizovanog zvuka udara je frekvencijski zavisna veličina. Zbog toga je i za tu veličinu uvedena jednobrojna merodavna vrednost. Merodavni normalizovani nivo zvuka udara računa se na isti način kao i izolacijaona moć od vazdušnog zvuka, to jest poređenjem sa zadatom standardnom krivom. U ovom slučaju bolja izolacija znači da je vrednost normalizovanog nivoa zvuka udara manja, pa se kao nepovoljna odstupanja javljaju premašenja standardne krive. Na slici 17.34 prikazani su rezultati merenja normalizovanog zvuka udara za dve tavanice.



Slika 17.34 Normalizovani nivo zvuka udara za dve tavanice

LITERATURA

- Ahnert, W. a. (1999). *Sound Reinforcement Engineering*. E & FN Spon.
- Alten, S. (n.d.). *Audio in Media*.
- Ando, Y. (2015). *Opera House Acoustics Based on Subjective Preference Theory*. Japan : Springer.
- ANSI S12.2, 1. (n.d.). *American National Standard – Criteria for evaluating room*.
- ANSI S3.5, 1. (n.d.). *American National Standard- Method for calculation of the speech intelligibility index*.
- Atal, B. S. (1598 (1967) .). "Study of sound decay using ray-tracing techniques on a digital computer,". *J. Acoust. Soc. Am.*, 41(6).
- Ballou, G. (1991). *Handbook for sound engineers – The new audio cyclopedia*. Boston: Focal Press.,
- Ballou, G. (2008). *Handbook for sound engineers*. Focal Press.
- Barron, M. (1971). The subjective effects of first reflections in concert halls – the. *J. Sound Vib.* 15, 475.
- Barron, M. (2009). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. New York: Spon Press.
- Bass H.E., S. L. (1995). Atmospheric absorption of sound: Further developments. *J. Acoust. Soc. Am.* 97, 680.
- Beerends, J. I. (1992). A perceptual audio quality measure based on a psychoacoustic sound representation. *Journal of Audio Engineering Society*, vol. 40, No 12, 963-978.
- Begault, D. (1991). Challenges to the successful implementation od 3-D sound. *J. Audio Eng. Soc.* 39, , 864.
- Benson, D. (2007). *Music: A Mathematical offering*. Cambridge CB2 8BS, United Kindom: Cambridge University Press.
- Beranek, L. (2004). *Concert halls and Opera houses*, New York: SPRINGER-VERLAG.
- Beranek, L. L. (2003). Subjective Rank-Orderings and Acoustical Measurements for Fifty-Eight Concert Halls. *Acta Acustica United With Acustica*, Vol. 89, 494-508.
- Blauert, J. (1996). *Spatial Hearing*. Cambridge MA: MIT press.

- Blauert, J. (2005). *Communication Acoustics*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Blauert, J. (2013). *The Technology of Binaural Listening*. New York: Springer.
- Blauert, J. X. (2008). *Acoustics for Engineers, Troy Lectures*. Berlin: Springer-Verlag.
- Borwick, J. (2001). *Loudspeaker and headphones handbook*. Oxford: Focal Press.
- Bruneau, M. a. (2009). *Materials and Acoustics Handbook*. Hoboken,: John Wiley & Sons.
- Bruneau, M. (n.d.). *Materials and Acoustics Handbook*.
- Cheng, C. i. (2001). Introduction to head-related transfer functions (HRTFs): Representation of HRTFs in time, frequency and space. *of Audio Engineering Society*, Vol. 49, No 4, 231-249.
- Chion, M. (1994). *Audio-vision*. New York: Columbia University Press.
- Ćirić, D. (2006). *Doprinos razvoju postupka merenja i obrade impulsnog odziva prostorije pi određivanju akustičkih karakteristika*. Elektronski fakultet u Nišu.
- Ćirić, D. (2017). *Efekti obrade signala na akustička merenja bazirana na impulsnom odzivu*. Niš: Elektronski fakultet u Nišu.
- Cliford, M. (1986). *Microphones*. Blue Ridge Summit: TAB Books Inc.
- Cox, T. D.-I. (2006). A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces. *Acta Acustica united with Acustica* 92, 1, 1.
- Cox, T. J. (2004). *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, design and application*. London: Spon Press.
- Cox, T. J.-I. (2006). A tutorial on scattering and diffusion. *Acta Acust. Acust*, 92(1), 1-15.
- Cremer, L. M. (1973). *Structure-borne sound*. Berlin: Springer.
- Curtis Roads, S. T. (1997). *Musical Signal Processing*. Lisse Netherlands: Swets and Zeitlinger B.V.
- Dalenback, B.-I. (1995). *A new model for room acoustic prediction and auralization*. Gothenburg, Sweden: Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology.
- Dalenbäck, B.-I. (1995). *A new model for room acoustic prediction and auralization*. Gothenburg, Sweden: University of Technology.
- Davis, D. &. (1987). *Sound System Engineering*. Haward W. Sams, Macmillan.
- Davis, D. P. (2013). *Sound System Engineering*. Burlington: Focal Press.
- Davis, G. i. (1989). *The sound reinforcement handbook*. Milwaukee: Hall Leonard Publishing Company.
- Drajić, D. (1982). *Teorija informacija i prenos podataka*. Beograd: Elektrotehnički fakultet.
- Drechsler, S. (2014). An algorithm for automatic geometry simplification for room acoustical simulation based on regression planes. *Acta Acust. Acust*, 100(5), 956-963.

