



VIŠOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA



OSNOVI AKUSTIKE

DRAGAN DRINČIĆ · PETAR PRAVICA · DRAGAN NOVKOVIĆ

BEOGRAD, MMXVIII

Dragan Drinčić
Petar Pravica
Dragan Novković

Osnovi akustike

Autori

Dragan Drinčić

Petar Pravica

Dragan Novković

OSNOVI AKUSTIKE

Recenzenti

dr Vlado Delić, redovni profesor FTN, Univerzitet u Novom Sadu

dr Sonja Krstić, profesor strukovnih studija VIŠER, Beograd

Tehnička obrada i dizajn korica

Vladimir Cerić

Izdavač

Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd

Štampa

Razvojno-istraživački centar grafičkog inženjerstva TMF, Beograd

ISBN

978-86-7982-283-3

Tiraž

20 primeraka

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

534(075.8)(076)

ДРИНЧИЋ, Драган, 1951-
Osnovi akustike / Dragan Drnčić, Petar Pravica,
Dragan Novković. - Beograd : Visoka škola
elektrotehnike i računarstva strukovnih studija,
2018 (Beograd : Razvojno-istraživački centar
grafičkog inženjerstva TMF). -

III, V, 396 str. : ilustr. ; 25 cm

Tiraž 20. - Bibliografija uz svako poglavlje. -
Registar.

ISBN 978-86-7982-283-3

1. Правица, Петар, 1931- [аутор] 2. Новковић,
Драган, 1972- [аутор]

а) Акустика

COBISS.SR-ID 264472076

Dragan Drinčić
Petar Pravica
Dragan Novković

Osnovi akustike



**Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija
Beograd, MMXVIII**

Predgovor

Akustika, kao deo fizike, je nauka koja se bavi problemima nastajanja, prostiranja i prijema zvuka. Sadržaj ovog udžbenika je prilagođen programu predmeta Osnovi akustike, koji se na prvoj godini studija sluša na studijskom programu Audio i video tehnologije na Visokoj školi elektrotehnike i računarstva u Beogradu. Namera autora je bila da ovaj udžbenik posluži i studentima drugih visokih škola i fakulteta, koji se prvi put sreću sa zvukom i sa njegovom primenom u najrazličitijim oblastima nauke i tehnike.

Konstatujemo samo da se saznanja o zvuku danas sve više koriste u najrazličitijim oblastima tehnike, fizike, biologije, medicine i drugih nauka. Nadamo se da će pojmovi i objašnjenja izloženi u ovom udžbeniku biti od koristi i svim onima koji se u svom radu susreću sa problemima vezanim za zvuk i njegovo korišćenje u praksi.

U udžbeniku je učinjen pokušaj da se na elementaran način obrade brojne teme u kojima je zvuk osnovni faktor. Tako se, kroz dvanaest poglavlja, opisuju osnovi fizičke akustike, akustike prostorijske, fiziološke akustike, analize i sinteze govora, buke i zaštite od nje, kao i najosnovniji elementi iz oblasti elektroakustičkih pretvarača (akustičko-mehaničke analogije, mikrofoni, zvučnici, slušalice). Bilo je neophodno obuhvatiti i oblasti koje se odnose na ultrazvuk, muzičku akustiku i audio forenziku.

Pri izlaganju pojedinih oblasti i problema akcenat je stavljen na fizičku interpretaciju, dok je matematički aparat sveden samo na neophodne izraze. Izvođenje obrazaca i matematička podrška su dati u minimalnoj meri.

Na kraju svakog poglavlja, navedena je i dosta obimna literatura, koja čitaocima može biti od koristi.

Prvo poglavlje je fizička akustika, što je i opravdano, zbog uvođenja specifičnih pojmova i veličina. Definisani su: zvučni talasi, zvučni pritisak i intenzitet zvuka, nivo zvuka, brzina zvuka, frekvencija, period i talasna dužina, akustička snaga, kao i neke prateće veličine. Slabljenju zvuka pri prostiranju, difrakciji i refrakciji je takođe posvećena određena pažnja. Tu su i drugi pojmovi koji prate prostiranje zvučnih talasa, kao što su: refleksija, difuzija i apsorpcija zvuka, superponiranje, interferencija i izbijanje zvučnih

talasa. Takođe su objašnjeni pojmovi stojećih talasa i rezonansi, Doplerov efekat i udarni talas.

Tema drugog poglavlja je Akustika prostorija, u kojem su uvedeni i objašnjeni pojmovi: apsorpcija prostorije, vreme reverberacije, intenzitet zvuka u prostoriji i apsorberi zvuka. Dalje se govori o uticaju geometrije prostorije na njene akustičke karakteristike, izračunavanju i merenju vremena reverberacije, merenju koeficijenta apsorpcije materijala, i analizi zvučnog polja u prostoriji. Posebno je objašnjen pojam spregnutih prostorija sa neophodnim primerima.

Treće poglavlje obrađuje probleme fiziološke i psihološke akustike kao i neke elemente akustičke fonetike. Detaljno je obrađen organ čula sluha, čujno područje uva, kao i način merenja subjektivne jačine zvuka. Takođe su obrađeni pojmovi maskiranja, lokalizacije izvora zvuka i efekat prvenstva. Posebna pažnja je posvećena akustičkim svojstvima govora.

U novije vreme se sve više pažnje posvećuje buci i problemima koje ona stvara, što je tema četvrtog poglavlja. U ovom poglavlju se govori o izvorima buke, podeli buke, deskriptorima i merenju buke, kao i kriterijumima za procenu njenog štetnog dejstva. Širenje buke i odbrana od nje su takođe pitanja koja obuhvata ovo poglavlje.

Kao prelaz ka elektroakustičkim pretvaračima, u sledećem petom poglavlju se uvode analogije. Tu se govori o elementima akustičkih i mehaničkih sistema i njihovim analogijama sa elementima električnih kola. Ovaj postupak omogućava rešavanje problema u složenim akustičkim i mehaničkim sistemima metodama koje se koriste u elektrotehnici, što se široko primenjuje u proučavanju elektroakustičkih pretvarača.

Četiri naredna poglavlja (šesto, sedmo, osmo i deveto) posvećena su elektroakustičkim pretvaračima. U njima se govori o mikrofonicima, zvučnicima, zvučničkim skretnicama i slušalicama. Poznavanje karakteristika i principa rada, njihove konstrukcije i određenih specifičnosti elektroakustičkih pretvarača, su veoma bitni za bilo kakvo praktično rešavanje problema u akustici i audiotehnici. Zato je elektroakustičkim pretvaračima posvećena posebna pažnja, dati su brojni primeri i navedeni načini korišćenja u praksi. Iz tog razloga ova četiri poglavlja nose više od trećine (preko 150 stranica) ukupnog teksta udžbenika.

Poslednja tri poglavlja odnose se na specifične oblasti akustike. To su: muzička akustika, ultrazvuk i audio forenzika. Bilo je neophodno o njima reći bar najosnovnije, jer se ove oblasti razvijaju sve više i čine važan deo akustike.

U poglavlju o muzičkoj akustici je dat kratak pregled nastanka ove oblasti akustike čiji koreni se nalaze još u Staroj Grčkoj. Ukratko je opisan princip rada pojedinih muzičkih instrumenata kao i nastanak i razvoj muzičkih skala.

Ultrazvuk obuhvata problematiku sve više vezanu za praktična tehnička rešenja, i industriji, posebno u podvodnoj akustici, i medicinskoj dijagnostici i terapiji. U ovom poglavlju su u najkraćim crtama obrađeni generatori ultrazvuka, osobine i dejstva ultrazvuka, kao i njegova primena.

Audio forenzika je nova oblast akustike, koja za utvrđivanje istine o nekom događaju koristi analizu zvučnih zapisa. To se u praksi svodi na prepoznavanje govornika, odnosno utvrđivanje identiteta osobe na bazi njenog glasa. U ovom poglavlju su ukratko objašnjeni metodološki postupci u forenzičkoj audio analizi kao i mogućnosti automatskog forenzičkog prepoznavanja.

Autori žele da izraze posebnu zahvalnost upravi Visoke škole elektrotehnike i računarstva u Beogradu i kolegama koji su svesrdno podržali ideju o štampanju ove knjige. Najtoplije se zahvaljujemo recezentima prof. dr Vladu Deliću i dr Sonji Krstić, profesoru visoke škole, na mnogim korekcijama i sugestijama koje su doprinele da udžbenik dobije konačnu formu. Takođe dugujemo zahvalnost Vladimiru Ceriću za pažljivu tehničku obradu knjige.

Autori su svesni da je u ovom izdanju udžbenika svakako ostalo propusta i greški, pa će biti zahvalni svim čitaocima koji im na njih ukažu.

U Beogradu,
maja, 2018.

Autori

Sadržaj

FIZIČKA AKUSTIKA		1
1.1	UVOD	1
1.2	PRIRODA ZVUKA	1
1.3	PRENOŠENJE ZVUKA	2
1.4	ZVUČNI TALASI	3
1.5	ZVUČNI PRITISAK	6
1.6	BRZINA ZVUKA	7
1.7	FREKVENCIJA, PERIOD I TALASNA DUŽINA ZVUKA	9
1.8	AMPLITUDA I FAZA ZVUČNOG TALASA	11
1.9	AKUSTIČKA SNAGA IZVORA ZVUKA	12
1.10	INTENZITET ZVUKA	12
1.11	GUSTINA AKUSTIČKE ENERGIJE	14
1.12	NIVO ZVUKA	14
1.13	UGAO ZRAČENJA I USMERENI ZVUČNI IZVORI	16
1.14	SPEKTAR ZVUKA - PROST I SLOŽEN ZVUK	17
1.15	ISTOVREMENO ZRAČENJE VIŠE IZVORA	20
1.16	SLABLJENJE ZVUKA PRI PROSTIRANJU U OTVORENOM PROSTORU	21
1.17	DIFRAKCIJA ZVUKA	22
1.18	REFRAKCIJA ZVUKA	26
1.19	REFLEKSIJA ZVUKA	27
1.20	DIFUZIJA ZVUKA	28
1.21	APSORPCIJA ZVUKA	29
1.22	PRINCIP SUPERPOZICIJE ZVUČNIH TALASA	30
1.23	INTERFERENCIJA ZVUČNIH TALASA	31
1.24	IZBIJANJE	34
1.25	STOJEĆI TALASI I REZONANSE	36
1.26	DOPLEROV EFEKT	39
1.27	UDARNI TALAS I PRASAK	40
1.28	PITANJA ZA PROVERU ZNANJA	44
1.29	LITERATURA	44
AKUSTIKA PROSTORIJA		47
2.1	UVOD	47
2.2	ZVUČNO POLJE U PROSTORIJAMA	47
2.3	APSORPCIJA PROSTORIJE	49
2.4	VREME REVERBERACIJE	50
2.5	INTENZITET ZVUKA U PROSTORIJI	54

2.6	APSORBERI ZVUKA -----	55
2.7	IZMERENE VREDNOSTI APSORPCIJE MATERIJALA -----	59
2.8	GEOMETRIJSKI OBLIK PROSTORIJE -----	60
2.9	MERENJE VREMENA REVERBERACIJE -----	63
2.10	PRORAČUN VREMENA REVERBERACIJE -----	64
2.11	MERENJE KOEFICIJENTA APSORPCIJE -----	66
2.12	AKUSTIČKI SPREGNUTE PROSTORIJE -----	67
2.13	ANALIZA ZVUČNOG POLJA U PROSTORIJAMA -----	69
2.14	PITANJA ZA PROVERU ZNANJA. -----	71
2.15	LITERATURA -----	71
FIZIOLOŠKA I PSIHOLOŠKA AKUSTIKA SA ELEMENTIMA		
AKUSTIČKE FONETIKE -----		73
3.1	UVOD -----	73
3.2	ČULO SLUHA -----	74
3.3	PERCEPCIJA KVALITETA ZVUKA -----	83
3.4	ČUJNO PODRUČJE UVA -----	95
3.5	MERENJE SUBJEKTIVNE JAČINE ZVUKA -----	96
3.6	MASKIRANJE -----	98
3.7	LOKALIZACIJA IZVORA ZVUKA -----	101
3.8	EFEKAT PRVENSTVA -----	103
3.9	AKUSTIČKA SVOJSTVA GOVORA -----	104
3.10	PITANJA ZA PROVERU ZNANJA -----	114
3.11	LITERATURA -----	115
BUKA -----		117
4.1	UVOD -----	117
4.2	PODELA BUKE -----	118
4.3	IZVORI BUKE -----	120
4.4	DESKRIPTORI BUKE -----	121
4.5	MERENJE BUKE -----	128
4.6	ŠTETNA DEJSTVA BUKE -----	130
4.7	KRITERIJUMI ZA PROCENU ŠTETNOG DEJSTVA BUKE -----	131
4.8	ŠIRENJE BUKE -----	136
4.9	ODBRANA OD BUKE -----	140
4.10	PITANJA ZA PROVERU ZNANJA -----	143
4.11	LITERATURA -----	144
ANALOGIJE -----		147
5.1	UVOD -----	147
5.2	ELEMENTI AKUSTIČKIH SISTEMA -----	148
5.3	ELEMENTI MEHANIČKIH SISTEMA -----	151
5.4	PREGLED ANALOGNIH VELIČINA -----	152

5.5	EKVIVALENTNE ŠEME AKUSTIČKIH I MEHANIČKIH SISTEMA	152
5.6	PRIMERI AKUSTIČKIH SISTEMA-----	154
5.7	PRIMERI MEHANIČKIH SISTEMA-----	156
5.8	SPREGA AKUSTIČKIH I MEHANIČKIH SISTEMA -----	157
5.9	SPREGA ELEKTRIČNIH I MEHANIČKIH SISTEMA -----	158
5.10	PITANJA ZA PROVERU ZNANJA-----	158
5.11	LITERATURA-----	159
MIKROFONI-----		161
6.1	UVOD-----	161
6.2	OSNOVNE KARAKTERISTIKE MIKROFONA-----	162
6.3	PODELA MIKROFONA-----	168
6.4	PRESIONI MIKROFONI-----	170
6.5	GRADIJENTNI MIKROFON -----	171
6.6	KOMBINOVANI MIKROFONI-----	174
6.7	UTICAJ OBLIKA I DIMENZIJA MIKROFONA NA NJEGOVE KARAKTERISTIKE-----	176
6.8	USMERENOST MIKROFONA I DIFUZNO ZVUČNO POLJE -----	179
6.9	UGLJENI MIKROFON -----	180
6.10	ELEKTRODINAMIČKI MIKROFONI SA KALEMOM -----	182
6.11	ELEKTRODINAMIČKI MIKROFON SA TRAKOM-----	186
6.12	PIEZOELEKTRIČNI MIKROFON -----	189
6.13	KONDENZATORSKI MIKROFONI -----	192
6.14	ELEKTRET MIKROFONI-----	196
6.15	PRETPOJAČAVAČI ZA KONDENZATORSKE I ELEKTRET MIKROFONE-----	199
6.16	PITANJA ZA PROVERU ZNANJA-----	201
6.17	LITERATURA-----	202
ZVUČNICI-----		203
7.1	UVOD-----	203
7.2	PODELA ZVUČNIKA -----	203
7.3	OSNOVNE KARAKTERISTIKE ZVUČNIKA -----	204
7.4	KONSTRUKCIJA ELEKTRODINAMIČKOG ZVUČNIKA -----	208
7.5	MEMBRANE ZVUČNIKA-----	211
7.6	IZOBLIČENJA U MAGNETNOM SKLOPU ZVUČNIKA-----	219
7.7	UGRAĐIVANJE ZVUČNIKA -----	222
7.8	ZVUČNIČKI SISTEMI SA ZVUČNIKOM U PLOČI -----	226
7.9	ZVUČNIČKI SISTEMI SA ZATVORENOM KUTIJOM -----	228
7.10	ZVUČNIČKI SISTEMI SA BAS-REFLEKS KUTIJOM-----	230
7.11	ZVUČNIČKI SISTEMI SA PASIVNIM RADIJATOROM -----	235
7.12	ZVUČNIČKI SISTEM SA SPREGNUTIM KOMORAMA -----	236
7.13	KARAKTERISTIKE USMERENOSTI ZVUČNIČKIH SISTEMA SA DIREKTNIM ZRAČENJEM -----	238

7.14	ZVUČNIČKI SISTEMI SA LEVKOM-----	240
7.15	LEVKOVI ZA SREDNJE I VISOKE FREKVENCije-----	247
7.16	ZVUČNIČKE GRUPE-----	253
7.17	PITANJA ZA PROVERU ZNANJA-----	256
7.18	LITERATURA-----	257
ZVUČNIČKE SKRETNICE-----		261
8.1	UVOD-----	261
8.2	ELEKTRIČNI FILTRI-----	261
8.3	PRIMENA I OSNOVNI TIPOVI ZVUČNIČKIH SKRETNICA-----	264
8.4	DVOPOJASNE SKRETNICE-----	266
8.5	TROPOJASNE SKRETNICE-----	271
8.6	PRAKTIČNA REALIZACIJA ZVUČNIČKIH SKRETNICA-----	273
8.7	PITANJA ZA PROVERU ZNANJA-----	278
8.8	LITERATURA-----	279
SLUŠALICE-----		281
9.1	UVOD-----	281
9.2	OSNOVNE KARAKTERISTIKE SLUŠALICA-----	282
9.3	VRSTE SLUŠALICA-----	282
9.4	FREKVENCIJSKA KARAKTERISTIKA SLUŠALICA-----	284
9.5	ELEKTRODINAMIČKE SLUŠALICE-----	288
9.6	ELEKTROSTATIČKE SLUŠALICE-----	293
9.7	PLANARNE MAGNETNE SLUŠALICE-----	296
9.8	ELEKTROMAGNETNE SLUŠALICE-----	298
9.9	PIEZOELEKTRIČNE SLUŠALICE-----	300
9.10	SLUŠALICE ZA REDUKCIJU BUKE-----	301
9.11	RAZLIKE I SLIČNOSTI IZMEĐU SLUŠALICA I ZVUČNIKA-----	314
9.12	PITANJA ZA PROVERU ZNANJA-----	316
9.13	LITERATURA-----	317
MUZIČKA AKUSTIKA-----		319
10.1	UVOD-----	319
10.2	ISTORIJA RAZVOJA MUZIČKE AKUSTIKE-----	319
10.3	MUZIČKE SKALE-----	327
10.4	PITANJA ZA PROVERU ZNANJA-----	329
10.5	LITERATURA-----	329
ULTRAZVUK-----		331
11.1	UVOD-----	331
11.2	GENERATORI ULTRAZVUKA-----	331
11.3	OSOBINE I DEJSTVA ULTRAZVUKA-----	334
11.4	PRIMENA ULTRAZVUKA-----	334
11.5	PITANJA ZA PROVERU ZNANJA-----	337

11.6	LITERATURA-----	337
AUDIO FORENZIKA -----		339
12.1	UVOD-----	339
12.2	KRATAK ISTORIJSKI PREGLED -----	339
12.3	OSNOVNA POLJA PRIMENE AUDIO FORENZIKE-----	341
12.4	GOVOR KAO SREDSTVO KOMUNIKACIJE -----	342
12.5	PERCEPCIJA GOVORA-----	352
12.6	PROVERA AUTENTIČNOSTI SNIMAKA -----	355
12.7	POBOLJŠANJE KVALITETA FORENZIČKIH AUDIO SNIMAKA ---	364
12.8	FORENZIČKA TRANSKRIPCija-----	370
12.9	PREPOZNAVANJE GOVORNIKA -----	371
12.10	LABORATORIJE ZA AUDIO FORENZIKU -----	386
12.11	SPECIFIČNI PRIMERI PRIMENE AUDIO FORENZIKE -----	388
12.12	PITANJA ZA PROVERU ZNANJA-----	389
12.13	LITERATURA-----	390
INDEKS POJMOVA-----		393

Fizička akustika

1.1 Uvod

Osnovni cilj ovog poglavlja je da se na što jasniji i precizniji način, pre svega, definišu fizičke veličine koje su relevantne za nastajanje, prostiranje i prijem zvučnih talasa. Tako se u prvom delu poglavlja govori o prirodi zvuka i nastajanju i prostoranju zvučnih talasa da bi se potom pristupilo objašnjenju pojedinih veličina (zvučni pritisak, brzina zvuka, frekvencija, period i talasna dužina, amplituda i faza, snaga, usmerenost i ugao zračenja zvučnog izvora, intenzitet i nivo zvuka) karakterističnih za zvučne pojave. Zatim su definisani prost i složen zvuk, i objašnjeni uslovi koji nastaju pri jednovremenom zračenju više izvora zvuka.

U drugom delu ovoga poglavlja govori se o slabljenju zvuka pri prostiranju u otvorenom prostoru kao i pojavama koje prate prostiranje zvuka u prirodi (difrakcija, refrakcija, refleksija, difuzija, apsorpcija). Na kraju su objašnjene pojave interferencije i izbijanja zvučnih talasa, nastajanje stojećih talasa, Doplerovog efekta i udarnih talasa.

U celini ovo, prvo poglavlje, treba da bude prvi korak ka pručavanju pojava koje prate nastajanje i prostiranje zvučnih talasa, pre svega u vazduhu, a zatim i u drugim sredinama.

1.2 Priroda zvuka

Zvuk ima dvojni prirodu i može se posmatrati kao fizički vremenski promenljivi poremećaj neke elastične sredine ili kao subjektivni, psihofizički osećaj, nastao usled stimulacije akustičkog centra u mozgu pomoću nervnih impulsa. Čulo sluha određuje kvalitet zvučnog signala, ali zvuk se prenosi do uha putem fizičkih nadražaja.

U užem smislu reči, pod zvukom podrazumevamo sve ono što čujemo, odnosno što osećamo sluhom. Ovakva definicija je svakako nepotpuna, jer ne obuhvata zvukove koje čulo sluha ne može percipirati, a takođe ne objašnjava ni fizičku prirodu zvuka.

Ako zvuk posmatramo kao fizičku pojavu onda možemo reći da se radi o vibracijama u gasovitim, tečnim i čvrstim elastičnim sredinama. Takođe možemo reći da zvuk predstavlja ritmičko oscilovanje molekula koje u njihov ravnotežni položaj vraćaju međumolekulske sile [3].

Preduslov za takvu oscilatornu pojavu je masa molekula, odnosno čestica koje osciluju i učestvuju u kretanju svojom inercijom, i postojanje unutrašnjih elastičnih sila koje teže da sredinu vrate u početno stanje kakvo je bilo pre deformacije. Zato se mehaničke oscilacije koje čine zvuk mogu javljati u gasovima, tečnostima i čvrstim telima. Zvuk ne može postojati u vakuumu, jer nema mase koja bi mehanički oscilovala, i u amorfnim telima, jer nema unutrašnjih elastičnih sila da vraćaju sredinu u početno stanje nakon nastanka deformacije [19].

1.3 Prenosenje zvuka

Promene fizičkog stanja sredine (gde ćemo se za sada ograničiti na vazduh) ispoljavaju se bilo u kretanju čestica (pri čemu se može posmatrati njihov pomeraj, brzina i ubrzanje) bilo u promeni njene gustine ili pritiska.