- Dukić, M. (2008). *Principi telekomunikacija*. Beograd: Akademska misao.
- Eargle, J. (1989.). *Handbook of Sound System Design*. ELAR Pub.
- Engineering Acoustics*. (Edition 1.0 30th April 2006). Preuzeto sa http://en.wikibooks.org/wiki/Engineering_Acoustics
- Ermann, M. (2015). *Architectural Acoustics Illustrated*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Fahy, F. &. (1998). *Fundamentals of Noise and Vibration*. E & FN Spon.
- Fahy, F. (2001). *Foundations of Engineering Acoustics*. Academic Press.
- Fastl, H. i. (2007). *Psycho-acoustics*. Berlin: Springer.
- Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics- Facts and Models*. Spronger-Verlag.
- Gaidarov, A. (2002). A problem of efficiency of loudspeakers. *21st Conference Audio Engineering Society* (str. 1-5). St. Petersburg, Russia: Audio Engineering Society.
- Gierlich, H. i. (2001). Processing artificial-head recordings. *Journal of Audio Engineering Society, 111th Convention of AES*, Preprint No 5426.
- Harris, C. M. (1994). *Noise Control In Buildings*. McGraw-Hill.
- Harris, C. M. (1998). *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control*. Acoust. Soc. Am.
- Hartmann, W. (2002). *Signals, sound and sensation*. New York: Springer.
- Hawley, M. J. (1983). *Structure out of sound*. Yale University.
- Hiebert, E. (2014). *The Helmholtz Legacy in Physiological Acoustics*. Heidelberg: Springer.
- Hoffman, I. ., (2003). Halls for Music Performance: Another Two Decades of Experience (1982-2002). *Acoust. Soc. Am.*
- IEC 60268-16:2003. (n.d.). *Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech*.
- IEC 61260:1995. (n.d.). *Electro acoustics – Octave-band and fractional-octave-band filters*.
- IEC 61672-1:2002. (n.d.). *Electro acoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications*.
- ISO 10052:2004. (n.d.). *Acoustics – Field measurements of airborne and impact sound insulation and of service equipment sound – Survey method*.
- ISO 11654:1997. (n.d.). *Acoustics – Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption*.
- ISO 11690-2:1996, P. (n.d.).
- ISO 140-1:1997. (n.d.). *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Requirements for laboratory test facilities with suppressed flanking transmission*.
- ISO 140-14:2004, P. (n.d.). *Guidelines for special situations in the field*.

- ISO 140-2:1991. (n.d.). *Part 2: Determination, verification and application of precision data.*
- ISO 140-3:1995, P. (n.d.). *Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements.*
- ISO 140-4:1998, P. (n.d.). *Field measurements of airborne sound insulation between rooms.*
- ISO 140-5:1998, P. (n.d.). *Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades.*
- ISO 140-6:1998, P. (n.d.). *Laboratory measurements of impact sound insulation of floors.*
- ISO 140-7:1998, P. (n.d.). *Field measurements of impact sound insulation of floors.*
- ISO 17497-1:2004. (n.d.). *Acoustics – Sound-scattering properties of surfaces – Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.*
- ISO 1996-1:2003. (n.d.). *Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 1: Basic quantities and assessment procedures.*
- ISO 1996-2:2007. (n.d.). *Part 2: Determination of environmental noise levels.*
- ISO 226:2003. (n.d.). *Acoustics – Normal equal-loudness-level contours.*
- ISO 266:1997. (n.d.). *Acoustics – Preferred frequencies.*
- ISO 3382-1:2009. (n.d.). *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces.*
- ISO 3382-2:2008. (n.d.). *Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.*
- ISO 354:2003. (n.d.). *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation rooms.*
- ISO 3743-2:1994. (n.d.). *Part 2: Methods for special reverberation test rooms.*
- ISO 532:1975. (n.d.). *Acoustics – Method for calculating loudness level.*
- ISO 717-1:1996. (n.d.). *Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation.*
- ISO 717-2:1996, . (n.d.). *Part 2: Impact sound insulation.*
- ISO 9613-1:1993. (n.d.). *Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.*
- ISO 9613-2:1996. (n.d.). *Part 2: General method of calculation.*
- ISO 9613-2:1996, . (n.d.).
- ISO 9614-1:1993. (n.d.). *Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Part 1: Measurement at discrete points.*
- ISO/TR 25417:2007. (n.d.). *Acoustics – Definitions of basic quantities and terms.*

- ISO/TS 15666:2003. (n.d.). *Acoustics – Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys*.
- Jordan, V. (1980). *Acoustical Design of Concert Halls and Theatres*. Appl. Sci. Pub.
- Jovičić, S. (1999). *Govorna komunikacija – fiziologija, psihologija i percepција*. Beograd: Nauka.
- Kinsler, L. a. (1962). *Findamental of Acoustics*. New York: John Wiley and Sons.
- Kirchner, L. (2007). *Loudspeaker measurement technology*. Braunschweig.
- Kirkeby, O. N. (1998). The “stereo dipole” – a virtual source imaging system using two closely spaced loudspeakers. *J.Audio Eng. Soc.* 46, 583.
- Kirkeby, O. N. (1999). Digital filter design for inversion problems in sound reproduction. *J. Audio Eng. Soc.* 47, 583.
- Kleiner, M. a. (2014). *Acoustics of Small Rooms*. CRC Press.
- Kleiner, M. D.-I. (1993). Auralization—An overview. *J. Audio Eng. Soc.*, 41(11), 861–875.
- Knudsen, V. a. (1950). *Acoustical Design in Architecture*. John Wiley.
- Kotzen, B. a. (1999). *Environmental Noise Barrier*. E & FN Spon.
- Kurtović, H. (1982). *Osnovi tehničke akustike*. Beograd: Naučna knjiga.
- Kuttruff, H. (1995). A simple iteration scheme for the computation of decay constants in enclosures with diffusely reflecting boundaries. *Journal of Acoustical Society of America*, 98(1), 288–293.
- Kuttruff, H. (2007). *Acoustics An introduction*. New York and London: Hirzel Verlag.
- Kuttruff, H. (2009). *Room Acoustics*. Abingdon, Oxon OX14 4RN: Spon Press.
- Kuttruff, H. (98(1), 288–293). A simple iteration scheme for the computation of decay constants in enclosures with diffusely reflecting boundaries,. *J. Acoust. Soc. Am.* , 1995.
- Lawrence, A. (1989). *Acoustics and the Built Environment*. Elsevier Science Pub.
- Leo Beranek, T. M. (2012). *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Oxford: Elsevier.
- Lerch, A. (2012). *An Introduction to Audio Content Analysis*. Piscataway: IEEE Press.
- Lerch, A. (2012). *An Introduction to Audio Content Analysis Applications in Signal Processing and Music Informatics*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Lipshitz, S. i. (1981). The great debate: subjective evaluation. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 29, No 7/8, 482-491.
- Long, M. (2006). *Architectuaral coustics*. Academic Press.
- Lord, P. &. (1996). *Detailing for Acoustics*. E&FN Spon.
- Lord, P. &. (1996). *Detailing for Acoustics*. EFN Spon.