Uzrok promena su pomeraji, najčešće oscilovanje ili vibracije nekog tela, kao što su recimo, elastična metalna traka, žice na muzičkim instrumentima, glasne žice, membrane zvučnika ili slušalica, i slično, slika 1.1. Telo koje osciluje ili vibrira pomera čestice vazduha koje su neposredno u njegovoj okolini, ove čestice pomeraju one u susednim slojevima i tako se pojava deformacije sredine prenosi na daljinu. Pri tome čestice sredine ne putuju na daljinu, već samo osciluju (slično kao klatno) oko svojih ravnotežnih položaja.

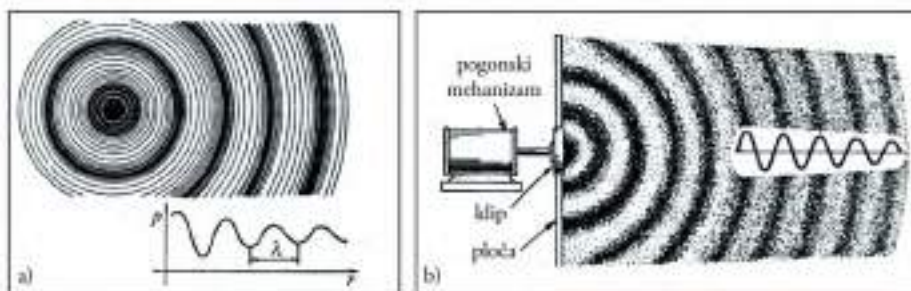


Slika 1.1 - Vibracije kao izvor zvuka [9]

Radi detaljnijeg sagledavanja ove pojave uzmimo kao primer izvora zvuka loptu koja pulsira odnosno naizmenično povećava i smanjuje svoju zapreminu, slika 1.2a. Kada lopta povećava svoju zapreminu čestice vazduha koje se nalaze neposredno uz površinu lopte bivaju potisnute radijalno od središta u svim pravcima. Na taj način gustina sloja vazduha uz površinu lopte biva povećana. Usled dejstva međusobnih elastičnih sila sada čestice vazduha iz zgusnutog sloja oko lopte pomeraju svoje susedne čestice radijalno dalje od centra lopte, povećavajući gustinu sledećeg udaljenijeg sloja. Tako se dejstvo lopte, koja je povećala zapreminu, prenosi na daljinu sa sloja na sloj vazduha.

U sledećoj fazi ciklusa pulsiranja nastaje smanjenje zapremine lopte.

Povlačenjem površine lopte nazad prema centru nastaje praznina koju odmah popunjavaju čestice najbližeg sloja vazduha. Na njihovo mesto, zbog nastalog razređenja dolaze zatim čestice sledećeg daljeg sloja itd. U ovoj fazi ciklusa čestice vazduha se pomeraju u suprotnom smeru (prema lopti), i zona razređenog vazduha se širi koncentrično odmah iza zgušnjavanja koje se dešavalo u prethodno opisanoj fazi ciklusa. Pri tome su se čestice sredine prvo pomerile iz svog ravnotežnog položaja radijalno dalje od centra lopte a potom su se vratile nazad, prošle kroz svoje ravnotežne položaje i dospele u prostor bliže centru lopte koji je nastao smanjenjem njene zapremine.



Slika 1.2 - Izvori zvuka: a) pulsirajuća lopta,
b) pokretni klip u ploči velikih dimenzija

Cela pojava se zatim ciklično ponavlja, a nastale promene se šire sve dalje u prostor u kome kažemo da se javlja *zvučno polje*.

Sličnu situaciju imamo kada se kruti klip, ugrađen u ploču velikih dimenzija kreće napred-nazad, slika 1.2b.

1.4 Zvučni talasi

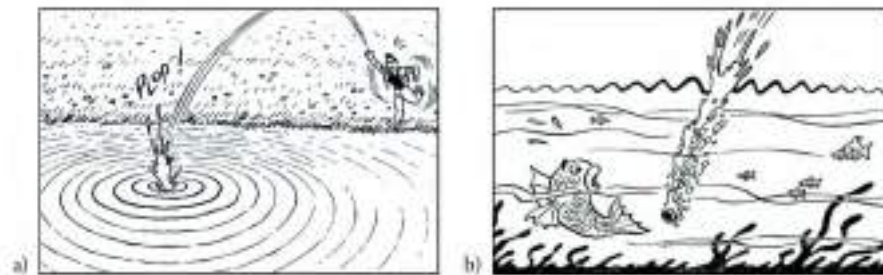
Sabijanje čestica vazduha dovodi do povećanja, a njihovo razređivanje do smanjenja pritiska vazduha. Ovo naizmenično povećavanje i smanjivanje pritiska vazduha koje se prenosi od izvora zvuka dalje kroz vazdušni prostor, nazivamo *zvučnim talasima*. Pojava prostiranja talasa prividno stvara utisak da se čestice vazduha kreću stalno u jednom smeru. Međutim, to nije tačno; čestice vazduha pri tome osciluju, odnosno samo se pomeraju oko svojih ravnotežnih položaja.

Pojava je sasvim slična talasima na vodi koji bi se dobili kada se u mirnu vodu ubaci kamen, slika 1.3a. Javili bi se talasi u vidu koncentričnih krugova koji se šire određenom brzinom. Čestice vode se pri tom samo pomeraju gore – dole, slika 1.3b.

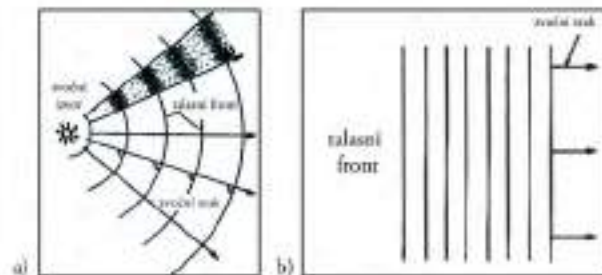
Slično, vetar promenljive jačine stvara talase koji se prostiru kroz žitno polje, ali pri tome glava svake stabljike samo vibrira napred – nazad.

Pri prostiranju zvučnih talasa jedan broj čestica je u istom delu vibracionog ciklusa (u istoj fazi oscilovanja). Te čestice pripadaju površini

koja predstavlja *talasni front* ili *čelo talasa*. Dalje možemo zamisliti da se površina koja predstavlja talasni front sastoji iz velikog broja malih (elementarnih) površina. Put jedne elementarne površine talasnog fronta, normalan na talasni front, predstavlja *zvučni zrak* slika 1.4.

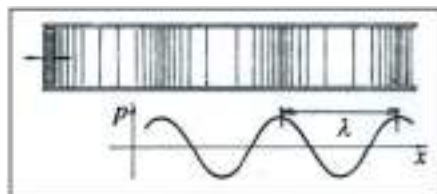


Slika 1.3 – a) Širenje talasa na vodi; b) čestice vibriraju gore – dole [9]



Slika 1.4 - Talasni front i zvučni zraci: a) sferni talasni front, b) ravanski talasni front; zvučni zraci su predstavljeni kao putanje elementarnih delova talasnog fronta

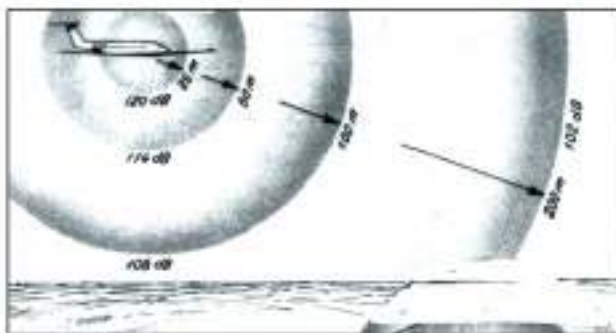
Prema prethodnoj definiciji ispada da su sve tačke talasnog fronta na istom rastojanju od izvora zvuka. U prirodi se najčešće javljaju *sferni talasi*, čiji je talasni front površina sfere. Osobina ovih talasa je da se šire u svim pravcima od zvučnog izvora u prostor. Pulsirajuća lopta sa Slike 1.2a je izvor sfernih talasa. Takođe izvor sfernih talasa je i kruti klip u ploči velikih dimenzija, slika 1.2b. Sferne talase stvaraju i mnogi drugi izvori zvuka, bez obzira na njihov oblik, koje jednim imenom nazivamo *tačkastim izvorima zvuka*.



Slika 1.5 - Ravni talasi koje stvara kruta membrana u cevi

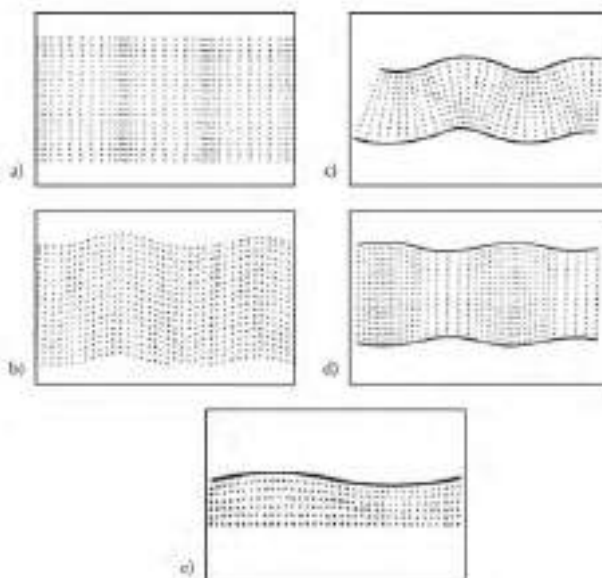
Ravanski talasi su druga, ne toliko česta vrsta zvučnih talasa koji predstavljaju najprostiju zvučnu pojavu. Za razliku od sfernih talasa, čiji je

„talasni front” lopta, kod ravanskih talasa su i površina koja osciluje i njihov talasni front ravni. Ovi talasi su za praksu veoma važni. Ravanske talase stvara krut klip (klipna membrana), u cevi, pri pomeranju napred-nazad, kako je prikazano na slici 1.5.



Slika 1.6 - Avionski motor kao tačkasti izvor zvuka

Treba napomenuti da se udaljavanjem od zvučnog izvora, koji stvara sferne talase, površina talasnog fronta ispravlja, i na dovoljnom rastojanju od izvora sferni talasi prelaze u ravanaske, što se i teorijski može pokazati, a što je šematski prikazano na slici 1.6. Na dovoljno velikim rastojanjima od izvora su dimenzije prijemnika (uvo ili mikrofona) jednake malom delu površine lopte koji se može smatrati ravnim.



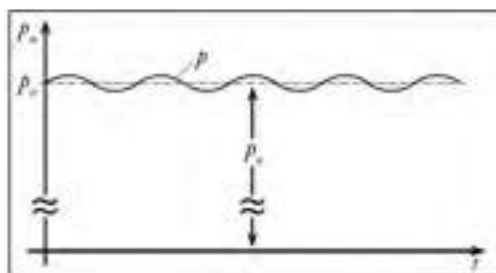
Slika 1.7 - Vrste talasa prema načinu oscilovanja čestica: a) longitudinalni, b) transverzalni, c) fleksioni, d) ekstenzioni, e) površinski

Prema načinu oscilovanja čestica u odnosu na pravac prostiranja zvučnih talasa najčešće srećemo longitudinalne (čestice osciluju u pravcu prostiranja zvuka, slika 1.7a) i transversalne (čestice osciluju normalno na pravac prostiranja zvuka, slika 1.7b) talase. U fluidima (tečnosti i gasovi) se prostiru longitudinalni zvučni talasi dok se u čvrstim telima mogu prostirati i jedni i drugi. U pločama i štapovima mogu se prostirati fleksioni, ekstenzion i površinski talasi, slike 1.7c, 1.7d i 1.7e, respektivno.

Kod fleksionih talasa se radi o savijanju, a kod ekstenzionih o promeni debljine oscilujućih tela. Površinski talasi nastaju kada su oscilovanjem zahvaćene samo čestice u ograničenom površinskom sloju materijala. Ovakvi talasi su upravo oni na vodi prikazani na slici 1.3.

1.5 Zvučni pritisak

Kada se radi o pojavi zvuka u vazduhu, nastalu deformaciju možemo posmatrati kao promenu brzine odnosno pomeraja čestica ili kao promenu gustine vazduha, ili što je isto, kao promenu pritiska u vazduhu. Ipak, uobičajeno je da se posmatra promena pritiska jer je to veličina koja se može lako meriti, a i čoveče uvo opaža zvuk kao promenu pritiska. Pritisak je u trenucima povećane gustine čestica veći od atmosferskog (koji u ovom slučaju smatramo konstantnim), a u trenucima smanjene gustine čestica manji. Dakle, atmosferski pritisak je usled deformacije sredine izazvane oscilovanjem čestica (čiji je uzrok delovanje izvora zvuka) dobio promenljivu komponentu koju nazivamo zvučni pritisak, slika 1.8. Ova fizička veličina se obeležava sa p i predstavlja jedan od osnovnih parametara koji karakterišu zvuk i zvučno polje. Oznaka p se odnosi na efektivnu vrednost zvučnog pritiska.



Slika 1.8 - Promena pritiska u vremenu u datoj tački zvučnog polja u vazduhu [9]

Ako atmosferski pritisak označimo sa p_0 onda je u sredini gde postoji zvučno polje ukupni pritisak p_u dat relacijom:

$$p_u = p_0 + p \quad (1.1)$$

Može se reći da zvučni pritisak predstavlja brze promene atmosferskog pritiska ili naizmeničnu komponentu ukupnog pritiska u zvučnom polju gde je atmosferski pritisak njegova jednosmerna ili srednja

vrednost. Zvučni pritisak se izražava u paskalima (Pa). U starijoj literaturi se za izražavanje veličine pritiska može sresti jedinica bar. Između ove dve jedinice postoji relacija $1Pa = 10^{-5}bar = 10\mu bar$.

Zvučni pritisak ima veoma malu vrednost u poređenju sa atmosferskim. Najtiši zvuk koga čovečije uvo može registrovati iznosi $20 \mu Pa$ ($2 \cdot 10^{-5} Pa$) dok je najglasniji zvuk koji je uvo sposobno da podnese jačine reda $20 Pa$. Zvuk normalne jačine, koji čovek prima tokom svojih svakodnevnih aktivnosti, iznosi oko $0,1 Pa$. Atmosferski pritisak pri normalnim uslovima približno iznosi $100 kPa$ pa se vidi da je njegova vrednost mnogostruko veća od zvučnog pritiska.

Interesantno je da naše čulo sluha veoma dobro registruje ove male vrednosti jačine zvučnog pritiska.

Napomenimo još jednom, da su promene zvučnog pritiska u vremenu posledica zgušnjavanja i razređivanja čestica elastične sredine na određenom mestu u prostoru gde postoji zvučno polje. Ove promene se, kao rezultat delovanja inercije i elastičnih veza čestica prenose dalje u okolni prostor brzinom zvuka. Stoga možemo reći da je pritisak veličina zvučnog polja koja se menja i u vremenu i u prostoru. Zato se zvučni pritisak ravanskih talasa (takvi su svi talasi na dovoljnom rastojanju od izvora) koji se menja po sinusnom zakonu može matematički predstaviti izrazom [29]:

$$p(x, t) = p_m \cdot \sin[(\omega \cdot t - k \cdot x) + \theta_0] \quad (1.2)$$

gde je p_m amplituda pritiska, $k = 2 \cdot \pi / \lambda$ talasni broj, a θ_0 početna faza.

Slično kao kod ekvivalentnih izraza u elektrotehnici kojima se predstavljaju prostoperiodične promene struje ili napona, u jednačini (1.2), p_m označava maksimalnu trenutnu vrednost zvučnog pritiska, k nam pokazuje kako su gusto raspoređene oscilacije zvučnih talasa i θ_0 pokazuje koliko je sinusna funkcija pomerena na vremenskoj osi (levo ili desno) u početnom trenutku vremena ($t = 0$).

Inače, treba naglasiti da se promene funkcije (1.2) mogu pratiti u vremenu t na datom rastojanju $x=x_0$ od izvora, ili u funkciji rastojanja x od izvora ali tada u datom trenutku vremena $t=t_0$. Iz oblika izraza (1.2) se može zaključiti da on predstavlja takozvani *progresivni* zvučni talas, tj. zvučni talas koji se prostire u pozitivnom smeru x -ose (ili od izvora). Njegovo fazno kašnjenje $-kx$ je sve veće što je rastojanje x veće. Drugim rečima, on prolazi kroz iste vrednosti sve kasnije i kasnije što je x veće, a to upravo odgovara slučaju kada se kreće u pozitivnom smeru x -ose.

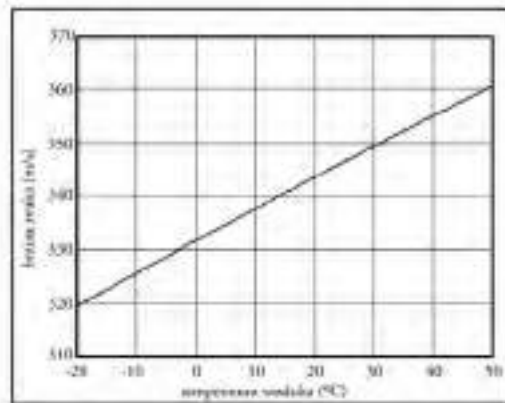
1.6 Brzina zvuka

Brzina kojom se zvučni talasi prostiru na daljinu zove se *brzina zvuka* i označava sa c . Brzina zvuka kroz vazduh zavisi u značajnoj meri od

temperature a u manjoj meri od gustine vazduha i vrednosti atmosferskog pritiska. Zavisnost od temperature je data izrazom:

$$c(\theta) = 331,4 \sqrt{1 + \frac{\theta}{273}} = 331,4 + 0,606 \cdot \theta \quad (1.3)$$

gde je θ temperatura vazduha u Celzijusovim stepenima. Iz izraza (1.3), je jasno da se za svaki stepen povećanja temperature vazduha brzina zvuka poveća za 0,6 m/s. U opsegu temperatura koje se mogu javiti u životnoj sredini, brzina zvuka se menja približno u granicama od 320 m/s do 360 m/s, kako je prikazano dijagramom na slici 1.9. Na sobnoj temperaturi od 22 °C brzina zvuka je $c(22\text{ °C}) = 345\text{ m/s}$ ili 1242 km/h. Kao što vidimo zvuk je nekoliko puta brži od najbržih prevoznih sredstava na zemlji, ali pojedine letilice mogu da se kreću brzinama većim od brzine zvuka, o čemu će biti govora u odeljku 1.26. Sa druge strane brzina zvučnih talasa je neuporedivo manja od brzine elektromagnetnih talasa ($3 \cdot 10^8\text{ m/s}$) pa zato tokom udara groma svetlost opazimo skoro trenutno, a grmljavinu čujemo mnogo kasnije. Brzina c ne zavisi od frekvencije, kao ni od složenosti zvučnog signala.



Slika 1.9 - Dijagram promene brzine zvuka u vazduhu u opsegu temperatura koje se mogu javljati u životnoj sredini [19]

Brzina prostiranja zvuka u drugim materijalima (tečnosti i čvrsta tela) je znatno veća nego u vazduhu, kako je prikazano u tabeli 1.1. Razlog tome su čvršće elastične veze između čestica ovih materijala pa se talas poremećaja brže prenosi. Na pokretanje ovih čestica koristi se više energije koju emituje zvučni izvor, pa zvuk ne može u njima da pređe velika rastojanja. Zato zvuk brzo oslabi pri prolasku kroz betonski zid, što je

povoljno u slučajevima kada se traži izolacija od neželjenog zvuka tj. buke [23].

Pri prostiranju zvučnih talasa, kako je već rečeno, akustička energija se prenosi preko čestica vazduha, koje osciluju oko svog ravnotežnog položaja. Za ovo oscilovanje je karakterističan pomeraj čestica koji se obeležava sa ξ (ksi) i brzina kojom čestice osciluju. Brzina oscilovanja čestica obeležava se sa v i ona je mnogo manja (100 do 1000 puta) od brzine prostiranja zvučnih talasa - c . Veza između pomeraja čestica i brzine njihovog oscilovanja je:

$$\xi = \frac{v}{\omega} \quad (1.4)$$

gde je ω kružna frekvencija ($2\pi f$). Očigledno je da pomeraj čestice postaje sve manji što je frekvencija veća, pri istoj brzini v .

Tabela 1.1 - Brzina zvuka u različitim materijalima [8].

Materijal	Brzina zvuka (m/s)
Vazduh, 22 °C	345
Voda	1480
Pleksiglas	1800
Drvo, meko	3350
Beton	3400
Čelik	5050
Aluminijum	5150
Staklo	5200
Gips ploče	6800

1.7 Frekvencija, period i talasna dužina zvuka

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

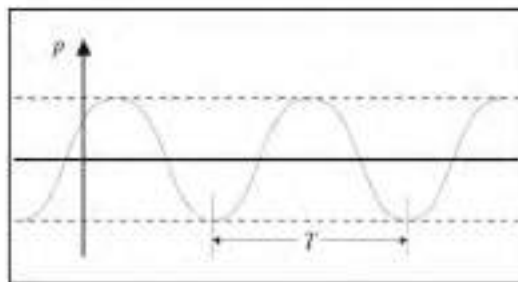
Frekvencija se obeležava sa f i izražava u hercima (Hz). Čujni zvuk pokriva frekvencije od oko 20 Hz do 20 kHz.

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

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

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

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

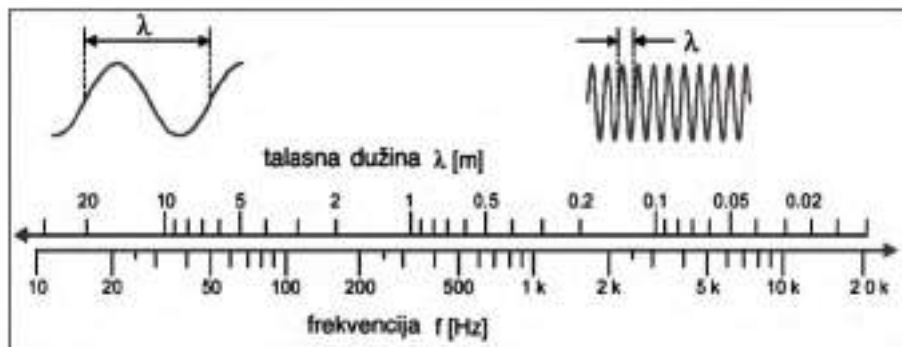


Slika 1.10 - Promena zvučnog pritiska p sinusnog talasa u vremenu t

Na osnovu prethodne definicije, talasna dužina zvuka λ se može predstaviti relacijom:

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

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



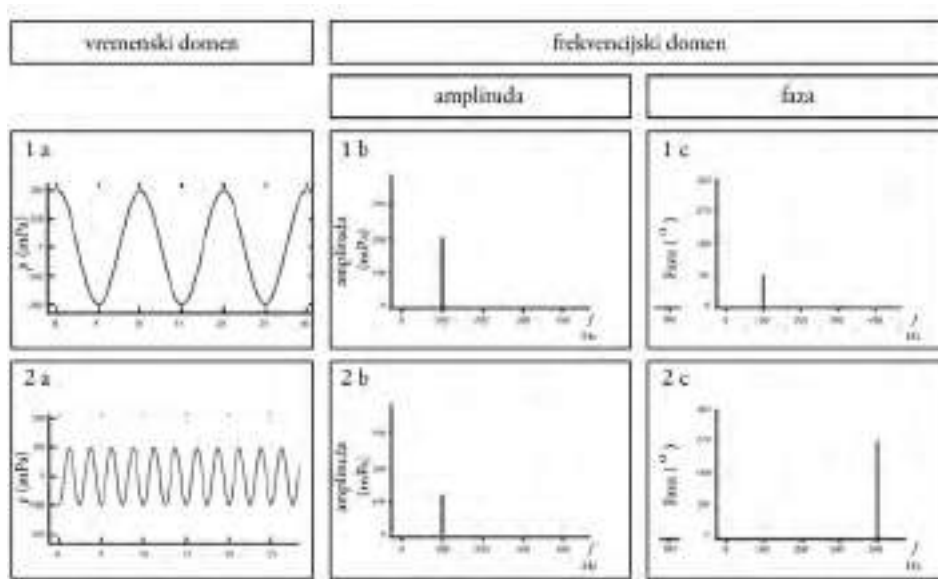
Slika 1.11 - Frekvencije i odgovarajuće talasne dužine čujnog zvuka

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

1.8 Amplituda i faza zvučnog talasa

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

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



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

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

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

Kao što se vidi sa dijagrama i navedenih izraza $p_1(x, t)$ i $p_2(x, t)$, obe funkcije su sinusne, samo se razlikuju po amplitudi, frekvenciji i početnoj fazi. Pri tome treba imati u vidu da se pod fazom podrazumeva deo ukupnog

ciklusa (2π) sinusne funkcije koji je dosegnut u datom trenutku vremena t . Kao početak ciklusa računa se tačka u kojoj je trenutna vrednost pritiska p jednaka nuli i prelazi iz negativnih u pozitivne vrednosti. U oba slučaja prikazana u tabeli 1.2 početak ciklusa funkcije koja opisuje promene zvučnog pritiska se ne poklapa sa trenutkom od koga računamo vreme ($t = 0$). U slučaju 1a funkcija p_1 ima vrednost koja odgovara četvrtini ciklusa ($\pi/2$), a funkcija p_2 vrednost koja odgovara tri četvrtine ciklusa ($3\pi/2$), u trenutku kada počinje računanje vremena ($t = 0$).

1.9 Akustička snaga izvora zvuka

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

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

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

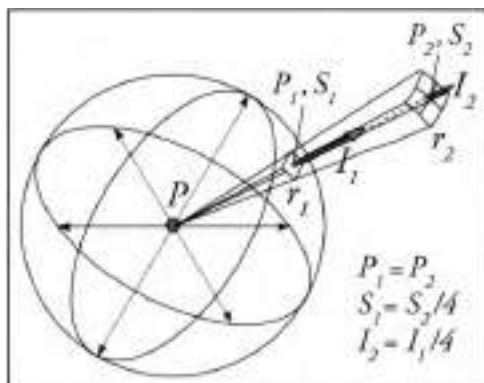
Iz izraza (1.7) se jasno vidi da je akustička snaga izvora veća što je njegova efektivna površina S_d veća i što je veći pomeraj d_{max} te površine. Sa druge strane, uticaj frekvencije je veoma značajan, jer kako se iz pomenutog izraza vidi akustička snaga je proporcionalna frekvenciji na četvrti stepen.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

1.10 Intenzitet zvuka

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

$$J = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (1.8)$$

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



Slika 1.12 – Opadanje intenziteta zvuka sa povećanjem rastojanja od izvora [10]

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

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

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

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

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

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

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

1.11 Gustina akustičke energije

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

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

gde su sve veličine odnane poznate.

1.12 Nivo zvuka

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

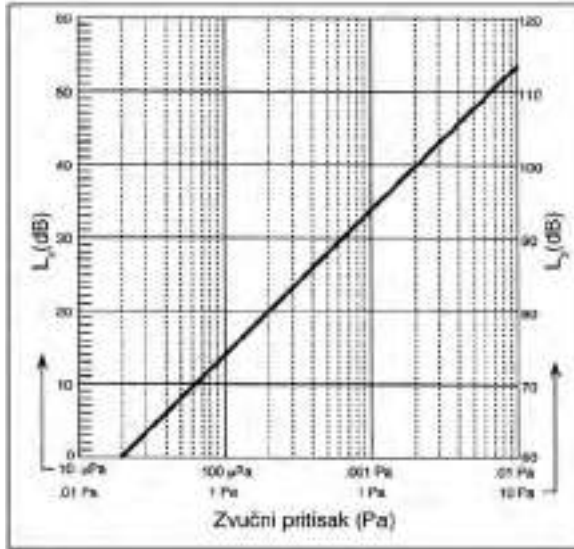
Ovome treba dodati činjenicu da je subjektivni osećaj jačine zvuka približno srazmeran logaritmu fizičke pobude (što važi uopšte za sva ljudska čula). To znači da pobuda treba da se povećava stalno za isti procenat da bi se dobio utisak da jačina zvuka raste ravnomerno (vidi detaljnije u glavi 3).

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

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

Pri tom se uvek podrazumeva, iako se to često ne kaže, da je to nivo u odnosu na prag čujnosti. Drugim rečima objektivna jačina zvuka u akustici se umesto u paskalima (Pa) najčešće izražava u decibelima (dB) u odnosu na

prag čujnosti $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ koji se u ovom slučaju naziva referentni nivo pritiska.



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

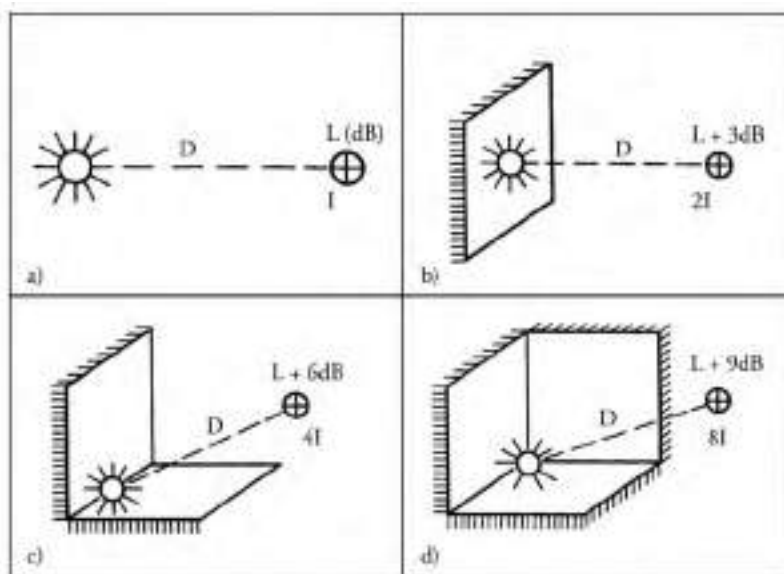
1.13 Ugao zračenja i usmereni zvučni izvori

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

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

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

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



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

Iz izraza 1.16 se može zaključiti da se kod usmerenih izvora sa istom snagom postiže veći intenzitet zvuka u smeru ose, nego kod neusmerenih. Drugim rečima, svaki izvor date snage P_a mogao bi proizvesti zvuk jačeg intenziteta J_0 (u smeru ose), kad bi mu se na neki način smanjio prostorni ugao zračenja Ω_z . To se može ostvariti ako se, na primer, tačkasti izvor postavi u neposrednu blizinu beskonačno velikog, krutog i glatkog zida koji potpuno

reflektuje zvuk, slika 1.14b. Ugao zračenja je upola manji (2π umesto 4π steradijana), nego kada zida ne bi bilo, pa se i intenzitet zvuka povećava dva puta. Zvučni pritisak povećava se pri tom $\sqrt{2}$ puta – vidi obrazac 1.8. Ako se izvor postavi uz ivicu koju obrazuju dva zida, slika 1.14c, prostorni ugao je još dva puta manji (π), a intenzitet četiri puta veći nego u otvorenom prostoru. Najzad ako se izvor postavi u sam ugao koji obrazuju tri zida (ugao paralelopipedne prostorije), slika 1.14d, intenzitet se može povećati 8 puta u odnosu na slučaj kada izvor zrači u otvorenom prostoru, slika 1.14a.

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

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

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

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

Izraz (1.16) ima sada oblik:

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

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

1.14 Spektar zvuka - Prost i složen zvuk

Raspodela energije zvuka u funkciji frekvencije predstavlja njegov spektar, koji se obično daje kao grafik akustičke snage ili zvučnog pritiska u funkciji frekvencije. Spektar nam daje informaciju o ponašanju zvuka u frekvencijskom domenu, za razliku od njegovog talasnog oblika ili anvelope,

koji nam govore o karakteristikama zvuka u vremenskom domenu. Da bi se sagledale detaljne osobine nekog zvučnog signala potrebno je poznavati i njegov vremenski oblik i njegov spektar. Po svom spektralnom sastavu zvuk može biti veoma različit. Prema obliku spektra sve zvukove delimo na proste i složene.

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

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

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

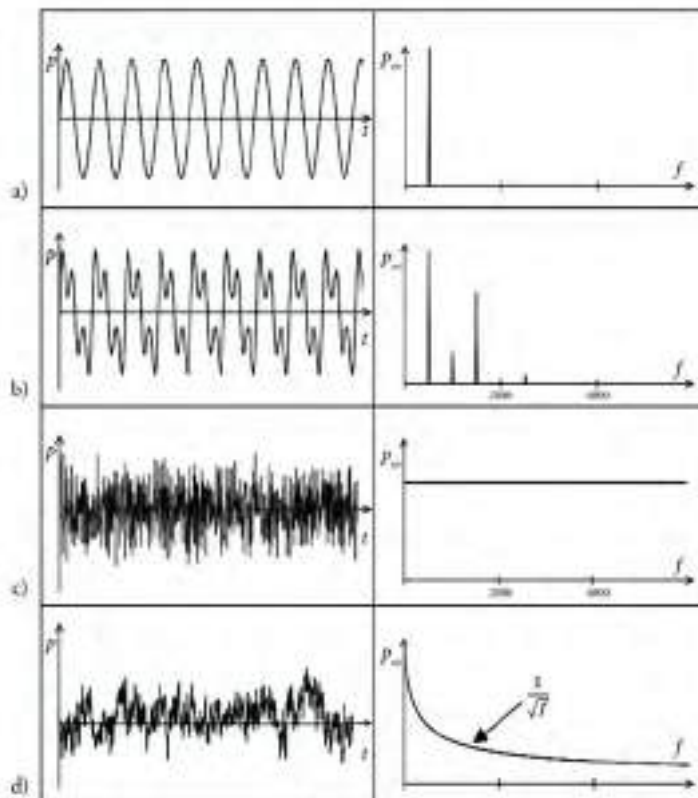
Druga vrsta složenog zvuka ima kontinualni (neprekidni) spektar i može se prikazati obvojnicom koja pokazuje kako se menja intenzitet zvuka (nivo) u zavisnosti od frekvencije. Oblik ovog spektra kao i odgovarajući vremenski oblik signala mogu biti najrazličitiji, slika 1.15c i 1.15d. U praksi je složen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

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

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

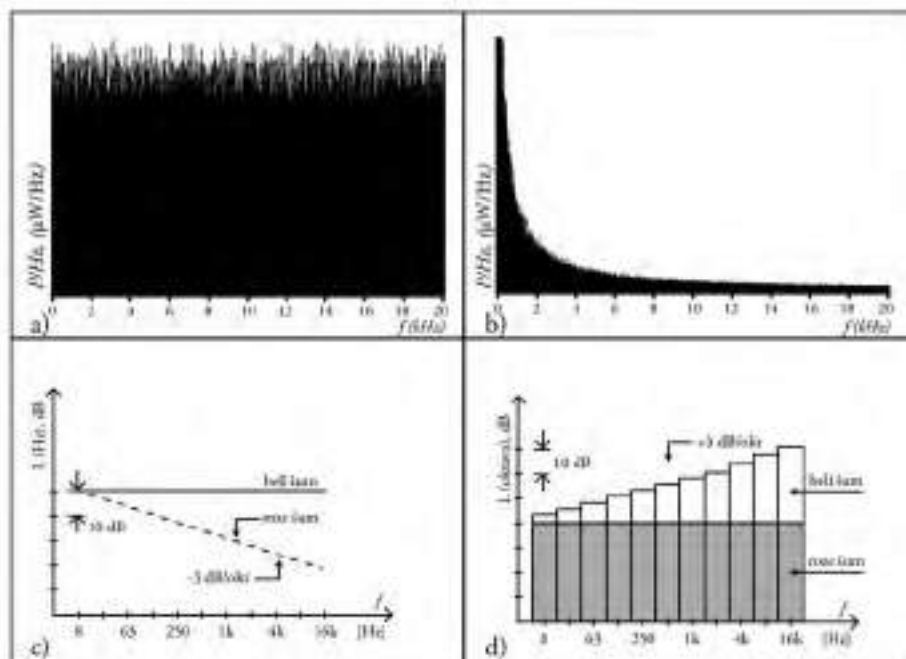
Beli šum ima u svome spektru sve frekvencije od 20 Hz do 20.000 Hz i to tako da je spektralna gustina snage (snaga u frekvencijskom pojasu $\Delta f = 1$ Hz) ista, slika 1.16a i 1.16c. Ako se spektar belog šuma posmatra po oktavama on će, sa porastom frekvencije, rasti brzinom od 3 dB po oktavi, slika 1.16d. Razlog tome leži u činjenici da je propusni opseg svakog

narednog oktavnog filtra (duplo veća centralna frekvencija) dvostruko širi nego prethodnog, pa je nivo ukupne energije u njemu za 3 dB viši nego u prethodnom.



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

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



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

1.15 Istovremeno zračenje više izvora

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

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

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

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

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

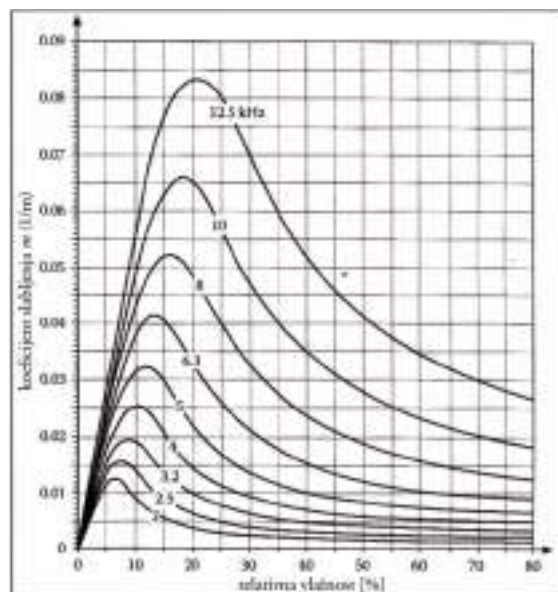
$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots}, [p] = Pa \quad (1.20)$$

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

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

1.16 Slabljenje zvuka pri prostiranju u otvorenom prostoru

Već je navedeno da, pri prostiranju zvučnih talasa u otvorenom prostoru, intenzitet zvuka opada sa kvadratom rastojanja, odnosno pritisak opada sa rastojanjem, što je posledica širenja (divergencije) talasa i prenošenja akustičke energije na sve veći broj čestica vazduha. Ovo slabljenje usled širenja talasa uvek je prisutno.



Slika 1.17 – Koeficijent slabljenja zvuka u vazduhu usled apsorpcije u vazduhu na temperaturi od 20°C u funkciji vlažnosti vazduha i frekvencije signala [30]

Pri prostiranju zvučnih talasa kroz vazduh, pored slabljenja usled divergencije, javljaju se i dopunska slabljenja usled apsorpcije zvuka u vazduhu, uticaja tla, prepreka (zakloni ili barijere, objekti, rastinje) i atmosferija (gradijent temperature, vetar, sneg, kiša, magla).

Ovde ćemo ukratko objasniti uticaj apsorpcije zvuka u vazduhu na njegovo slabljenje pri prostiranju. O uticaju gradijenta temperature i vetra biće nešto više govora u odeljku 1.17. Određivanje uticaja ostalih parametara je dosta složen proces koji izlazi iz obima ove knjige.

Na iznos slabljenja usled apsorpcije zvuka u vazduhu utiče više faktora, među kojima su najvažniji viskoznost vazduha, odvođenje toplote i pojave rezonanse u molekulima. Ne ulazeći u detalje pojedinačnih uticaja ovde ćemo samo navesti da se iznos apsorpcije menja sa temperaturom, vlažnošću vazduha i frekvencijom signala, kako je prikazano na slici 1.17 [30]. Kao što se vidi sa ove slike, apsorpcija postaje značajna na frekvencijama iznad 2 kHz i ima maksimum pri relativno malim vrednostima vlažnosti vazduha.

Ako se tokom prostiranja zvuka uračunaju jednovremeno i uticaj širenja zvučnih talasa i uticaj apsorpcije u vazduhu, jednačinu (1.7), za intenzitet zvuka na rastojanju r od tačkastog izvora tada moramo pisati u obliku:

$$J = \frac{P_a}{4 \cdot \pi \cdot r^2} e^{-m \cdot r} \quad (1.21)$$

pri čemu je m koeficijent slabljenja zvuka usled apsorpcije, čije su vrednosti date na dijagramu na slici 1.17.

Ako se zna intenzitet zvuka $J(r_1)$ na rastojanju r_1 onda je intenzitet zvuka na bilo kom rastojanju r dat relacijom:

$$J(r) = J(r_1) \frac{r_1^2}{r^2} e^{-m \cdot (r - r_1)} \quad (1.22)$$

a kada se umesto intenziteta radi o zvučnom pritisku onda izraz (1.22) ima oblik:

$$p(r) = p(r_1) \frac{r_1}{r} e^{-\frac{m}{2}(r - r_1)} \quad (1.23)$$

Obično je u praksi poznat nivo zvuka L_1 koji dati izvor daje na rastojanju $r_1 = 1\text{m}$, pa se iz izraza (1.23), dobija da je nivo zvuka na rastojanja r od izvora:

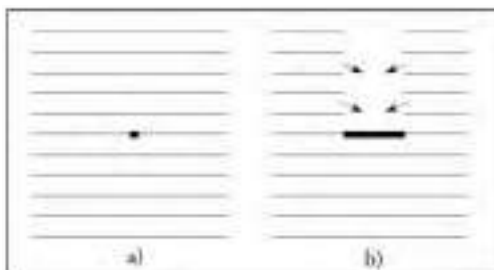
$$L_r = L_1 - 20 \log r - 4,34 \cdot m \cdot (r - 1), [\text{dB}] \quad (1.24)$$

Pri ovome treba naglasiti da na ukupan iznos slabljenja zvuka pri malim rastojanjima od izvora dominantan uticaj ima širenje zvučnih talasa, dok na većim rastojanjima i višim frekvencijama dominantan uticaj ima apsorpcija zvuka u vazduhu. Drugim rečima, na rastojanjima do oko 100 m dovoljno je uračunati samo slabljenje usled divergencije zvučnih talasa, dok se slabljenja usled svih ostalih uticaja ne moraju uzimati u obzir.

1.17 Difrakcija zvuka

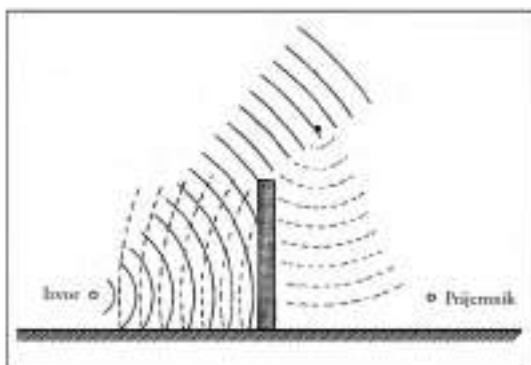
U slobodnom prostoru zvučni talasi se kreću pravolinijski. Međutim kada se na putu talasa nađu prepreke onda oni po pravilu skreću sa

pravolinijskog puta kretanja. Pojava zbog koje nastaje promena pravca kretanja zvučnih talasa kada naiđu na prepreke naziva se difrakcija.



Slika 1.18 - Difrakcija ravanskih zvučnih talasa: a) na akustičkoj maloj prepreci, b) na akustički velikoj prepreci [17]

Poznato je da se zvučni talasi prostiru iza uglova ili oko prepreka. Na primer muzika koja se reprodukuje u jednoj prostoriji u stanu može se čuti u hodniku ili u drugim prostorijama. Jedan od razloga ove pojave je difrakcija zvuka ili skretanje zvučnih talasa sa svog pravolinijskog kretanja. Karakter muzike koja se čuje u udaljenim prostorijama u stanu je izmenjen. Niski tonovi su dominantniji jer se zvuk niskih frekvencija usled većih talasnih dužina lakše prostire oko uglova i prepreka.

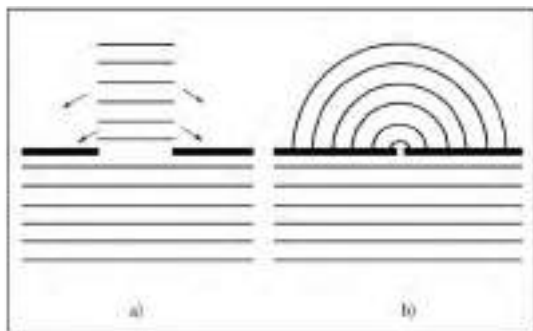


Slika 1.19 - Zvučna barijera štiti prijemnik od zvuka viših frekvencija [17]

Da li će određena prepreka biti uzrok difrakcije zvuka zavisi od njene „akustičke veličine“ odnosno od odnosa njenih dimenzija prema talasnoj dužini zvuka. Prepreka koja je mnogo manja od talasne dužine zvuka ne utiče na pravac kretanja zvučnih talasa, slika 1.18a [17]. Međutim, prepreka koja je veća od talasne dužine zvuka formira senku u koju zrače izvori koji potiču od talasnih frontova zvuka koji je prošao pored prepreke. Ova pojava se zasniva na Hajgensovom principu koji glasi da svaka tačka na talasnom frontu zvuka koji je prošao kroz neki otvor ili je prošao pored difrakcione ivice može se smatrati tačkastim izvorom zvuka koji zvučnu energiju zrači u zonu senke.

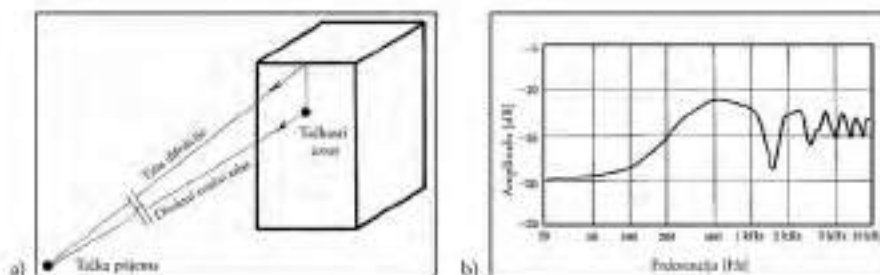
Zvučne barijere koje se postavljaju pored prometnih puteva i železničkih pruga su primeri prepreka čije su dimenzije velike u poređenju sa talasnom dužinom upadnog zvuka, slika 1.19 [17].