- Lube, J. v. (1997). *Information theory*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Marinković, P. (2017). *Fizika 1*. Beograd: Autorsko izdanje.
- Mark Tatham, K. M. (2005). *DEVELOPMENTS IN SPEECH SYNTHESIS*. West Sussex, England: John Wiley & Sons.
- Mark, K. (2002). *Applications of digital signal Processing to Audio and Acoustics*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. Burlington,: Elsevier Academic Press.
- Matusiak, G. P. (2010). The Fundamentals of Loudspeaker Radiation and Acoustic Quality. *Audio Engineering Society, 128th Convention* (str. 1-36). london, UK: AES.
- Merhaut, J. (1981). *Theory of Electroacoustics*. McGraw-Hill.
- Merricks, N. (n.d.). Loudspeaker Impedance Analysis. *MICROPHONES & LOUDSPEAKERS* (str. 82-88). UK: Audio Engineering Society.
- Meyer, J. (2009). *Acoustics and the Performance of Music, Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instruments Makers*. Springer.
- Mijić, M. (2010). *Audio sistemi*. Beograd: Akadembska misao.
- Mijic, M. M. (2009). Statistical properties of music signals. *126th Convention of AES*, (str. 7702).
- Mommertz, E. (2009). *Acoustics and Sound Insulation, Principles, Planing, Examples*. Munich: Institut für internationale.
- Montgomery, D. i. (2003). *Applied statistics and probability for engineers*. New York: John Wiley and Sons.,
- Moore, B. (2012). *An introduction to the Psychology of Hearing*. London: Emerald Group Publishing.
- Naylor, G. (1993). Odeon—another hybrid room acoustical model. *Applied acoustic*, 38,131-143.
- Nelson, P. &. (1992). *Active control of sound*. Academic Press.
- Olson, H. (1940). *Elements of Acoustical Engineering*. van Nostrand,.
- Pierce, A. (1981). *Acoustics – An introduction to its physical principles and applications*. New York: McGraw-Hill.
- Pohlmann, K. (2005). *Principles of digital audio*. New York: MsGraw-Hill.
- Pulkki, V. a. (2015). *Communication Acoustics, An introduction to speech, Audio and Psychoacoustics*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- R.Chudley, R. G. (2008). *BuildingConstruction Handbook*. Oxford, UK: Elsevier.
- Rayleigh, J. W. (1945). *The Theory of Sound*,. New York,: Dover Publications.
- Rossing, T. D. (2007). *Springer handbook of Acoustics*. New York: Springer.

- Rumsey, F. (2013 November). Loudspeakers and headphones, The highs and the lows. *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 61, No. 11, 934-938.
- Sabine, W. C. (1922). "Theater acoustic," in *Collected Papers on Acoustics*. New York: Harvard University Press.
- Sabine, W. C. (1922). *Collected Papers on Acoustics*. Cambridge: Harvard University Press.
- Savioja, L. a. (2015). Lauri Savioja, and U. Peter Svensson. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138, 708 .
- Schnupp, J. N. (2011). *Auditory Neuroscience: Making Sense of Sound*. Cambridge, Massachusetts: The MIT press.
- Schroeder, M. (1973). Computer models for concert hall acoustics. *Am. J. Phys.*, 41, 461-471 .
- Schroeder, M. R. (1970). Digital simulation of sound transmission in reverberant spaces,. *Journal of Acoustical Society of America*, 47[2(Part 1)], 424-431 .
- Schroeder, M. R. (1973). Computer models for concert hall acoustics. *Am. J. Phys.*, 461-471.
- Shinn-Cunningham, B. L. (2007). A sound element gets lost in perceptual competition. *PNAS*, Vol. 104, No. 29, 12223-12227.
- Strong, J. (2010). *Theatre Buildings a Design Guide*. New Zork: Taylor & Francis e-Library,
- Stuart, J. R. (2006). ACTIVE LOUDSPEAKERS. *AUDIO AT HOME – AES 21ST*, (str. 14.1-14.15).
- Ureda, M. (2001). J and spiral line arrays. *111th Convention of AES*, (str. Convention paper 5485).
- Ureda, M. (2001). Line arrays: Theory and application. *110th Convention of AES*, (str. Convention paper 5304).
- Ureda, M. (2002). Pressure response of line sources. *113th Convention of AES*, (str. Convention paper 5649).
- V. Valimaki, J. P. (2012). Fifty years of artificial reverberation. *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Proc.*, 20(5), 1421-1448.
- Välimäki, V. .. (2012). Fifty years of artificial reverberation,. *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Proc.*, 20(5), 1421-1448 .
- Ver, I. a. (2006). *Noise and Vibration Control Engineering*. Hoboken: John Wiley and Sons.
- Vorlander, M. (1995). International round robin on room acoustical computer simulations. *Proceedings of the 15th International Congress on*, (str. 689-692). Trondheim, Norway.
- Vorlander, M. (2007). *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms, and Acoustic Virtual Reality*. Berlin, Germany,: Springer-Verlag.

- Vorlander, M. (2013). Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties. *JASA*, 1203-1213.
- W., Y. (2013). *Fundamentals of Hearing, An Introduction*. Brill Academic Pub.
- Yoichi, A. (2015). *Opera House Acoustics Based on Subjective Preference Theory*. Tokyo: Springer.
- Yost, W. i. (1985). *Fundamentals of hearing*. New York: Holt, Rinehard and Winston.
- Zwicker, E. a. (1965,vol. 72,). A model for loudness summation,. *Psych. Rev*, 3-26.