Deo zvuka koji pogađa barijeru se reflektuje, kao da potiče od virtuelnog zvučnog izvora sa druge strane barijere. Talasni frontovi koji prolaze pored gornje ivice barijere mogu se posmatrati kao linije tačkastih izvora koji zrače zvuk u zonu senke. Nivo zvuka u zoni senke iza barijere je veći što je njegova frekvencija niža. Dakle, zona senke je zaštićena od zvuka visokih frekvencija dok zvuk niskih frekvencija dospeva u zonu senke zbog difrakcije.



*Slika 1.20 Difrakcija zvuka na otvorima [17]:
a) veliki otvor,
b) mali otvor*

Slika 1.20a prikazuje difrakciju zvuka na otvoru čija je širina jednaka većem broju talasnih dužina. Zvučni talasi pogađaju krutu prepreku, deo zvučne energije se reflektuje, dok deo prolazi pravo kroz širok otvor. Strelice pokazuju da deo energije iz glavnog snopa skreće u zonu senke. Svaki talasni front koji je prošao kroz otvor postaje niz tačkastih izvora koji zrače difrakovani zvuk u zonu senke. Isti princip važi i za sliku 1.20b, izuzev što je otvor veoma mali i samo mali deo zvučne energije prolazi kroz njega. Tačke na malom talasnom frontu koji je prošao kroz otvor tako su međusobno blizu da njihovo zračenje ima oblik polusfere.

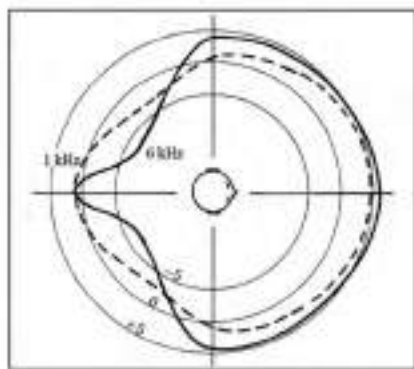


Slika 1.21 – Difrakcija na ivicama zvučnih kutija [17]

Kada zvučnik montiran na prednjem zidu zvučnice kutije zrači zvučne talase u okolni prostor, deo zvučne energije se reflektuje od ivica zida, slika 1.21a, i može dovesti do promene kvaliteta zvuka na mestu slušaoca, slika 1.21b. Ako zvučnik smatramo tačkastim izvorom zvuka, koji

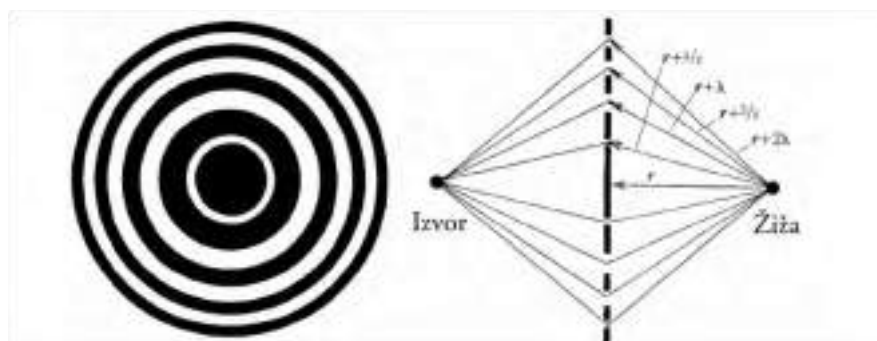
je montiran na sredini prednje ploče kutije dimenzija 40 cm x 64 cm x 32 cm, onda će na mestu slušanja zvuk biti jednak kombinaciji direktnog zvuka i zvuka reflektovanog od ivica. Fluktuacije ukupnog nivoa zvuka usled uticaja difrakcije u ovom slučaju iznosiće ± 5 dB [17], što predstavlja značajnu promenu frekvencijske karakteristike zvučničkog sistema.

Difrakcija zvuka koju stvara čovečja glava kao i refleksije i difrakcija od ušnih školjki i torza utiču na prijem zvuka od strane čoveka. Tako zvuk, u opsegu frekvencija od 1-6 kHz, koji dolazi spreda, usled difrakcije biva pojačan ispred i oslabljen iza glave. Za niže frekvencije direkciona karakteristika glave je približno kružna, slika 1.22 [17].



Slika 1.22 – Različita osetljivost prijema zvuka od pozadi zbog uticaja difrakcije oko čovečje glave [17]

Korišćenjem mehaničkih prepreka odgovarajućeg oblika moguće je postići da zvuk prolazeći kroz prepreku stigne na drugu stranu istovremeno sa onim zvukom koji je zaobilazi. Na tom se principu zasnivaju akustička sočiva.



Slika 1.23 – Difrakcija zvuka i akustičko sočivo [17]

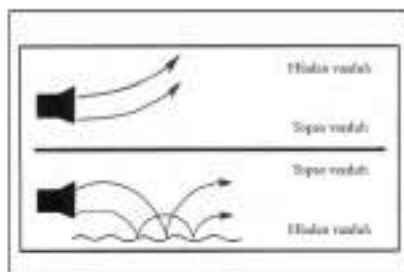
Ploča sa kružnim koncentričnim prerezima, slika 1.23, može se smatrati akustičkim sočivom. Ukoliko je žiža na rastojanju r od ploče, sledeći duži put mora biti $r + \lambda/2$, gde je λ talasna dužina zvuka koji stiže od izvora do ploče. Dužine narednih puteva zvuka su redom $r + \lambda$, $r + 3\lambda/2$, i $r + 2\lambda$

itd. Ove dužine puteva se razlikuju za $\lambda/2$, što znači da zvučni talasi u žižu stižu u fazi dajući zvuk povećane jačine.

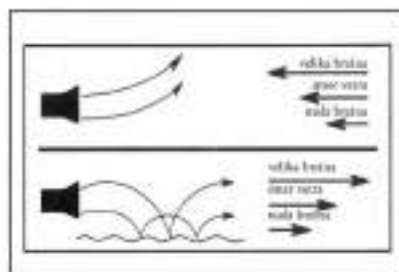
Na istom principu rade i akustičko rasipno sočivo, i akustička prizma, s tim što sočivo raspršuje zvuk a prizma menja pravac prostiranja zvučnih talasa.

1.18 Refrakcija zvuka

Refrakcija je pojava pri kojoj takođe nastupa promena pravca prostiranja zvučnih talasa, odnosno savijanje zvučnih talasa. Uzrok ove pojave su vremenske prilike, među kojima su najznačajnije vetar i temperaturne razlike slojeva vazduha kroz koje zvuk prolazi. U oba slučaja dolazi do promene brzine prostiranja zvuka na različitim visinama od zemlje usled čega nastaje savijanje zvučnih talasa.



Slika 1.24 – Refrakcija zvuka usled temperaturnog gradijenta



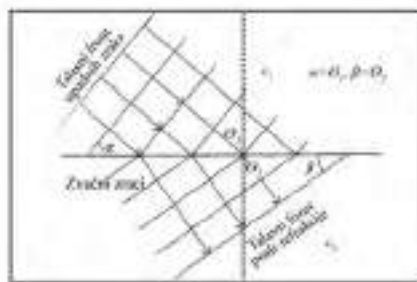
Slika 1.25 – Refrakcija zvuka usled uticaja vetra

Tokom dana vazduh je najtopliji na površini zemlje i njegova temperatura postepeno opada sa povećanjem visine od zemlje, a sa njom i brzina zvuka. To znači da kod zvučnih talasa koji se prostiru u blizini zemlje deo talasa najbliži zemlji putuje najbrže, a deo talasa koji je najudaljeniji od zemlje putuje najsporije. Kao rezultat ovoga, talas menja pravac i savija nagore, slika 1.24 gore. Na ovaj način može nastati zona senke ili mrtva zona u kojoj se zvuk slabije čuje, ili uopšte ne čuje. Slušalac koji stoji u zoni senke neće čuti zvuk iako je siguran da vidi izvor. Zvučni talasi su skrenuli naviše i ne stižu do slušaoca.

Obratno, noću po zalasku sunca, zemlja se brzo hladi i temperatura vazduha je najniža na površini zemlje i raste sa povećanjem visine. Ova pojava se naziva temperaturna inverzija i može se protezati do visine od 100 m i više, iznad površine zemlje. Sada će zvučni talas koji se prostire u blizini zemlje, čiji se deo najbliži zemlji kreće najsporije, savijati nadole, Slika 1.24 dole.

Na prostiranje zvučnih talasa mogu znatno da utiču pravac i jačina vetra. Brzina vetra nije na svim visinama jednaka; veća je u visini, a manja uz površinu zemlje. Treba imati u vidu da je brzina zvuka jednaka vektorskom

zbiru brzine zvuka u mirnoj atmosferi i brzine vetra. Zbog toga zvučni talasi koji se prostiru uz vetar imaju veću brzinu u slojevima bližim zemlji pa skreću naviše. Obratno, kada se prostiru niz vetar imaju veću brzinu u slojevima dalje od zemlje pa skreću naniže, slika 1.25. I jedno i drugo skretanje pravca prostiranja smanjuje domet jer odvodi zvuk van željenog pravca.



Slika 1.26 – Promena pravca kretanja zvučnih talasa na granici dve sredine

Do refrakcije zvučnih talasa dolazi i kada pređu iz jedne sredine u drugi (iz vazduha u vodu, na primer). Zvučni talasi tada menjaju pravac prostiranja kao što je slučaj i sa svetlosnim zracima. Veličina promene pravca na granici dve sredine zavisi od brzina prostiranja zvuka u njima, i data je izrazom:

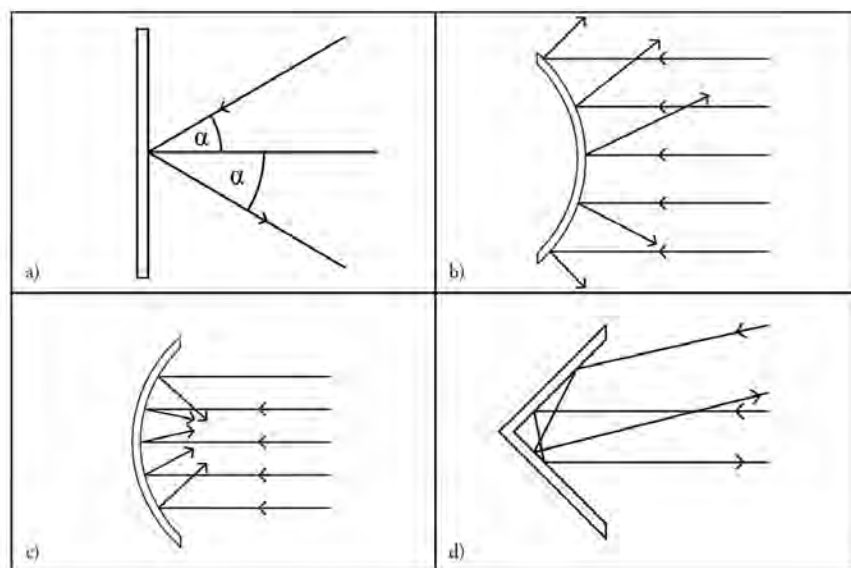
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (1.25)$$

gde su α i β uglovi koje talasni frontovi zaklapaju sa graničnom površnom a c_1 i c_2 brzine u sredinama koje se graniče, slika 1.26. Često se u literaturi može sresti jednačina (1.25), gde su umesto uglova α i β dati uglovi θ_1 i θ_2 koje zatvaraju zvučni zraci na normalom na površinu razdvajanja dve sredine. Sa slike 1.26 se vidi da se praktično radi o istim uglovima, ($\alpha = \theta_1$ i $\beta = \theta_2$) pošto su to uglovi sa normalnim kracima.

Razlika brzina prostiranja zvuka u vazduhu i čvrstim telima je velika. Stoga pri prelazu zvuka iz vazduha u čvrsta tela, i obratno, zvučni zraci izlaze ili ulaze skoro pod pravim uglom na površinu razdvajanja.

1.19 Refleksija zvuka

Korišćenjem zvučnih zraka moguće je optičke zakone vezane za refleksiju svetlosti primeniti u akustici. Zato se ova oblast akustike naziva geometrijska akustika, po ugledu na geometrijsku optiku gde se mnogi problemi rešavaju primenom geometrije. Pri tome mora biti ispunjen uslov da je talasna dužina zvuka mnogo manja od dimenzija tela od kojeg se zvuk reflektuje.



Slika 1.27 – Refleksija zvučnih talasa

Ako se radi o refleksiji ravnog zvučnog talasa od ploče velikih dimenzija onda je upadni ugao jednak uglu refleksije, dok su upadni i reflektovani zvučni zrak u istoj ravni. Na slici 1.27 su prikazani primeri refleksije zvuka od ravne (a), konveksne (b) i konkavne (c) površine kao i od reflektora koji čine dva zida međusobno spojena pod uglom od 90° (ugaoni reflektor).

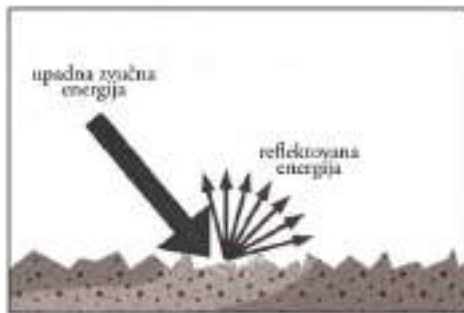
Kada se radi o konveksnoj ili konkavnoj ploči, tada zamišljamo da su sastavljene od malih ravnih površina koje pogađa upadni zrak pod određenim uglom, pa se reflektovani zrak odbija od ove površine pod istim tim uglom.

Konveksna površina rasipa zvuk. Na ovom principu rade difuzori koji se često koriste za akustičku obradu prostorija. Konkavne površine fokusiraju zvuk i obično su sa akustičke tačke gledišta veoma problematične. Kod ugaonog reflektora imamo specifičnu situaciju da su upadni i reflektovani zvučni zrak paralelni. To znači da u bilo kojoj tački u prostoriji reflektovani zrak će se vratiti prema izvoru. Situacija postaje još složenija ako se ima u vidu da u prostoriji pored ugaonih reflektora sa dva zida postoje i ugaoni reflektori sa tri zida (uglovi koje čine zidovi i plafon ili zidovi i pod).

1.20 Difuzija zvuka

Kada zvučni talas pogodi neku prepreku deo zvučne energije se apsorbira ili prođe kroz prepreku a deo se reflektuje. Ako se reflektovana energija odbije samo u jednom pravcu, pri čemu su upadni ugao i ugao

refleksije isti, o čemu je bilo reči u odeljku 1.19, kažemo da se radi o spekularnoj refleksiji. Ukoliko se zvučna energija raspe uniformno u mnogo pravaca, slika 1.28, kažemo da se radi o difuznoj refleksiji ili difuziji zvuka.



Slika 1.28 – Šematski prikaz difuzije zvuka

Difuzija zvuka je veoma značajna u akustici jer sprečava pojavu jakih refleksija koje mogu višestruko da smetaju. Ona doprinosi utisku da zatvoreni prostor akustički izgleda („zvuči”) većim nego što je u stvarnosti. U akustičkoj obradi prostorija difuzija je često dobra alternativa apsorpciji zvuka jer se može primeniti za smanjenje refleksija uz jednovremeno zadržavanje „živosti” prostora tj. zadržavanje akustičke energije u prostoriji.

Difuzija zvuka nastaje kada se zvučni talasi reflektuju od konveksne površine, ili kada je prepreka neravna, pri čemu su dimenzije neravnina veće od talasne dužine zvuka. Takođe, do difuzije će doći i kada je površina na koju nailaze zvučni talasi prekrivena naizmenično refleksionim i apsorpcionim segmentima.

1.21 Apsorpcija zvuka

Kada zvučni talas naiđe na neku prepreku deo njegove energije će se reflektovati, a deo će biti apsorbovan (upijen) ili će proći kroz prepreku, slika 1.29. Deo koji prolazi kroz uobičajene prepreke u praksi (najčešće zidovi prostorija) je veoma mali u odnosu na energiju koja se reflektuje ili biva apsorbovan, pa o njemu ovde dalje nećemo voditi računa. U kakvom odnosu su reflektovana i apsorbovana energija je za praksu vrlo važno. Materijali, od kojih su prepreke sagrađene, imaju veoma različite osobine u pogledu apsorpcije i refleksije zvučnih talasa. Da bi se ove pojave mogle i brojno kvantifikovati uvedeni su koeficijenti apsorpcije i refleksije zvuka.

Intenzitet zvučnih talasa koji nailaze na prepreku, na slici 1.29, označićemo sa J , intenzitet reflektovanih talasa sa J_r i intenzitet apsorbovanih talasa sa J_α . Pošto smo zanemarili veoma mali deo energije koja je prošla kroz prepreku možemo pisati:

$$J = J_r + J_\alpha, \quad [J] = \text{W/m}^2 \quad (1.26)$$

Ako sve članove ove jednačine podelimo sa J , dobijamo:

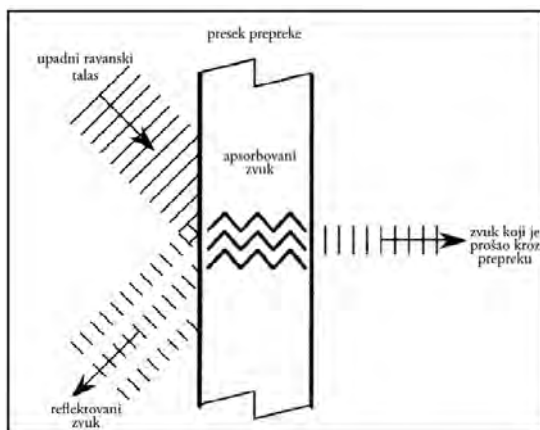
$$1 = \frac{J_r}{J} + \frac{J_\alpha}{J}, \quad (1.27)$$

gde je $\frac{J_r}{J} = r$ i naziva se koeficijent refleksije, a $\frac{J_\alpha}{J} = \alpha$ i predstavlja koeficijent apsorpcije zvuka.

Iz jednačine (1.27) se dolazi do jednostavne relacije koja glasi:

$$\alpha + r = 1 \quad (1.28)$$

Zbir koeficijenata apsorpcije i refleksije je uvek jedinica. Što je jedan veći to je drugi manji. Njihove vrednosti se kreću u granicama: $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq r \leq 1$.



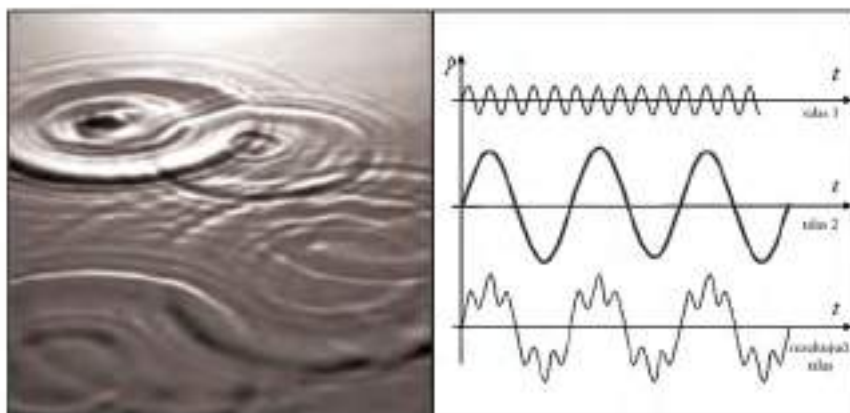
Slika 1.29 – Šematski prikaz apsorpcije, refleksije i transmisije zvučnih talasa

Postoje materijali koji veoma dobro upijaju zvuk, a to znači da će za te materijale α biti blizu jedinice, a r blizu nule. Isto tako ima materijala koji obrnuto reaguju pri dolasku zvučnih talasa.

Po pravilu se, u praksi, daju podaci za koeficijente apsorpcije datih materijala, a ako je potrebno, koeficijenti refleksije se lako mogu izračunati.

1.22 Princip superpozicije zvučnih talasa

Kada dva ili više talasa zahvate isti deo sredine onda je njihovo ukupno dejstvo jednako zbiru delovanja koje bi svaki talas imao kada bi samo on stigao u datu tačku. To sabiranje delovanja talasa se naziva superpozicija, a njen rezultat se može videti na slici 1.30 levo, gde su prikazani superponirani talasi na vodi. Slična je situacija i sa zvučnim talasima.



Slika 1.30 – Superpozicija talasa: levo - talasi na vodi, desno - sinusni talasi različitih frekvencija [28]

Intenzitet zvuka u tački preseka talasa pri superpoziciji, može biti veći ili manji od intenziteta koji potiče od pojedinih superponiranih talasa. Princip superpozicije se može sagledati na primeru sinusnih talasa prikazanih na slici 1.30 desno, gde je amplituda rezultujućeg, jednaka zbiru amplituda pojedinih talasa.

Specijalni oblici superpozicije zvučnih talasa su interferencija, difrakcija, izbijanje i stojeći talasi.

1.23 Interferencija zvučnih talasa

Interferencija je specijalni slučaj superpozicije, pri kojoj se superponirani talasi ili značajno pojačavaju (konstruktivna interferencija) ili značajno poništavaju (destruktivna interferencija). Drugim rečima to znači da interferencija može nastati samo između talasa iste ili približno iste frekvencije i konstantne fazne razlike tj. između *koherentnih* zvučnih talasa.

Da bi međusobno poništavanje ovakvih talasa bilo značajno, njihove amplitude treba da budu što približnijih vrednosti. Takvi talasi su oni koji potiču od istog izvora (direktni talas i njegova refleksija) ili od različitih izvora ali imaju iste odnosno približno iste frekvencije (dva ili više identičnih zvučnika povezani na isti električni signal čistog tona).

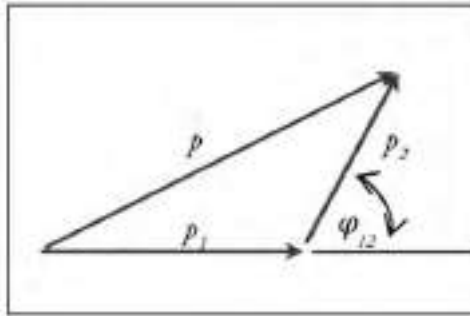
U opštem slučaju, kada je fazna razlika između dva zvučna talasa φ_{12} , a efektivne vrednosti njihovih pritiska u tački posmatranja p_1 i p_2 , iz fazorskog dijagrama sa slike 1.31 imamo da je efektivna vrednost ukupnog pritiska:

$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2 \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot \cos \varphi_{12}} \quad (1.29)$$

Na slici 1.32a je prikazan slučaj kada se dva izvora i slušalac nalaze na istoj liniji i izvori emituju identične sinusne talase. Kada su talasi u fazi

(što odgovara faznoj razlici $\varphi_{12} = 2m\pi$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$) rezultat interferencije je novi talas iste frekvencije i duplo veće amplitude, slika 1.32c. Kažemo da je u ovom slučaju došlo do konstruktivne interferencije.

Da bi talasi bili u fazi rastojanje između izvora mora imati vrednost $\Delta d = 2m(\lambda/2)$, gde je λ talasna dužina zvuka.



Slika 1.31 – Fazorski dijagram pritiska p_1 , p_2 i rezultantnog pritiska p

Kada su talasi u protiv-fazi (fazna razlika $\varphi_{12} = (2m + 1)\pi$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$) rezultat interferencije je nula, tj. talasi se međusobno poništavaju, slika 1.32b, i tada kažemo da je nastala destruktivna interferencija. U ovom slučaju rastojanje između izvora zvuka je $\Delta d = (2m + 1)(\lambda/2)$.

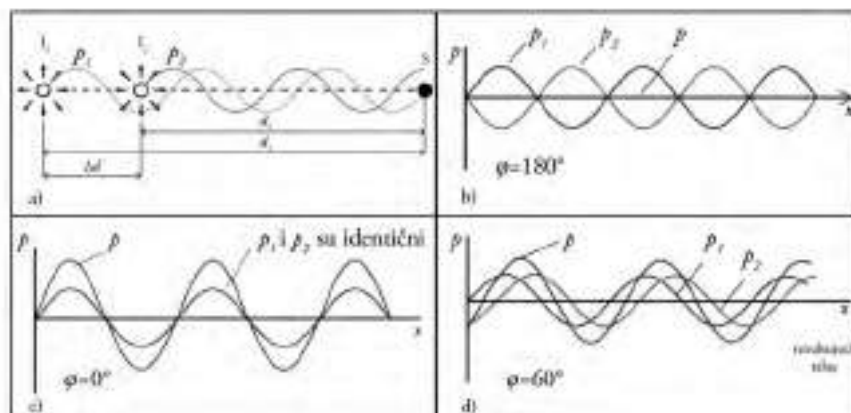
Kada je fazna razlika između talasa 60° ili $\pi/3$, dobija se kao rezultat interferencije novi talas nešto veće amplitude nego što je amplituda pojedinačnih talasa, slika 1.32d. Tada je rastojanje između izvora zvuka $\Delta d = (1/6)(12m + 1)(\lambda/2)$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Ako umesto zvučnih pritisaka poznamo nivoe zvuka, koje stvaraju pomenuta dva izvora, onda se ukupni nivo zvuka može izračunati prema izrazu:

$$L = 20 \log p = 20 \log \sqrt{(10^{L_1/20})^2 + (10^{L_2/20})^2 + 2(10^{L_1/20})(10^{L_2/20}) \cos \varphi_{12}} \quad (1.30)$$

U tabeli 1.3 dat je ukupan nivo zvuka ako oba izvora sa slike 1.32a imaju isti nivo od 70 dB ali se menja rastojanje Δd između njih ili fazna razlika φ_{12} između zvučnih talasa koje emituju, što je isto.

Kao što se vidi iz tabele 1.3, kada je fazna razlika između dve komponente zvučnog pritiska jednaka nuli (u fazi su) onda je ukupni nivo pritiska veći za 6 dB od nivoa pojedinačnih komponenti. Ako je ova razlika 180° (u protiv fazi su) onda je teorijski ukupni nivo pritiska jednak nuli, odnosno dejstvo ove dve komponente zvučnog pritiska se u tački posmatranja međusobno poništava.



Slika 1.32 – Interferencija zvučnih talasa dva identična izvora za različite vrednosti fazne razlike φ_{12} između talasa: a) izvori I_1, I_2 i slušalac S su na istoj liniji, b) $\varphi_{12} = 180^\circ$, c) $\varphi_{12} = 0^\circ$, d) $\varphi_{12} = 60^\circ$

Kada su u pitanju dva izvora koji emituju identične sferne sinusne talase postupak interferencije je nešto komplikovaniji, međutim i tada važi opšte pravilo da konstruktivna interferencija nastaje u onim tačkama prostora gde je putna razlika između dva talasa $\Delta r = 2m(\lambda/2)$, ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$), a destruktivna u tačkama gde je $\Delta r = (2m + 1)(\lambda/2)$, ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$). Koncentrični krugovi na slici 1.33a predstavljaju talasne frontove talasa koji potiču od dva identična izvora. Rastojanje između talasnih frontova jednako je talasnoj dužini zvuka λ . Na slici su naznačene linije na kojima se nalaze tačke u kojima dva talasa imaju istu putnu razliku Δr . Tamo gde je ova razlika jednaka parnom broju $\lambda/2$ nastaje konstruktivna interferencija, a tamo gde je razlika jednaka neparnom broju $\lambda/2$ dolazi do destruktivne interferencije. Na slici 1.33b prikazana je vizuelna predstava dobijenog rezultata superpozicije.

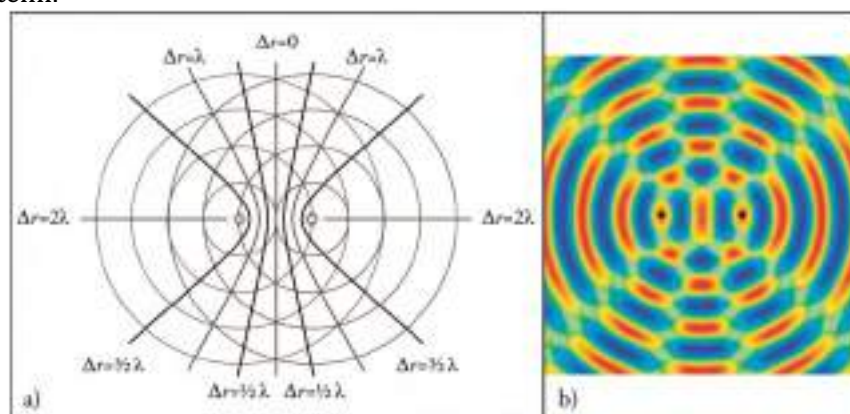
U praksi smo često izloženi zvuku koji emituju dva zvučnika u stereo postavci, ali nam iskustvo govori da se tada ne primećuju zone izrazito jakog i izrazito slabog intenziteta zvuka. To je zato što muzički signal koji se tada reprodukuje preko zvučnika sadrži veliki broj zvučnih talasa različitih frekvencija od kojih se neki dodatno reflektuju o zidove prostorije, i na mesto slušanja stižu sa najrazličitijim putnim razlikama pa se efekat izrazite interference gubi.

Interferencija zvučnih talasa ima mnogo primena. Jedna od interesantnijih je njeno korišćenje za slabljenje neželjenih zvukova odnosno buke i šumova. Naime, piloti aviona kao i drugih letilica sa velikim nivoima buke u kabini, koriste specijalno napravljene slušalice, takve da se u njima dešava destruktivna interferencija čiji je rezultat redukcija buke koja dolazi od motora.

Tabela 1.3 - Ukupan nivo zvuka koji stvaraju dva zvučna izvora čistog tona iste frekvencije, istog nivoa od 70 dB i različitih početnih faza.

L_1 (dB)	70										
L_2 (dB)	70										
φ_{12} (°)	0	10	30	40	50	100	120	150	160	170	180
L (dB)	76,02	75,99	75,72	75,48	75,17	72,18	70,00	64,28	60,81	54,83	0

Destruktivna interferencija se takođe primenjuje pri redukciji buke u ventilacionim kanalima, u kabinama putničkih aviona na komercijalnim letovima, kao i u unutrašnjosti putničkih automobila. Da bi se to postiglo koriste se elektroakustički pretvarači (mikrofoni i zvučnici) u kombinaciji sa elektronskim komponentama koje vrše veoma brzu analizu buke i na osnovu toga generišu signal šuma suprotnog dejstva. Kada se radi o destruktivnoj interferenciji zvučnih talasa, ne u okolini jedne tačke kao u slušalicama, već u širem prostoru, onda se moraju primeniti komplikovaniji elektroakustički sistemi.



Slika 1.33 – Superpozicija sfernih talasa koje emituju dva identična izvora: a) linije iste putne razlike talasa, b) vizuelna predstava zona konstruktivne i destruktivne interferencije [22]

1.24 Izbijanje

Pretpostavimo da u tačku slušanja stižu dva zvučna talasa istih amplituda i približno istih frekvencija f_1 i f_2 , koje možemo predstaviti izrazima:

$$p_1(t) = p \sin(\omega_1 \cdot t) = p \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t), \quad (1.31)$$

$$p_2(t) = p \sin(\omega_2 \cdot t) = p \sin(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t). \quad (1.32)$$

Interferencijom ovih talasa nastaje novi talas definisan relacijom:

$$\begin{aligned} p(t) &= p_1(t) + p_2(t) = \\ &= 2p \cos[2\pi(f_1 - f_2)t] \sin\left[2\pi\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right)t\right] \\ &= 2p \cos(2\pi f_u t) \sin(2\pi f t) \end{aligned} \quad (1.33)$$

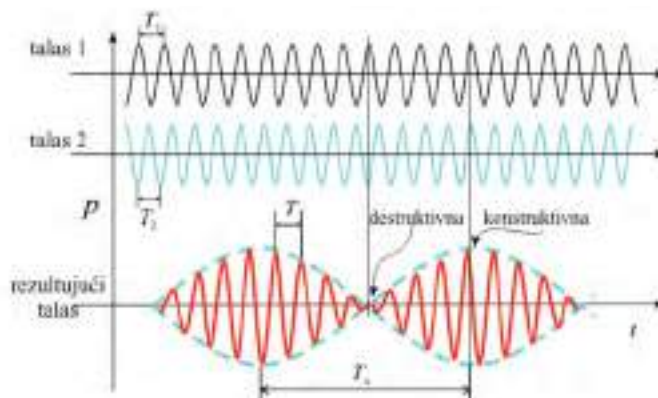
Kao što se iz jednačine (1.33) vidi rezultatni talas ima frekvenciju koja je jednaka srednjoj vrednosti frekvencija dva polazna talasa (dva talasa koji su stupili u interferenciju), tj.:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{f_1 + f_2}{2}, \quad (1.34)$$

dok se njegova amplituda periodično menja (fluktuiru) frekvencijom:

$$f_u = \frac{1}{T_u} = f_1 - f_2, \quad (1.35)$$

koja predstavlja razliku frekvencija polaznih talasa.



Slika 1.34 – Princip izbijanja prilikom interferencije zvučnih talasa bliskih frekvencija [28]

Fluktuiranje amplitude rezultujućeg talasa naziva se izbijanje ili udar, a frekvencija ovih promena naziva se frekvencija izbijanja odnosno udara. Interferencija talasa p_1 i p_2 prikazana je grafički na slici 1.34. Kao što se sa slike može videti, fluktuiranje amplitude rezultatnog talasa je posledica konstruktivne i destruktivne interferencije dva zvučna talasa bliskih frekvencija.

Primer izbijanja zvučnih talasa ima mnogo u praksi. Jedan takav primer je zvuk koji nastaje kada se jednovremeno pritisnu dve susedne dirke na klaviru.

Klavir-štimeri koriste efekat pojave izbijanja za štimovanje klavira. Ako prilikom štimovanja upotrebe, na primer, zvučnu viljušku frekvencije 256 Hz, i ona u kombinaciji sa odgovarajućom žicom klavira daje 2 izbijanja po sekundi, tada je frekvencija žice na klaviru ili 254 Hz ili 258 Hz [28].

1.25 Stojeći talasi i rezonanse

Kao što smo već rekli u odeljku 1.3 ravanske talase je moguće generisati u dugačkoj cevi krutih i ravnih zidova. Ako se na početku takve cevi postavi izvor zvuka (recimo zvučnik), a njen kraj se zatvori sa krutom pregradom, slika 1.35a, pored direktnog, u cevi će se javiti i reflektovani zvučni talas. Oba talasa su progresivni, samo što se u cevi kreću u suprotnim smerovima, direktni ka kraju cevi, a reflektovani od kraja cevi. Ako se radi o sinusnim talasima, oba će imati iste amplitude (pretpostavka je da u cevi nema gubitaka akustičke energije) i iste frekvencije, pa ih je moguće predstaviti sledećim izrazima:

$$p_1(x, t) = p \sin(\omega \cdot t - k \cdot x), \text{ direktni} \quad (1.36)$$

$$p_2(x, t) = p \sin(\omega \cdot t + k \cdot x), \text{ reflektovani.} \quad (1.37)$$

Pod opisanim uslovima u cevi će doći do interferencije direktnog i reflektovanog zvučnog talasa i nastaće novi talas za koji se dobija:

$$p(x, t) = p_1(x, t) + p_2(x, t) = 2p \cos(kx) \sin(\omega t) \quad (1.38)$$

Kao što se može videti iz izraza (1.38) rezultatni talas u cevi, koji se u ovom slučaju naziva *stojeći*, ima istu frekvenciju, ali mu se amplituda menja po kosinusnom zakonu i njena maksimalna vrednost je duplo veća nego kod direktnog i reflektovanog talasa pojedinačno.

Detaljnijom analizom izraza $2p \cos(kx)$, koji predstavlja amplitudu stojećeg talasa dolazimo do zaključka da duž cevi, odnosno duž ose x , postoje mesta gde je amplituda minimalna i mesta gde je maksimalna. Mesta minimalne amplitude pritiska se nazivaju *čvorovi* stojećeg talasa (amplituda jednaka nuli ako nema gubitaka u cevi) i data su izrazom:

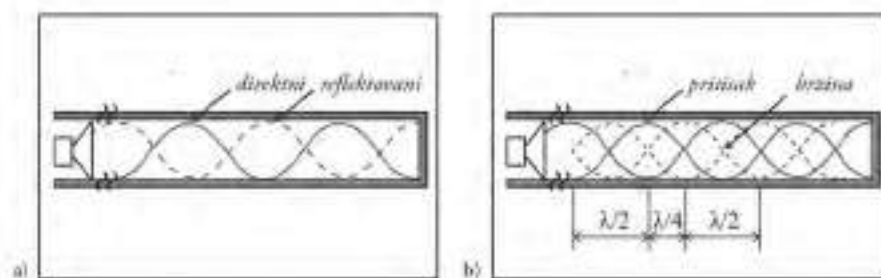
$$x_{m(\min)} = \pm(2m - 1) \frac{\lambda}{4}, (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.39)$$

dok se mesta maksimalne amplitude stojećeg talasa nazivaju *trbusi* i za njih važi relacija:

$$x_{m(\max)} = \pm m \frac{\lambda}{2}, (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.40)$$

Na slici 1.35b su prikazane promene amplitude stojećeg talasa pritiska duž koordinate x (puna linija). Čvorovi i trbusi stojećeg talasa se

tokom vremena uvek nalaze na istim mestama duž cevi, iz čega se zaključuje da se ovaj talas ne prostire, pa je zato i dobio ime *stojeći talas*. Razmak između uzastopnih čvorova ili trbuha stojećeg talasa je $\lambda/2$, a razmak između susednog švora i trbuha $\lambda/4$.



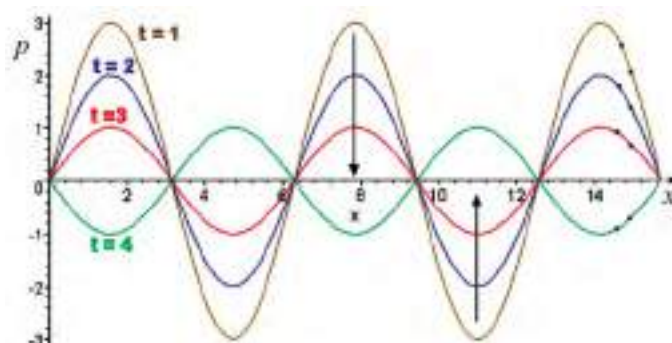
Slika 1.35 – Superpozicija direktnog i reflektovanog zvučnog talasa u dugačkoj zatvorenoj cevi: a) direktni i reflektovani talasi b) stojeći talasi pritiska i brzine čestica

Ako bi umesto zvučnog pritiska posmatrali promenu brzine čestica v duž cevi, dobili bi opet stojeći talas, koji je u odnosu na stojeći talas pritiska i vremenski i prostorno pomeren za ugao $\pi/2$ [6]. To znači da se čvorovi talasa brzine čestica nalaze na mestima trbuha talasa pritiska i obratno, slika 1.35b.

Na mestima čvorova talasa njihova amplituda (isto je i za pritisak i za brzinu čestica) je uvek jednaka nuli dok se na mestima trbuha menja u vremenu po kosinusnom zakonu, između maksimalnih graničnih vrednosti $-A$ i $+A$, brzinom definisanom frekvencijom f .

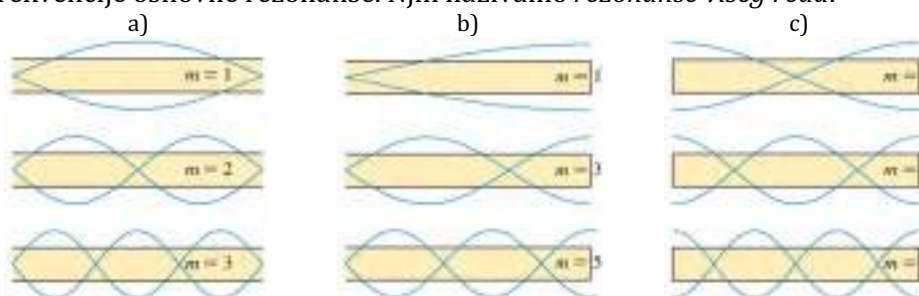
Na slici 1.36 prikazan je stojeći talas u četiri trenutka vremena takva da je $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$. Kao što se vidi, amplituda talasa na mestu neparnih trbuha se promenila od vrednosti $A = 3$ jedinice, preko vrednosti $A = 2$ jedinice, $A = 1$ jedinica do vrednosti $A = -1$ jedinica. Na parnim trbusima isti je korak i opseg promena, samo su vrednosti suprotnog znaka.

Ovde treba istaći činjenicu da stojeći talasi u cevi pri kojima dolazi do značajnih oscilacija vazdušnog stuba nastaju samo na određenim, tačno definisanim frekvencijama. Te frekvencije se nazivaju *frekvencije rezonanse cevi* ili *sopstvene frekvencije cevi*, a definisane su njenom dužinom i graničnim uslovima na njenim krajevima (zatvorena ili otvorena cev). Na svakoj od tih frekvencija stojeći talasi su različiti i odgovaraju posebnom načinu oscilovanja čestica u cevi, koji se još nazivaju i modovi (*modes*).



Slika 1.36 – Stojeći talas maksimalne amplitude $A=3$ jedinice, u različitim trenucima vremena: $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$

U cevi može nastati čitav niz stojećih talasa, sve manje talasne dužine a sve viših frekvencija. Najniža frekvencija rezonanse naziva se *osnovna razonansa cevi*. Sve ostale frekvencije rezonanse cevi su celobrojni umnošci frekvencije osnovne rezonanse. Njih nazivamo *rezonanse višeg reda*.



$$f_m = m \frac{c}{2L}, (m=1, 2, 3, \dots) \quad f_m = (2m-1) \frac{c}{4L}, (m=1, 2, 3, \dots) \quad f_m = m \frac{c}{2L}, (m=1, 2, 3, \dots)$$

Slika 1.37 – Oblici stojećeg talasa pritiska u cevi i vrednosti sopstvenih frekvencija rezonansi cevi: a) cev otvorena na oba kraja, b) cev zatvorena na jednom kraju, c) cev zatvorena na oba kraja [22]

Stojeći talasi se javljaju i na žicama i zategnutim membranama kod muzičkih instrumenata, u usnoj i nosnoj duplji kod izgovaranja samoglasnika i uopšte, u svakom ograničenom prostoru čije dimenzije nisu male u odnosu na talasnu dužinu zvuka. To znači da i svaki pomenuti prostor ili telo ima svoje modove oscilovanja i njima pripadajuće sopstvene frekvencije koje se često nazivaju i porcijali.

Prilikom formiranja stojećih talasa u cevi maksimalna pomeranja ili maksimalna brzina čestica vazduha (trbuh talasa) nalaze se na otvorenim krajevima cevi, gde ona nisu ničim ograničena, a čestice se praktično ne pomeraju (čvor) tamo gde je kraj cevi koji je zatvoren.

Kod stojećih talasa zvučnog pritiska je obrnuto, na otvorenim krajevima cevi je čvor (minimum ili nula) a na zatvorenim trbuh (maksimum). Rastojanje od trbuha do čvora je jednako četvrtini talasne dužine zvuka na datoj frekvenciji rezonanse cevi.

Znajući prethodno, nije teško odrediti oblik stojećih talasa i sopstvene rezonanse cevi za tri moguća slučaja graničnih uslova: cev otvorena na oba kraja, cev zatvorena na jednom kraju i cev zatvorena na oba kraja. Na slici 1.37 prikazani su oblici stojećeg talasa pritiska u cevi i vrednosti sopstvenih rezonansi cevi za prethodno navedena tri slučaja. Interesantno je istaći da su frekvencije rezonanse f_m u slučajevima kada je cev otvorena ili zatvorena na oba kraja iste, ali su čvorovi i trbusi stojećih talasa izmenili mesta, slike 1.37a i 1.37c. Cev zatvorena na jednom kraju ima samo neparne sopstvene frekvencije, tj. prvi, treći, peti itd. harmonike. U izrazima za sopstvene frekvencije rezonanse L je ukupna dužina cevi a c brzina zvuka.

Stojeći talasi mogu nastati i u otvorenom prostoru kada dva izvora stvaraju dva istovetna talasa koji se kreću u suprotnim smerovima po duži koja spaja ove izvore. Da bi se na ovakav slučaj mogla primeniti prethodno iznesena logika, to moraju biti ravanski talasi koji postoje samo u području relativno udaljenom od oba izvora.

1.26 Doplerov efekt

Doplerov efekt je pojava promene frekvencije, koju čuje slušalac, a koja nastaje usled međusobnog kretanja izvora i/ili slušaoca zvuka (npr. automobil koji velikom brzinom prolazi pored slušaoca).

Kada su izvor zvuka I i slušalac S nepokretni, i izvor zvuka proizvodi zvučne talase konstantne frekvencije f_i talasni frontovi (ekvifazne površine) emitovanog zvuka će se prostirati simetrično od izvora na sve strane brzinom c , slika 1.38a, koja predstavlja brzinu zvuka u mediju (ovde vazduh). Slušalac će čuti zvuk frekvencije jednake emitovanoj frekvenciji.

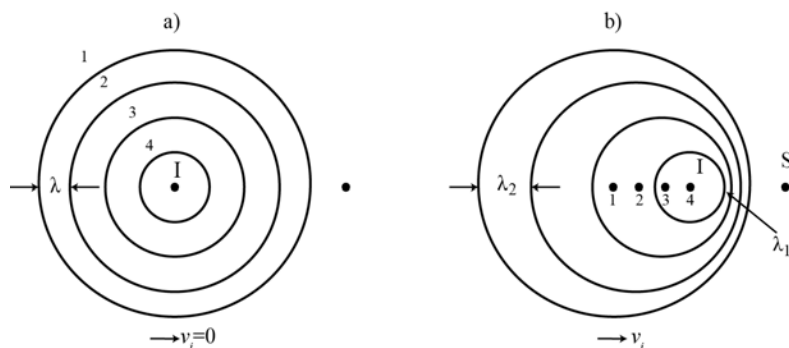
Ako se zvučni izvor kreće brzinom v_i prema slušaocu, emitujući i dalje zvuk konstantne frekvencije, centar svakog novog talasnog fronta (čela talasa) će biti u izvesnoj meri pomeren napred prema slušaocu, što je naznačeno pozicijama 0, 1, 2 i 3, slika 1.38b. Tako dolazi do gomilanja čela talasa ispred, i njihovog razređivanja iza izvora. Slušalac koji se nalazi ispred izvora čuće višu frekvenciju ($f_s > f_i$), a slušalac iza izvora nižu ($f_s < f_i$). Do istog zaključka se može doći ako se posmatraju talasne dužine zvučnih talasa ispred izvora λ_1 i iza izvora λ_2 .

Uzrok ovoj promeni visine tona je to što pri približavanju izvora zvuka slušaocu do njega dolazi više zvučnih talasa u jedinici vremena nego kad izvor zvuka stoji, tj. frekvencija zvuka koji slušalac čuje je tada viša od one koju izvor emituje. Situacija je obrnuta kad se izvor udaljava od slušaoca.

Pri tome nije važno da li se kreće izvor zvuka ili slušalac. U najopštijem slučaju mogu se kretati i izvor i slušalac istovremeno. Frekvencija koja se dobija kao rezultat Doplerovog efekta tada je data izrazom:

$$f_s = \frac{c \pm v_s}{c \mp v_i} f_i \quad (1.41)$$

gde je c brzina zvuka u vazduhu, v_s brzina kretanja slušaoca, v_i brzina kretanja izvora zvuka, a f_i njegova frekvencija. Pri korišćenju izraza (1.41) treba voditi računa da je prijemna frekvencija viša od stvarne ako se izvor i prijemnik kreću jedan prema drugom, a niža ako se izvor i prijemnik kreću jedan od drugog.

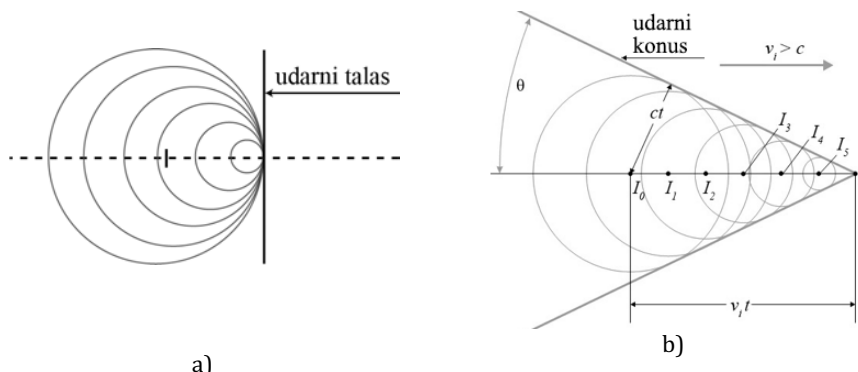


Slika 1.38 - Talasni frontovi tačkastog izvora zvuka: a) kada izvor i slušalac miruju, b) kada se izvor kreće prema slušaocu

1.27 Udarни talas i prasak

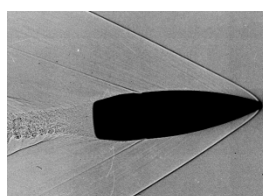
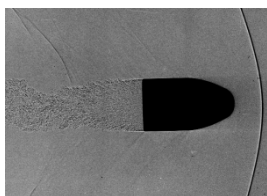
Kada brzina izvora dostigne brzinu zvuka ($v_i = c$) svaki naredni talas sustiže prethodni, jer se izvor kreće upravo brzinom zvuka. Čela talasa ispred izvora se koncentrišu u jednoj tački. Sustizanje talasnih frontova na prednjoj strani izvora, slika 1.39a, dovodi do konstruktivne interferencije emitovanog zvuka koja se manifestuje u pojavi tzv. udarnog talasa velikog intenziteta.

Kada izvor prekorači brzinu zvuka on počinje da se kreće ispred zvučnih talasa, slika 1.39b. Zvuk koji stvara izvor se širi sferno od tačke u kojoj je emitovan. Između zvučnih talasa dolazi opet do konstruktivne interferencije, ali sada duž konusa (obvojnica talasnih frontova), gde talasi stižu istovremeno. Tako se u ovom slučaju udarni talas formira po celoj površini konusa. Unutar konusa interferencija je uglavnom destruktivna pa je intenzitet zvuka manji. Što je veća brzina izvora manji je polu-ugao konusa θ .



Slika 1.39 - Udarni talasi koje stvara izvor kada se kreće: a) brzinom zvuka i b) nadzvučnom (supersoničnom) brzinom [16].

Ovde treba naglasiti činjenicu da uvek u fluidu, ispred objekta koji se kroz njega kreće, postoji izvesni nadpritisak. Taj nadpritisak je mali pri podzvučnim brzinama ($v_i < c$) ali se povećava veoma brzo (sa kvadratom brzine) kada se objekat približava nadzvučnim brzinama, dostižući veoma velike vrednosti u uslovima kada je $v_i \geq c$. Generisani nadpritisak je u stvari poremećaj u fluidu odnosno udarni talas koji postoji svo vreme dok se objekat kreće nadzvučnom brzinom. Stvaranje udarnog talasa je prouzrokovano kretanjem objekta a ne zvukom kojeg objekat emituje, kako se po nekad pogrešno misli.



a)

b)

Slika 1.40 - Udarni talasi koje proizvodi metak prilikom pucanja iz vatrenog oružja: a) kada se kreće brzinom zvuka, b) kada se kreće supersoničnom brzinom.



Slika 1.41 - Udarni talasi na vodi koji stvara čamac koji se kreće brzinom većom od brzine talasa

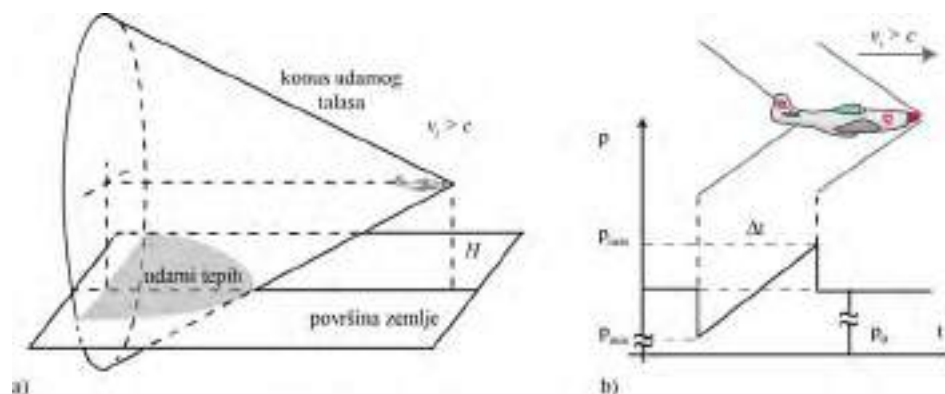
U prilog ovoj konstataciji ide činjenica da vrh biča koji može da prekorači brzinu zvuka i proizvede udarni talas koji se čuje kao prasak nije zvučni izvor. Takođe i metak se, pri pucanju iz vatrenog oružja, slike 1.40a i 1.40b, kreće supersoničnom brzinom i pucanj koji se tada čuje je velikim delom posledica udarnog talasa, a sam metak ne generiše nikakav sopstveni zvuk.

Interesantna analogija sa udarnim talasom u vazduhu je talasni front oblika slova V koji se formira prilikom kretanja čamca na vodi u slučaju kada

je njegova brzina veća od brzine talasa koje stvara na površini vode, slika 1.41.

Pri supersoničnim brzinama ne čuje se zvuk kada se izvor približava posmatraču, jer se izvor kreće brže od zvuka koji generiše svojim kretanjem. Tek kada izvor prođe pored posmatrača, posmatrač će moći da čuje zvuk koji je izvor emitovao. Ovi vremenski intervali se nazivaju zona tišine i zona delovanja.

Poznato je da su letilice koje se kreću supersoničnim brzinama (avioni, svemirski brodovi) izvori udarnih talasa, koji se još nazivaju Mahovi (*Ernst Mach*, fizičar) talasi a koji su u stvari talasi poremećaja pritiska o kojima je prethodno bilo reči. Kada letilica supersoničnom brzinom preleti iznad posmatrača, udarni talasi putuju prema zemlji, gde ih on čuje kao prasak (zvučni udar, eksplozija), ali tek kad se letilica već udaljila, slika 1.42a. Područje na zemlji u kojem se može čuti zvučni udar naziva se udarni tepih i odgovara onoj površini koju zahvata konus udarnog talasa. Intenzitet udara je najveći direktno ispod putanje leta i smanjuje se na obe strane od nje.



Slika 1.42 - Udarni talas koji se na zemlji čuje kao prasak: a) zona udarnog konusa i udarnog tepiha, b) vremenski dijagram zvučnog praska.

Prasak se može čuti duž putanje leta, približno u zoni širokoj oko 1,5 km za svakih 300 m visine letilice (npr. širina zone 4,5 km ako je letilica na visini od 900 m) [22]. Analiza zvučnog praska koji se čuje na zemlji pokazuje da njegov vremenski dijagram liči na latinično slovo N, zbog čega se naziva N talas, slika 1.42b. Ovakav oblik je posledica interakcije vazdušnih čestica sa strukturom aviona. Nagli skok zvučnog pritiska odgovara prednjoj ivici aviona (nos, prednja ivica krila), zatim jačina pritiska linearno opada spuštajući se do približno iste negativne vrednosti i na zadnjoj ivici aviona se naglo vraća nazad na nultu vrednost (vrednost atmosferskog pritiska). U stvarnosti postoje dva praska u trenucima brzih promena pritiska, jedan koji potiče od prednje a drugi od zadnje ivice aviona, ali se obično na zemlji

čuju kao jedan, jer se dešavaju u bliskim trenucima vremena. N-talas traje oko $\Delta t = 300$ ms, podiže ukupni pritisak za $p_{max} = 50$ Pa do 100 Pa (128 dB do 134 dB) u odnosu na atmosferski, a većina generisane zvučne energije je na frekvencijama ispod 100 Hz, što objašnjava činjenicu zašto ga je moguće čuti sa velikih rastojanja [12].

Takođe, udarni talas može prouzrokovati manju ili veću štetu na objektima na zemlji (pucanje stakala na prozorima i vratima, na primer) ako potiče od letilice velikih dimenzija i/ili letilice koja leti supersoničnom brzinom na malom rastojanju od zemlje.

Zvučni prasak koji slušalac čuje na zemlji prilikom preleta „nadzvučne“ letilice se često, pogrešno, naziva „proboj zvučnog zida“. Zbog toga ovde treba naglasiti da proboj zvučnog zida ne postoji kao fizička pojava, već je popularni naziv za prelaz iz leta podzvučnom u let nadzvučnom brzinom. Izraz je čudna kombinacija termina zvučna barijera (*sound barrier*) i zvučni prasak (*sonic boom*), nastao u vreme kada je pred konstruktorima i proizvođačima aviona postojao veliki broj tehničkih i tehnoloških prepreka (barijera) koje je trebalo savladati da bi avioni leteli nadzvučnim brzinama.



Slika 1.43 – Oblak kondenzovane vodene pare iz vazduha koji se može videti oko aviona koji leti nadzvučnom brzinom

Ipak treba imati u vidu da u trenutku kada avion dostigne brzinu zvuka, usled različite prirode podzvučnog i nadzvučnog strujanja vazduha, trajni poremećaj itekako postoji, ali poremećaj u upravljivosti i stabilnosti aviona. Kod savremenih nadzvučnih letilica pomenute prepreke su već davno prevaziđene i prelaz iz podzvučnog u nadzvučni let i obratno, je uobičajena i svakodnevna pojava, tako da više u vezi sa tim ne postoji nikakva „zvučna barijera“.

Takođe se mora naglasiti da trenutak percepcije praska od strane posmatrača na zemlji uopšte ne odgovara trenutku prelaska sa podzvučne na nadzvučnu brzinu kretanja letilice. Da bi slušalac mogao čuti prasak, letilica mora već da se kreće nadzvučnom brzinom i da postoji konusni udarni talas. Tek kada udarni talas dospe do zemlje, svaki od posmatrača će

osetiti prasak, u trenutku koji zavisi od njegove pozicije na udarnom tepihu. Drugim rečima, percepcija praska od strane pojedinih posmatrača nastaje u različitim trenucima vremena, zavisno od toga gde se nalaze duž tepiha udarnog talasa, slika 1.42a.

Tokom leta aviona nadzvučnim brzinama može se primetiti beli prsten koji ga obuhvata, slika 1.43, i koji se kadkada povezuje sa takozvanim probijanjem zvučnog zida. To je kondenzovana vodena para iz vazduha, koja nema nikakve veze sa trenutkom opažaja praska na zemlji. Naime na pojedinim površinama aviona (iza nosa, na krilima, na telu, ...) tokom nadzvučnog leta, usled velike brzine čestica vazduha, koje ih obstrujavaju, pojavljuju se zone niskog pritiska, niske temperature i snižene vlažnosti vazduha zbog čega dolazi do kondenzacije vodene pare i pojave belog oblaka oko tela aviona. Ako avion nastavi da ubrzava, oblak pare se pomera dalje prema zadnjim delovima aviona.

1.28 Pitanja za proveru znanja

1. Šta je Hz? Koje frekvencije ograničavaju čujni opseg?
2. Koje vrste talasa razlikujemo? Navesti njihove osnovne osobine
3. Šta je talasna dužina? Od čega ona zavisi i koliko iznosi na graničnim frekvencijama čujnog opsega?
4. Definisati intenzitet zvuka. Kakva je njegova veza sa zvučnim pritiskom? Kako intenzitet zvuka opada sa rastojanjem od zvučnog izvora?
5. Šta je šum? Koje vrste šuma razlikujemo i koje su njihove karakteristike?
6. Pri zračenju više izvora istovremeno, kako se sabiraju intenziteti zvuka, a kako zvučni pritisci?
7. Koji faktori utiču na slabljenje zvuka u vazduhu u realnim uslovima?
8. Šta je difrakcija i kada ona nastupa?
9. Šta je refrakcija zvučnih talasa?
10. Na koji način je uveden koeficijent apsorpcije? U kakvoj su vezi koeficijenti apsorpcije i refleksije? U kojim granicama se ovi koeficijenti mogu menjati?

1.29 Literatura

- [1] L.L. Beranek, *Acoustics*, McGraw-Hill, 1954.
- [2] H.F. Olson, *Acoustical Engineering*, D.Van Nostrand Company, Inc., 1957.
- [3] T. Jelaković, *Zvuk, sluh, arhitektonska akustika*, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- [4] J.R. Hassall, K. Zaveri, *Acoustic Noise Measurement*, Bruel & Kjaer, 1979.
- [5] A. Osnović, I. Ferenc, S. Tabai, *Akustika i tonsko snimanje*, Radničko i narodno sveučilište „M.Pijade“, Zagreb, 1978.

- [6] H.Š. Kurtović, *Osnovi tehničke akustike*, Naučna knjiga, Beograd 1982.
- [7] Sound System Design, Reference Manual, JBL, 1982.
- [8] G. Bellou, Ed., *Handbook for Sound Engineers*, Howard W.Sams &Co. 1988.
- [9] *Sound advice, Sound System Handbook*, Bouyer and Bureau Veritas, 1993.
- [10] *Basic Concepts of Sound*, Brüel & Kjær Sound and Vibration Measurement A/S, 1998.
- [11] Z. Petrović, "Probijanje zvučnog zida", Aero magazine br. 9, 1999.
- [12] Young, „Sonic booms of space shuttles approaching Edwards Air Force Base, 1988–1993“, *JASA* Vol. 111, 2001.
- [13] J. Cvetić, *Talasi* (Skripta), Autorko izdanje (SGR-ŽIG), 2003.
- [14] M. Prašćević, D. Cvetković, *Buka u životnoj sredini*, Fakultet zaštite na radu, Niš, 2005.
- [15] P. Pravica, D. Drinčić, *Elektroakustika*, VIŠER, Beograd, 2008.
- [16] R.A. Serway, C. Vuille, J.S. Faughn, *College Physics*, Eighth Edition, Brooks/Cole, 2009.
- [17] F.A Everest, K.C. Pohlmann, *Master Handbook of Acoustics*, Fift Ed., Mc. Graw Hill, 2009.
- [18] G. Griffiths, *Linear and nonlinear waves*, City University, UK. Lehigh University, USA, 2009.
- [19] M. Mijić, *Audio sistemi*, Akademska misao, 2011.
- [20] L. L Beranek, T.J. Mellow, *Acoustics, Sound Fields and Transducers*, Academic Press, 2012.
- [21] R. D. Knight, *Physics for scientists and engineers: Strategic Aprouch*, Third Ed., Pearson Education, Inc., 2013.
- [22] R.D. Knight, B. Jones, S. Field, *College Physics: A Strategic Aprouch*, Third Ed., Pearson Education, Inc., 2015.
- [23] V. Delić, Fizika zvuka, prezentacija, FTN Novi Sad, 2013, <http://vtsns.edu.rs/wp-content/uploads/2013/12/MM2-1-Fizika-zvuka.pdf>, preuzeto: decembar 2017.
- [24] K. Heutschi, *Lecture Notes on Acoustics I*, Swiss Federal Institute of Technology, ETH, Zurich, 2016, <http://www.isiweb.ee.ethz.ch/teaching/courses/ak1/skriptA1-english.pdf>, preuzeto: decembar 2017.
- [25] L.R Benson, *Quieting the boom, The shaped sonic boom demonstrator and the quest for quiet supersonic flight*, National Aeronautics and Space Administration, 2013, <http://www.nasa.gov/ebooks>, preuzeto: januar 2018.
- [26] The Physics Classroom, www.thephysicsclassroom.com/class/waves, preuzeto: januar 2018.

- [27] Solent Acoustics,
<https://solentacoustics.wordpress.com/2016/09/14/the-acoustics-of-sonic-booms/>, preuzeto: januar 2018.
- [28] Talasi – PMF, Glava 9,
<http://tesla.pmf.ni.ac.rs/people/nesiclj/predavanja/biologija/2009z/glava9.pdf>, preuzeto: januar 2018.
- [29] The physics of sound
<https://homepages.wmich.edu/~hillenbr/206/ac.pdf>, preuzeto: januar 2018.

Akustika prostorija

2.1 Uvod

U ovom poglavlju se govori o akustičkim parametrima relevantnim a prostorije različite namene. Tako je prvo objašnjena priroda zvučnog polja u prostoriji, a zatim definisani apsorpcija i vreme reverberacije prostorije kao i intenzitet zvuka u prostoriji.

Deo poglavlja je posvećen apsorberima zvuka (porozni materijali, akustički i mehanički apsorberi) i načinu izražavanja i merenja njihovih apsorpcionih karakteristika.

Posebno će biti govora o uticaju geometrijskog oblika prostorije na njene akustičke karakteristike.

U drugom delu poglavlja izložen je način merenja vremena reverberacije kao i uobičajeni postupak proračuna ovog parametra. Takođe je analiziran problem akustički spregnutih prostorija i ukratko objašnjen postupak analize zvučnog polja u prostorijama.

2.2 Zvučno polje u prostorijama

U zatvorenim prostorijama prostiranje zvučnih talasa predstavlja dosta složenu pojavu. Za razliku od slobodnog prostora, gde postoji samo jedan talas koji se širi od zvučnog izvora, u zatvorenim prostorijama uvek postoji direktan talas i reflektovani talasi.

U svakoj tački u prostoriji zvučno polje je rezultat superpozicije velikog broja talasa. Ako posmatramo jednu tačku u prostoriji onda u nju stiže uvek prvo direktni talas, koji se najkraćim putem prostire od zvučnog izvora do tačke prijema. Svi ostali talasi su rezultat refleksije. Zato se oni i nazivaju reflektovani talasi. Njih treba malo bolje opisati.

Do refleksije (odbijanja) zvučnih talasa u prostoriji dolazi tako što se od svih površina koje ograničavaju prostoriju (zidovi, pod, tavanica) talasi odbijaju. Ako posmatramo jedan talas, u određenom pravcu, on će se reflektovati recimo od zida, pa će nastaviti dalje da se prostire i po drugi put će se reflektovati udarivši o neku drugu površinu i tako dalje. Razlikujemo prve refleksije, koje su veoma važne, jer su još uvek dosta jake, a zatim dolaze sve ostale kojih može da bude deset, dvadeset pa i više.

Kada je reč o refleksijama zvučnih talasa u prostoriji treba imati na umu dve stvari. Prvo, reflektovani talasi se, u energetskom pogledu, sabiraju

sa direktnim talasom, tako da ukupni intenzitet zvuka u tački prijema u prostoriji zavisi od toga kolika je energija svih talasa zbirno. I drugo, vreme kašnjenja reflektovanog talasa za direktnim talasom ima veoma važnu ulogu u percepciji zvuka na mestu prijema (naše uvo, na primer, ili mikrofoni). Polazeći od osobina čovečijeg uva, o čemu će detaljnije biti reči u sledećem poglavlju, svi talasi koji stignu na mesto prijema u vremenu od oko 50 ms posle direktnog talasa, bivaju integrisani i učestvuju u formiranju osnovnog utiska o zvuku u prostoriji. Zato se vreme dolaska prve refleksije, pa i refleksija višeg reda posebno prati i podešava, kako bi njihov uticaj na percepciju zvuka bio koristan.

Intenzitet reflektovanog zvuka zavisi od toga kakvi su materijali, u pogledu apsorpcionih osobina, postavljeni na zidove, pod i tavanicu. Sigurno je da pri svakoj refleksiji intenzitet zvučnog talasa slabi, ali koliko zavisi od materijala kojim je prostorija obložena.

U svakoj prostoriji, zahvaljujući direktnom talasu i brojnim refleksijama, dolazi do formiranja zvučnog polja koje je najčešće ujednačenog nivoa u celoj prostoriji. Takvo zvučno polje, čiji je nivo u svim tačkama u prostoriji približno isti, naziva se *homogeno zvučno polje*. Pri projektovanju sala (pozorišta, koncertne sale, bioskopi i sl.) uvek se teži da zvučno polje bude što ujednačenije, što znači da može da se tretira kao homogeno. U uslovima homogenog zvučnog polja u prostoriji i uslovi slušanja postaju podjednaki, čime se ostvaruje i podjednak kvalitet percepcije, bez obzira u kom delu sale se nalazi mesto prijema zvuka. Homogeno zvučno polje zavisi od geometrijskog oblika sale, kao i od apsorpcionih osobina materijala koji su postavljeni kao obloga u sali.

Reflektovani zvučni talasi dolaze iz svih pravaca u prostoriji jednakom verovatnoćom. Ovim problemom se bavi statistička teorija koja potvrđuje da u svakoj tački u prostoriji zvučni talasi dolaze podjednako iz svih pravaca, i na taj način stvaraju tzv. *difuzno zvučno polje*. Normalno u salama vlada difuzno zvučno polje. U posebnim slučajevima, kada geometrija sale nije zadovoljavajuća, ako postoje, na primer, „džepovi“ iz kojih će se zvuk reflektovati sa većim zakašnjenjem, polje nije difuzno. Na formiranje homogenog i difuznog zvučnog polja u sali utiču, već pomenute, apsorpcione osobine materijala postavljanog na granične površine sale. Potrebno je da koeficijenti apsorpcije ne budu veći od 0,3, kako bi i refleksije zvuka bile ujednačene u energetskom pogledu, jer pri velikim upijanjima zvuka, kada su koeficijenti apsorpcije materijala preko 0,3, mogu da se jave i izvesne nepravilnosti u formiranju zvučnog polja.

Do formiranja zvučnog polja u prostoriji dolazi po aktiviranju zvučnog izvora. Potrebno je izvesno vreme, koje se meri milisekundama, da u celoj prostoriji nastupi homogeno zvučno polje. Taj relativno kratki period formiranja zvučnog polja zavisi od dimenzija prostorije, kao i od apsorpcije

zvuka koju unose pojedine površine. Kada se zvučno polje formira govorimo o *stacionarnom stanju*, koje će trajati sve dok zvučni izvor zrači. Stacionarno stanje nastupa kada se izjednači akustička energija koju emituje zvučni izvor sa utrošenom energijom u prostoriji (usled prostiranja kroz vazduh i apsorpcije svih graničnih površina). Po isključenju zvučnog izvora nastupa period bržeg ili sporijeg iščezavanja zvuka, što je takođe vrlo karakteristično za svaku prostoriju. O ovim pojavama će biti detaljnije reči u daljem izlaganju.

2.3 Apsorpcija prostorije

Među osnovne veličine, karakteristične za svaku prostoriju, spada apsorpcija zvuka. U realnim uslovima slabljenje zvuka usled prostiranja kroz vazduh u prostoriji je relativno malo u odnosu na apsorpciju zvuka do koje dolazi zbog uticaja pojedinih površina prostorije. Slabljenje u vazduhu može biti nešto više izraženo u velikim salama (sportske i druge hale), gde je i put zvučnih talasa između dve refleksije produžen.

Pri svakoj refleksiji zvučnog talasa, deo akustičke energije će biti apsorbovan, a deo će se vratiti u salu. U odeljku 1.21 definisan je koeficijent apsorpcije materijala (prepreke), koji će sada biti korišćen za uvođenje pojma apsorpcije prostorije.

Po definiciji apsorpcija (A) je proizvod površine (S) i koeficijenta apsorpcije (α) materijala nanetog na tu površinu. Tako je

$$A = \alpha \cdot S, \quad (2.1)$$

i izražava se u metrima kvadratnim ($[A] = \text{m}^2$). Pošto koeficijent apsorpcije zavisi od frekvencije, to i apsorpcija takođe zavisi od frekvencije.

U prostoriji imamo razne materijale na graničnim površinama, pa je ukupna apsorpcija prazne sale (A_0) data kao zbir apsorpcija pojedinih površina, što znači:

$$A_0 = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad \text{ili} \\ A_0 = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots \quad ([A_0] = \text{m}^2) \quad (2.2)$$

pri čemu je A_i apsorpcija „ i ” -te površine, a α_i i S_i odgovarajuće vrednosti koeficijenta apsorpcije i površina.

Često se koristi pojam srednjeg koeficijenta apsorpcije neke prostorije, čija je oznaka $\bar{\alpha}$ ili α_{sr} . Tako je:

$$\bar{\alpha} = \frac{A_0}{S}, \quad (2.3)$$

gde je S ukupna površina prostorije.

Na apsorpciju zvuka u prostoriji utiču ljudi koji gledaju ili slušaju ono što se u sali priređuje. Njihov doprinos apsorpciji je značajan. Svaki čovek unosi određenu apsorpciju svojim prisustvom u sali. Eksperimentalno je

ustanovljeno da apsorpcija jednog čoveka iznosi, na srednjim frekvencijama, oko:

$$A_c = 0,5 \text{ m}^2 \quad (2.4)$$

Što je više ljudi u sali to će i njihov uticaj na apsorpciju zvuka biti veći, pa je ukupna apsorpcija (A_u), sa posetiocima u sali:

$$A_u = A_0 + n A_c \quad ([A_u] = \text{m}^2), \quad (2.5)$$

gde je n broj ljudi.

Praktično, u salama u kojima su sva mesta popunjena, apsorpcija posetilaca je veća, pa i znatno veća, od apsorpcije prazne sale. Pored toga broj posetilaca dosta menja apsorpciju zvuka u sali, tako da uopšte nije svejedno da li u sali koja ima 1000 mesta, prisustvuje 100 ljudi ili su sve stolice popunjene. Problem se svodi na to da od broja posetilaca zavise i akustički uslovi u sali. Ovaj problem se dosta uspešno rešava pogodnom konstrukcijom stolica. Naime, bogato tapacirane stolice imaju apsorpciju skoro istu kao i u slučaju kada u njima sedi čovek. Izborom odgovarajućih stolica neće doći do značajnije promene apsorpcije u sali bez obzira koliko posetilaca je prisutno. Dobar primer za to je sala Centra „Sava“ u Beogradu u kojoj su postavljene stolice, čija apsorpcija ispunjava navedeni uslov.

2.4 Vreme reverberacije

Pre oko stotinak godina američki fizičar Sabin uveo je pojam vremena reverberacije. Ova veličina je vremenom postala osnovni kriterijum prema kome se ocenjuje akustički kvalitet prostorija.

Vreme reverberacije je, po definiciji, ono vreme koje je potrebno da intenzitet zvuka I u prostoriji opadne na svoj milioniti deo. To znači da se po prestanku rada zvučnog izvora u sali, intenzitet zvuka smanjuje i moguće je izmeriti vreme za koje će oslabiti 10^6 puta.

Ako se promena intenziteta zvuka izrazi preko decibela, onda govorimo o promeni nivoa intenziteta i tada vremenu reverberacije odgovara smanjenje nivoa za 60 dB.

Za sada se daje samo obrazac pomoću koga se promena nivoa intenziteta izražava u dB. On glasi:

$$\Delta L = 10 \log \frac{I_1}{I_2}, \quad [\Delta L] = \text{dB}, \quad (2.6)$$

gde je I_1 intenzitet zvuka u trenutku prestanka rada zvučnog izvora, dok je I_2 intenzitet zvuka smanjen 10^{-6} puta. Obrazujući relativni odnos ova dva intenziteta i logaritmujući ga, na način prikazan u gornjoj formuli, dobija se promena nivoa zvuka u dB. Vreme koje je potrebno da nivo zvuka opadne za 60 dB odgovara vremenu reverberacije.

Eksperimentalno, Sabin je vreme reverberacije prostorije uspeo da izrazi i odgovarajućom formulom. Kasnije je i teorijski Sabinov obrazac potvrđen. Izvođenje obrasca ovde neće biti sprovedeno, jer izlazi iz okvira ovog izlaganja.

Sabinov obrazac glasi:

$$T_r = \frac{k \cdot V}{A}, \quad (2.7)$$

pri čemu je k konstanta ($k = 0,161 \text{ s/m}$), V zapremina prostorije ($[V] = \text{m}^3$), a A ukupna apsorpcija zvuka u prostoriji ($[A] = \text{m}^2$). Vreme reverberacije se izražava u sekundama ($[T_r] = \text{s}$).

Uslovi primene (korišćenja) Sabinovog obrasca dosta su precizno predviđeni. Naime, Sabinov obrazac ne važi u svim slučajevima. Primena Sabinovog obrasca je moguća u sledećim situacijama:

- kada su dimenzije prostorija relativno velike u odnosu na talasnu dužinu zvuka, što znači da u prostorijama male zapremine Sabinov obrazac ne važi (automobilske kabine, telefonske govornice i sl.),
- kada u prostoriji vlada homogeno zvučno polje, i
- kada je srednji koeficijent apsorpcije u prostoriji 0,3 i manji.

Za prostorije koje ne ispunjavaju navedene uslove postoje drugi obrasci (Ayringov, na primer), koji zadovoljavaju i omogućuju korektno proračunavanje vremena reverberacije.

Prema Sabinovom obrascu vreme reverberacije će se smanjivati ukoliko apsorpcija zvuka u prostoriji raste. To praktično znači da će vreme reverberacije prazne sale biti najveće, dok će ulaskom publike doći do smanjenja vremena reverberacije. Prema već datom izrazu za ukupnu apsorpciju zvuka u prostoriji, može se napisati da je:

$$T_r = \frac{0,161 \cdot V}{A_0 + nA_{\xi}}. \quad (2.8)$$

Koristeći se podatkom o vremenu reverberacije, koji evidentno ukazuje na brzinu kojom zvuk u sali iščezava, došlo se do vrednosti vremena reverberacije za prostorije različite namene. Najpogodnije vreme reverberacije prostorije, koje garantuje adekvatne akustičke uslove, naziva se optimalnim vremenom reverberacije. U tabeli 2.1 date su vrednosti optimalnog vremena reverberacije za nekoliko tipičnih prostorija. Podatak o vremenu reverberacije odnosi se na srednje frekvencije na oko 1000 Hz. Ovo je važno istaći, jer vreme reverberacije zavisi od frekvencije, pošto apsorpcija, koja ga brojno određuje, takođe zavisi od frekvencije.

Od vremena reverberacije zavisi razumljivost govora. Što je vreme reverberacije veće to je razumljivost govora manja, jer dolazi do preklapanja pojedinih slogova. Zato su govorna studija, po pravilu, najprigušenije

prostorije u odnosu na zvuk. Data vremena reverberacije za prostorije različite namene su rezultat iskustva. Očigledno je da vreme reverberacije raste od prostorija namenjenih samo za govor, pa do prostorija u kojima se izvodi muzika. Crkvena akustika podrazumeva veliku reverberaciju, s tim što je u tabeli navedeno da vrednosti idu do oko 4 sekunde, međutim mogu da budu i veće kada se radi o crkvama veoma velike zapremine.

Tabela 2.1 - Optimalno vreme reverberacije na oko 1000 Hz za prostorije različite namene

Redni broj	Vrsta prostorije	Optimalno vreme reverberacije [s]	
1.	Govorni studio	0,2 - 0,4	za pune sale
2.	Slušaonice, sale za konferencije	0,7 - 0,9	
3.	Pozorišta	0,9 - 1,0	
4.	Bioskopi	1,0 - 1,1	
5.	Opere, mjuzikli	1,2 - 1,4	
6.	Koncertne sale	1,7 - 2,0	
7.	Crkve	3,0 - 4,0	

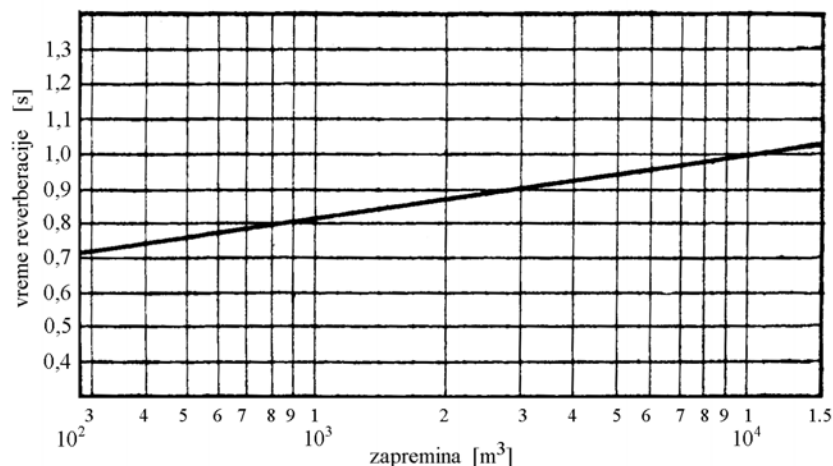
Vredi pomenuti specifičnost studija u kojima se snima muzika. Pogodno je da u njima vreme reverberacije bude nešto manje nego u koncertnim salama gde se uživo sluša muzika.

Pri nešto manjem vremenu reverberacije pojedini instrumenti i grupe instrumenata, pa i ljudski glas, dobijaju svoju pravu boju. Ova, nešto manja reverberacija može se jednostavnim postupkom pri obradi snimka povećati, čime se stvaraju uslovi koji bi bili u koncertnim salama. O veštačkom vremenu reverberacije biće kasnije reči.

Pored namene prostorije, druga veličina od koje zavisi vreme reverberacije je zapremina prostorije. Prema Sabinovom obrascu vreme reverberacije je direktno srazmerno zapremini. Na slici 2.1 prikazana je zavisnost optimalnog vremena reverberacije, na frekvencijama oko 1000 Hz, od zapremine i to za pozorišta. Ovaj primer je uzet zbog toga što je karakterističan za govor čija razumljivost zavisi od vremena reverberacije.

Primer na slici 2.1 se odnosi na punu dvoranu. U praksi se zna da neće biti veliki nedostatak ukoliko se ostvari nešto manje vreme reverberacije od naznačenog, ali isto tako vreme reverberacije ne sme biti mnogo manje, jer bi govorniku (glumcu) bilo teško da ispuni dvoranu zvukom, pošto bi se pojavio osećaj „gluve“ prostorije. Sve ovo važi samo ukoliko se radi o prirodnom zvuku, bez ozvučenja, što je danas sve ređi slučaj.

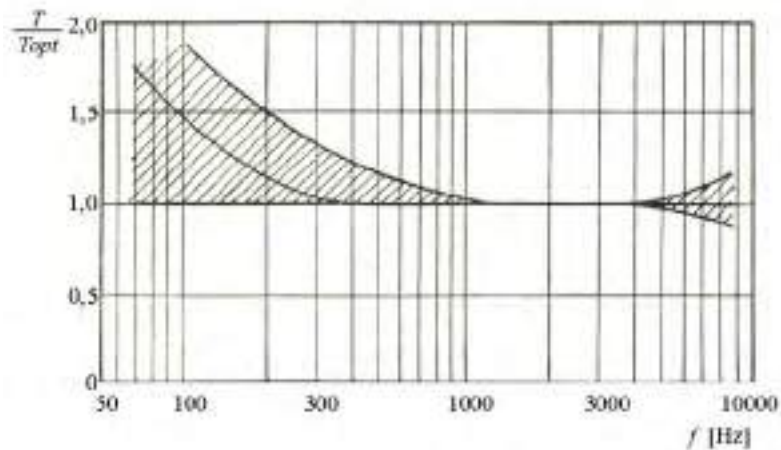
Pošto zapremina prostorije u znatnoj meri određuje vreme reverberacije došlo se do podatka, koji se u praksi koristi, a koji vodi računa o tome da normalno 1/3 apsorpcije u sali pripada graničnim površinama, dok 2/3 otpada na fotelje i publiku. U vezi sa tim za praksu je korisno znati da je najpogodnije ukoliko za dramska pozorišta zapremina po gledaocu iznosi 4 do 5 m³, a u koncertnim salama 7 do 9 m³ po slušaocu.



Slika 2.1 - Optimalno vreme reverberacije za dramska pozorišta, na oko 1000 Hz, po Harisu i Knudsenu

Vreme reverberacije zavisi od frekvencije. Podaci dati u tabeli 2.1. odnose se na frekvencije od oko 1000 Hz, dok je za niže i više frekvencije poželjno da frekvencijska zavisnost bude prema toku krive prikazane na slici 2.2. Naime, na nižim frekvencijama je dobro da vreme reverberacije bude nešto veće, naročito kada je muzika u pitanju, jer to daje određenu punoću zvuku. Na višim frekvencijama će doći do smanjenja vremena reverberacije zato što je slabljenje zvuka na tim frekvencijama povećano. U praksi se i ne teži ostvarivanju ravne frekvencijske karakteristike, jer to iz mnogih razloga ne bi delovalo ni prirodno, pa se zato preporučuje promena vremena reverberacije na način prikazan na slici 2.2. Šrafirani delovi su vrednosti koje se smatraju tolerantnim.

Za veoma *velike prostorije*, kao što su sportske hale i slični objekti, postoji dopunjeni Sabinov obrazac koji uzima u obzir i slabljenje zvučnih talasa usled prostiranja kroz vazduh. U velikim prostorijama put koji zvučni talas mora da pređe između dve refleksije može da bude reda 100 m, tako da slabljenje u vazduhu nije zanemarljivo.



Slika 2.2 - Frekvencijska zavisnost vremena reverberacije koja se u praksi smatra poželjnom. Sa T_{opt} je obeleženo optimalno vreme reverberacije na oko 1000 Hz, a sa T vreme reverberacije prostorije.

Vreme reverberacije se za velike prostorije (preko 50.000 m³) određuje pomoću obrasca:

$$T_r = \frac{0,16 \cdot V}{A + 4 \cdot m \cdot V} \quad (2.9)$$

gde je m koeficijent slabljenja, o kome je bilo reči u tački 1.7.

Veštačko vreme reverberacije se koristi pri obradi već načinjenog snimka. Pošto se, kao što je već napomenuto, muzika snima u studijima koji imaju nešto manje vreme reverberacije, to je potrebno povećati vreme reverberacije i time ostvariti punoću zvuka.

Postoje analogni i digitalni reverberatori u čiji se rad nećemo upuštati, samo ćemo reći da je dodavanje reverberacije veštačkim putem uobičajeni postupak ukoliko je potrebno izvršiti korekciju već ostvarenog snimka.

2.5 Intenzitet zvuka u prostoriji

U prostoriji se zvučno polje formira na dosta složen način. U svakoj tački dolazi do sabiranja direktnog talasa sa svim reflektovanim talasima. Ukoliko u prostoriji zrači izvor zvuka konstantne snage doći će do stacionarnog stanja i tada je prosečni intenzitet zvuka jednak:

$$J = \frac{4 \cdot P_a}{A}, \quad [J] = \text{W/m}^2 \quad (2.10)$$

Ovaj obrazac važi za sve tačke u prostoriji. Ako se umesto apsorpcije (A) u gornji izraz unese poznata relacija iz Sabinovog obrasca, dobija se:

$$J = \frac{4 \cdot P_a \cdot T}{0,16 \cdot V}$$

ili

$$J = \frac{25 \cdot P_a \cdot T}{V}, [J] = \text{W/m}^2. \quad (2.11)$$

Izraz za intenzitet zvuka u prostoriji u kome figuriraju vreme reverberacije i zapremina je pogodan, jer se sve veličine mogu jednostavno ili proračunati ili izmeriti.

Korisno je navesti i relaciju pomoću koje se može direktno izračunati zvučni pritisak u prostoriji u stacionarnom stanju. Pošto je $J = p^2 / \rho c$, onda je:

$$p = 2 \sqrt{\frac{\rho \cdot c \cdot P_a}{A}}, [p] = \text{Pa}, \quad (2.12)$$

gde su: ρ - gustina vazduha, c - brzina zvuka.

Odnos direktnog i reflektovanog zvuka se u prostoriji menja pri udaljavanju od zvučnog izvora. U zoni blizu izvora zvuka direktan zvuk dominira, dok na mestima više udaljenim od izvora reflektovani zvuk postaje dominantan. Za praksu je interesantno, a i potrebno znati na kom rastojanju od zvučnog izvora u prostoriji direktan i reflektovani zvuk postaju isti. Ovaj podatak igra važnu ulogu pri snimanju zvuka, jer se zavisno od toga koliko iznosi ovo rastojanje ($r_{\text{granično}}$ ili samo r_g) postavljaju i mikrofoni u sali.

Ako izjednačimo izraze za intenzitet direktnog talasa i za intenzitet u stacionarnom stanju dobijamo:

$$r_g = \sqrt{\frac{A}{50}}, [r] = \text{m}. \quad (2.13)$$

Dobijena vrednost je u stvari poluprečnik zamišljenog kruga oko zvučnog izvora u kome dominira direktan zvuk.

2.6 Apsorberi zvuka

Da bi se u prostoriji ostvarili odgovarajući akustički uslovi potrebno je obradi zidova, tavanice i poda posvetiti dužnu pažnju. Unutrašnjom obradom prostorija bave se enterijeristi (arhitekta) koji imaju svoju viziju o tome kako treba da izgleda prostorija, što je u dosta slučajeva u suprotnosti sa objektivnim akustičkim kriterijumima. U praksi se najčešće posle dužih konsultacija između enterijerista i akustičara dođe do kompromisa koji zadovoljava u akustičkom pogledu, bar ono što je osnovno.

Pre svega treba obradom prostorije postići da vreme reverberacije bude odgovarajuće. Namena prostorije određuje optimalno vreme reverberacije, o čemu je već bilo reči. Kada se usvoji optimalno vreme reverberacije sledi dosta osetljiv postupak izbora materijala i konstrukcija

čijim će postavljanjem na granične površine biti postignut željeni efekat. Cilj je da se pored vremena reverberacije u prostoriji formira homogeno i difuzno zvučno polje, što obezbeđuje dobre uslove slušanja.

Kada je u pitanju akustička obrada graničnih površina u prostoriji vodi se računa da apsorpcija bude takva da tok krive vremena reverberacije bude, bar približno, jednak onom koji je prikazan na slici 2.2. Pri izboru akustičke obrade, stoje na raspolaganju materijali koji pojačano upijaju pojedine opsege frekvencija, koje nazivamo apsorberima zvuka. Ne postoji materijal ili konstrukcija pomoću koje se može uspešno prigušiti zvuk u celom opsegu frekvencija.

Apsorberi se dele na one koji pojačano upijaju niske frekvencije (od najnižih do 300-400 Hz), srednje frekvencije (400 Hz do 4000-5000 Hz) i visoke frekvencije (preko 5000 Hz). Tako imamo:

- mehaničke rezonatore, za niske frekvencije,
- akustičke rezonatore, za srednje frekvencije, i
- porozne materijale, za visoke frekvencije.

Koeficijenti apsorpcije za navedena područja frekvencija treba da budu veći od 0,7. Što su vrednosti bliže jedinici, to su i apsorberi bolji. U daljem izlaganju biće sprovedena gruba analiza materijala i konstrukcija pogodnih za obradu prostorija. U praksi se pokazalo da prikazana rešenja ispunjavaju sve potrebne uslove za efikasnu obradu.

2.6.1 Mehanički rezonatori

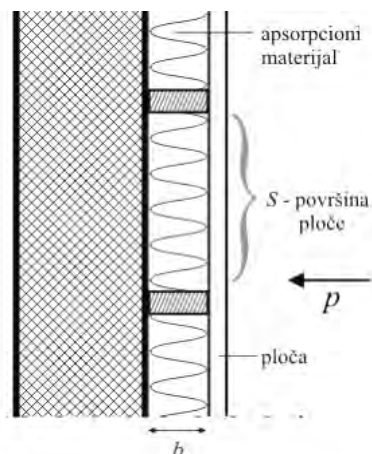
Za pojačanu apsorpciju niskih frekvencija koriste se mehanički rezonatori. Sam naziv upućuje na to da se radi o čvrstim, ali i elastičnim punim pločama koje mogu biti od različitog materijala. Najčešće je to drvo, ali se izrađuju i od metala, stakla, plastike, zavisno od toga koja je namena prostorije. Poznata su rešenja, na primer, u aerodromskim halama, sa metalnim i staklenim mehaničkim rezonatorima. U pozorištima i koncertnim salama to su, po pravilu, drvene ploče dosta tanke da bi bile i elastične.

Mehanički rezonator je prikazan na slici 2.3. To je kruta ploča koja kao celina vibrira i iza koje se nalazi vazдушna komora. Ploča predstavlja masu a komora elastičnost. Frekvencija rezonanse mehaničkog rezonatora može se računati na sledeći način:

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{m_s \cdot b}}, [\text{Hz}], \quad (2.14)$$

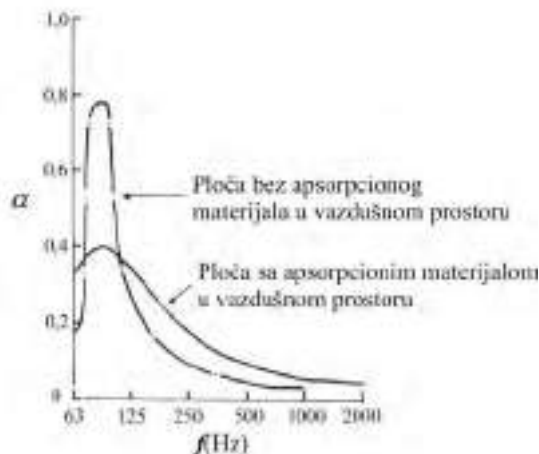
pri čemu je m_s površinska masa ploče u kg/m^2 , a b (cm) rastojanje ploče od krute pregrade (zida). Za ove svrhe površinska masa se kreće od 10 kg/m^2 – 20 kg/m^2 , a rastojanje b od 5 cm do 20 cm.

Poznato je iz iskustva da slobodno obešena ploča odzvanja kad se udari, što znači da ona ima i svoje sopstvene frekvencije rezonanse. Od svih frekvencija rezonanse najjače je izražena najniža ali ona obično leži znatno niže od frekvencije rezonatora f_0 .



Slika 2.3 – Izgled mehaničkog rezonatora

Na slici 2.3 ucrtan je i apsorpcioni materijal, koji se postavlja sa unutrašnje strane ploče. Ovaj materijal (mineralna vuna, na primer) proširuje opseg frekvencija u kome ovaj rezonator pojačano apsorbuje zvuk.



Slika 2.4 – Vrednosti koeficijenta apsorpcije mehaničkog rezonatora za dva slučaja:
1) sa apsorpcionim materijalom, 2) samo sa vazduhom

Na slici 2.4 prikazane su krive koeficijenata apsorpcije u zavisnosti od frekvencije. Navedena su dva slučaja: 1) kada je iza ploče postavljen apsorpcioni materijal i 2) kada je između čvrste pregrade i ploče samo vazduh. Evidentno je proširenje frekventijskog opsega kao i povećanje

koeficijenta apsorpcije, u određenom delu frekventijskog opsega, pri ubacivanju apsorpcionog materijala.

Ponašanje slično mehaničkom rezonatoru ima i folija postavljena ispred poroznog apsorpcionog materijala kao optička maska.

Mehanički rezonatori su efikasni u relativno uskom opsegu frekvencija oko svoje frekvencije rezonanse. Postoji mogućnost postavljanja nekoliko tipova mehaničkih rezonatora, pri obradi sale, variranjem m_s i b što može uspešno da proširi frekventijski opseg u kome su ovi različiti rezonatori efikasni.

2.6.2 Akustički rezonatori

Da bi srednje frekvencije bile u većoj meri apsorbirane koriste se akustički rezonatori za obradu prostorija. To su takođe ploče, kao i kod mehaničkih rezonatora, samo što su sada perforirane (izbušene). Perforacija se ostvaruje većim ili manjim brojem kružnih ili četvrtastih otvora (rupa). Procenat perforacije ovih ploča (p_p) predstavlja odnos ukupne površine otvora i površine cele ploče, a kreće se od 5 do 20%. Frekvencija rezonancije se kod ovakvih rezonatora izračunava pomoću sledećeg obrasca:

$$f \cong 550 \sqrt{\frac{p_p}{b \cdot l}}, \quad [f_0] = \text{Hz}, \quad (2.15)$$

pri čemu je:

p_p - procenat perforacije (%),

b - rastojanje ploče od zida izraženo u cm,

l - debljina ploče izražena u cm.

Frekventijski opseg je i kod ovih rezonatora dosta uzak. U praksi se pribegava postavljanju nekoliko tipova perforiranih apsorbera sa različitim procentom perforacije, ili izmenjenim dimenzijama ploča, što može da rezultira pojačanom apsorpcijom u punom opsegu srednjih frekvencija.

Akustički rezonatori se mnogo koriste, naročito u prostorijama u kojima su zvučni izvori govornici, jer su dominantne govorne frekvencije u toj oblasti. Govorna studija, konferencijske sale, slušaonice, pozorišta, pa i bioskopi po pravilu se obrađuju ovim rezonatorima.

Dodajmo još da za standardne akustičke rezonatore, kod kojih je, na primer, procenat perforacije 15%, debljina ploče $l = 4$ mm do 5 mm, a rastojanje ploče od zida $b = 10$ cm, rezonantna frekvencija iznosi oko 1000 Hz. Smanjivanjem procenta perforacije i povećavanjem b i l moguće je konstruisati akustičke rezonatore čija se frekvencija rezonancije kreće od oko 500 Hz do 800 Hz, što je povoljno.

2.6.3 Porozni materijali

Pri akustičkoj obradi prostorija za pojačanu apsorpciju visokih frekvencija, kada za to postoji potreba, koriste se porozni materijali. U porozne materijale spadaju svi vlaknasti materijali za koje je karakteristično da između vlakana postoji vazduh ili neko vezivno sredstvo. To su, na primer, mineralna vuna, sve tkanine, vata i slično. Vlakna mogu biti prirodna ili veštačka, a poroznost ovih materijala se meri odnosom zapremine vazduha i ukupne zapremine. Laka mineralna vuna ima poroznost oko 98%, laki lesoniti oko 80%, a opeka svega nekoliko procenata.

Do vrlo izražene apsorpcije na visokim frekvencijama dolazi zbog toga što zvučni talasi prodiru u vazdušni prostor između vlakana i pri tome se njihova energija usled trenja pretvara u toplotu. Ovaj proces postaje posebno izražen kada je porozni materijal odvojen od zida i kada se javi povratni talas kroz materijal, pošto se direktni talas reflektovao o čvrstu prepreku. Apsorpcija na visokim frekvencijama je izražena zato što je njihova talasna dužina relativno mala i što ovi talasi lakše prolaze kroz vazduh između vlakana.

Da bi porozni materijali bili što bolji apsorberi visokih frekvencija, potrebno je da njihova debljina bude odgovarajuća. Tanki slojevi poroznih materijala (nekoliko milimetara) nisu efikasni. U praksi mineralna vuna, koja se veoma mnogo koristi, treba da bude u sloju od 3 do 6 cm, jer će tada apsorpciona moć biti izražena.

Kao neka vrsta rezimea svega što je rečeno o apsorberima zvuka može se zaključiti da prilikom obrade prostorija postoji mogućnost podešavanja akustičkih uslova u prostorijama različite namene. Izborom apsorbera i određivanjem površina na koje će oni biti naneti, vreme reverberacije može da se svede na optimalnu vrednost. Teorijski, raspored apsorpcionih materijala nije bitan, ali se u praksi ipak vodi računa o tome da ne budu apsorberi za pojedina frekvencijska područja (za niske, srednje i visoke frekvencije) koncentrisani samo na jednom mestu. Pogodno je rasporediti materijale po celoj prostoriji, jer se na taj način uspešno ostvaruje i homogenost zvučnog polja i frekvencijska zavisnost.

2.7 Izmerene vrednosti apsorpcije materijala

Izbor materijala za akustičku obradu prostorija vrši se na osnovu njihovih apsorpcionih osobina. Osnovno je da se znaju koeficijenti apsorpcije pojedinih materijala, kao i apsorpcione karakteristike stolica, nameštaja i svega drugog što se unosi u prostoriju (zavese, paravani i sl.).

U tabeli 2.2 dati su podaci za koeficijente apsorpcije nekih materijala i konstrukcija, kao i za slušaoce i stolice. Svi podaci u tabeli dobijeni su merenjem i imaju široku praktičnu primenu. Vrednosti se odnose na šest standardnih frekvencija. Podaci za znatno veći broj materijala i konstrukcija

mogu se naći u priručnicima (građevinskim, arhitektonskim) koji služe za proračune.

Tabela 2.2. Koeficijenti apsorpcije zvuka

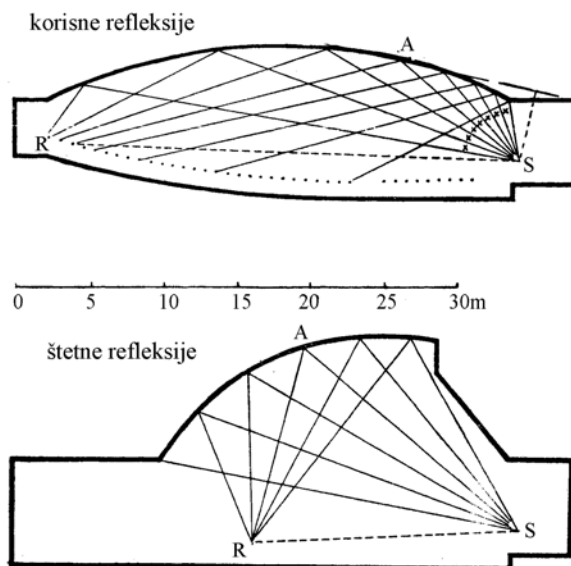
R. br.	Vrsta materijala	Koeficijenti apsorpcije					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
1.	Opeka, prirodna ili bojena	0,05	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05
2.	Beton (gladak)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
3.	Malterisan zid od opeke ili betona	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
4.	Drvo 16 mm, sa ispunom od poroznog materijala, na 5 cm od zida	0,35	0,20	0,10	0,05	0,05	0,05
5.	Parquet na drvenom patosu	0,2	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1
6.	Zavesa nabrane (prosek)	0,1	0,15	0,3	0,4	0,5	0,6
7.	Perforirane gipsane ploče	0,3	0,5	0,65	0,65	0,5	0,3
8.	Meki lesomit zalepljen na zid	0,15	0,25	0,4	0,5	0,5	0,4
9.	Isto, ali na drvenoj podkonstrukciji	0,3	0,5	0,65	0,7	0,7	0,6
10.	Prozorsko staklo	0,1	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
11.	Tepih srednje debljine	0,05	0,08	0,2	0,3	0,35	0,4
12.	Površina koju zauzimaju kožne fotelje	0,45	0,55	0,6	0,6	0,6	0,5
13.	Površina koju zauzimaju tekstilne fotelje	0,5	0,65	0,8	0,9	0,8	0,7
14.	Površina koju zauzima publika	0,6	0,75	0,9	0,95	0,95	0,85

2.8 Geometrijski oblik prostorije

Da bi se u prostorijama različite namene ostvarili odgovarajući akustički uslovi vrlo je važan njihov oblik. U osnovi svakog akustičkog rešenja je geometrija prostorije, posebno kada se radi o pozorištima, operama ili koncertnim salama. Studija, u kojima se zvuk snima, obrađuju se na specifičan način, tako da kod njih geometrijski oblik nije toliko bitan.

U vreme kada su se sale gradile empirijski, bez mnogo proračuna i sa vrlo skromnim znanjima iz teorije prostiranja zvučnih talasa, došlo se do jednog rešenja koje se i danas smatra najboljim, a to je da operske sale imaju potkovičasti oblik. Najveće i najpoznatije operske sale u svetu, pa i veliki broj koncertnih sala ima oblik potkovice. Kasnije, kada su nastali novi materijali sa poboljšanim akustičkim karakteristikama, i kada su konstruktivna rešenja bila raznovrsnija, građene su vrlo uspešne sale drugačijih oblika. Sredstva koja danas stoje na raspolaganju pružaju mogućnost uspešnih

korekcija čak i neodgovarajućih geometrijskih oblika prostorija, što znači da se i u njima mogu postići veoma dobri uslovi izvođenja i slušanja.



Slika 2.5 – Uzdužni preseki dve dvorane. Na gornjoj slici je dat primer tavanice sa korisnim refleksijama, a na donjoj je prikazana pogrešno oblikovana tavanica koja fokusira zvučne talase

Sve granične površine u prostorijama su važne za ostvarivanje povoljnih akustičkih uslova. Direktni talasi prve refleksije i neke refleksije višeg reda utiču na formiranje zvučnog polja. Praćenjem pojedinih talasa i podešavanjem njihovog intenziteta postavljanjem odgovarajućih apsorpcionih materijala na refleksione površine, može se postići da u svim delovima sale uslovi slušanja budu zadovoljavajući.

Glavnu ulogu u stvaranju korisnih refleksija zvuka igra tavanica. Zato se njoj najviše i poklanja pažnja kada se razmatra problem korisnog zvuka. Od njenog oblika i materijala koji se na nju postavlja zavisi i doprinos korisnih refleksija.

U koristan zvuk spadaju sve refleksije koje ne kasne za direktnim zvukom za više od 50 ms, kada je u pitanju govor, odnosno za više od 80 ms, kada se radi o muzici. Ovi kriterijumi se zasnivaju na osobinama čovečijeg čula sluha, pošto naše uvo integriše akustičku energiju koja se pojavi u navedenim intervalima vremena.

Na slici 2.5 data su dva slučaja oblikovanja tavanice: u prvom slučaju je dobro odabran oblik tako da će i refleksije biti korisne, dok u drugom slučaju oblik tavanice nije dobar, pošto će doći do fokusiranja reflektovanih talasa samo na neka sedišta ili neke zone. Pored tavanice i bočni zidovi treba

da doprinesu pravilnom formiranju zvučnog polja svojim apsorpcionim i difuznim površinama. Nije zanemarljiva ni uloga poda na bini, kao ni binskog otvora.

Gledalište svojom izraženom apsorpcijom značajno utiče na akustičke uslove u sali. Površina na kojoj se nalazi publika je, po pravilu, najveći apsorber zvuka. Raspored sedišta kao i njihov broj treba podesiti tako da ne dođe do stvaranja nehomogenog zvučnog polja. Ukoliko postoji balkon, njegovu akustiku treba posebno analizirati, jer su mesta na balkonu znatno bliže tavanici od onih u parteru.

U praksi, naročito u velikim salama, postavljaju se akustički reflektori iznad podijuma. Ovi reflektori se najčešće prave od drvenih ili gipsanih zakrivljenih ploča. Njihova površinska masa mora biti najmanje 30 kg/m^2 , što će obezbediti da oni ne počnu da vibriraju, naročito na niskim frekvencijama i time postanu novi izvori zvuka. Uloga ovakvih reflektora je dvostruka:

- oni služe za usmeravanje zvučnih talasa u bliže i dalje delove sale, što doprinosi ujednačavanju nivoa zvučnog polja u sali i
- od njih se jedan deo zvuka reflektuje natrag, ka izvođačima, kako bi ga i oni bolje čuli.

Na slici 2.6 dat je kao primer uzdužni presek jedne od najpoznatijih koncertnih sala u svetu, koja ima relativno dobru akustiku. To je Rojal Festival Hol (Royal Festival Hall) u Londonu [1], čija zapremina iznosi preko 20.000 m^3 , dok je vreme reverberacije pune sale oko 1,6 s. Na crtežu se jasno vide tri viseća reflektora zvuka iznad podijuma.

O akustici sala bi se moglo još mnogo govoriti. Sve što je ovde rečeno predstavlja samo neke osnovne elemente koji utiču na dobre uslove slušanja. Nove sale, kojih ima danas u svetu veoma mnogo, neretko su snabdevene i složenim sistemima za ozvučenje, koji mogu uspešno da koriguju prirodne akustičke uslove i da omoguće izvođenje najrazličitijih programa u istoj sali.



Slika 2.6 – Uzdužni presek sale Rojal Festival Hala [1]

2.9 Merenje vremena reverberacije

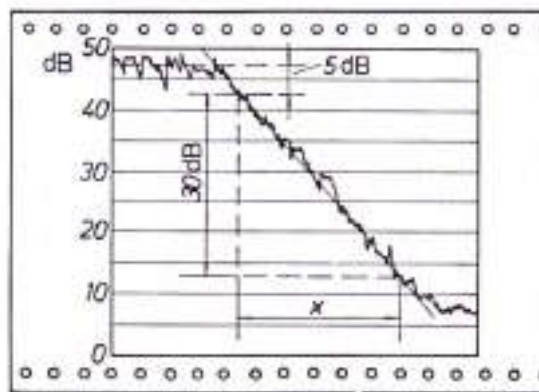
U praksi se smatra da vreme reverberacije ima osnovnu ulogu pri određivanju akustičkih karakteristika svake prostorije. Pored toga indirektno se pomoću vremena reverberacije nalaze i neke druge veličine, kao što je, na primer, koeficijent apsorpcije.

Još krajem devetnaestog veka, Amerikanac Sabin (W. Sabine) je našao vezu između vremena reverberacije, zapremine prostorije i apsorpcionih osobina materijala upotrebljenih za unutrašnju obradu prostorija.

Vremenom je način merenja vremena reverberacije usavršavan. Prvobitna, dosta složena aparatura se sastojala od izvora zvuka (generator, zvučnik), mikrofona sa pojačavačem i registratora. Koristio se logaritamski pisač, zbog toga što nivo zvuka, u decibelima, u prostoriji opada linearno sa vremenom.

Kao izvor zvuka (pobuda), vrlo često se koristi zvučni impuls (pucanj ili neki drugi prasak širokog spektra), kao i generatori užeg ili šireg frekventijskog opsega (beli šum). Uređaji za merenje vremena reverberacije su do te mere danas usavršeni da se rezultat dobija trenutno i sa dovoljno tačnosti.

Prema standardima, vreme reverberacije se meri na šest frekvencija: 125, 250, 500, 1000, 2000 i 4000 Hz. Prilikom projektovanja sala vreme reverberacije se proračunava, što će biti obrađeno u daljem tekstu kroz posebno za to odabran primer.



Slika 2.7 – Kriva opadanja nivoa zvuka u prostoriji na osnovu koje se usrednjavanjem, određuje vreme reverberacije

Kao rezultat pojedinačnog merenja vremena reverberacije na navedenim frekvencijama, dobija se kriva koja pokazuje kako i za koje vreme opadne nivo zvuka za 60 dB, po prestanku rada zvučnog izvora. Na slici 2.7

prikazan je karakterističan tok pada nivoa zvuka u prostoriji. Kriva je registrovana pomoću logaritamskog pisača.

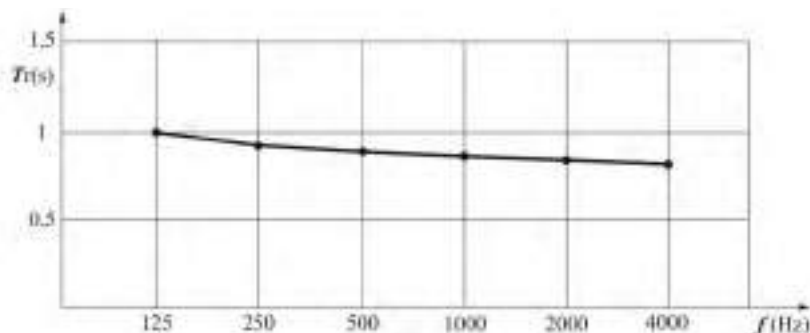
Pošto je neracionalno, a često i nemoguće (zbog nivoa šuma u sali i drugih uzroka) pratiti opadanje zvuka za svih 60 dB (prema definiciji vremena reverberacije), to se registruje pad nivoa od 30 dB i vrednost pomnoži sa dva. U nekim slučajevima se prati pad i za samo 20 dB. Pored toga prvih 5 dB opadanja nivoa se ne koristi, jer vrlo često tok krive, u tom delu, nije karakterističan.

Teorijski, vreme reverberacije ne zavisi od položaja izvora zvuka i od mesta na kojem se nalazi mikrofoni u prostoriji. Međutim, u praksi postoje izvesne razlike u rezultatima, do kojih dolazi iz raznih razloga. Zato se, po pravilu, merenje ponavlja, pri čemu se menjaju položaji izvora i mikrofona, pa se iz više merenja nalazi srednja vrednost, što se pokazalo najopravdanije.

Vreme reverberacije se meri u prostorijama koje su novoizgrađene ili obnovljene, a koji put i tokom akustičke obrade prostorija, kako bi se na vreme uočile eventualne nepravilnosti. Pošto je aparatura za merenje usavršena i lako prenosiva, to je i merenje postalo rutinsko i jednostavno.

2.10 Proračun vremena reverberacije

Prilikom projektovanja jedne sale, čija je namena definisana, potrebno je, pre svega, odrediti geometrijski oblik prostorije, a zatim što preciznije proračunati akustičke karakteristike. Kao osnovna akustička veličina, koja je specifična za svaku salu, smatra se vreme reverberacije. U delu 2.2, tabela 2.1, navedene su numeričke vrednosti vremena reverberacije za različite prostorije. Ono se kreće od 0,2 s za govorni studio do 4,0 s za crkve.



Slika 2.8 – Izračunate vrednosti vremena reverberacije u funkciji frekvencije

Pored vremena reverberacije proračunavaju se i drugi akustički parametri, prema međunarodnom standard ISO 3382, kao što su: rano vreme reverberacije, jasnost, stepen razumljivosti i drugo.

Vreme reverberacije se proračunava na standardan način, polazeći od Sabinovog obrasca i to za šest frekvencija (125, 250, 500, 1000, 2000 i 4000 Hz), kako bi se dobila kriva koja pokazuje promenu vremena reverberacije u zavisnosti od frekvencije.

Kada se proračunava vreme reverberacije moraju se odrediti materijali koji će poslužiti za obradu tavanice, zidova i poda u sali, kao i broj i vrsta stolica.

Tabela 2.3 – Koeficijenti apsorpcije materijala

R. br.	Materijal	Koeficijenti apsorpcije					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
1.	Parket na peščanoj podlozi	0,2	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1
2.	Tavanica (malter, gips) (na metalnoj mreži)	0,25	0,2	0,1	0,05	0,05	0,05
3.	Goli zidovi	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
4.	Akustičke ploče na zidovima (fazer) Zadnji zid i deo bočnih zidova	0,36	0,30	0,28	0,28	0,30	0,37
5.	Fotelje – bogato presvučene tekstilom	0,25	0,30	0,35	0,45	0,50	0,50
6.	Slušaoci u foteljama	0,20	0,40	0,55	0,60	0,60	0,60
7.	Vrata	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Da bi se na očigledan način pokazao proračun vremena reverberacije, biće na jednom konkretnom primeru sproveden celokupni postupak.

Odabrana je sala za konferencije, koja spada u relativno jednostavne prostorije u akustičkom pogledu. Način proračuna je potpun i može se, uz odgovarajuća proširenja, primeniti u svim slučajevima.

Sala za konferencije zapremine $V = 1020 \text{ m}^3$ treba da ima, prema usvojenim preporukama, vreme reverberacije na srednjim frekvencijama oko 0,8 s. Ova vrednost se smatra optimalnom, jer će razumljivost govora biti zadovoljavajuća, što je u konkretnom slučaju veoma važno.

Tok proračuna vremena reverberacije zamišljene sale je sledeći:

Osnovni podaci o sali su:

- dimenzije 17 x 10 x 6 m
- zapremina 1020 m^3
- površina bočnih zidova 102 m^2
- površina čeonih zidova 60 m^2
- površina tavanice i poda 170 m^2

U tabeli 2.3 dati su podaci o koeficijentima apsorpcije materijala korišćenih za obradu sale.

Podaci o koeficijentima apsorpcije će poslužiti za izračunavanje optimalne apsorpcije u sali.

Prema Sabinovom obrascu, koji glasi:

$$T_r = \frac{0,16 \cdot V(m^3)}{A(m^2)},$$

može se proračunati optimalno vreme reverberacije za šest frekvencija.

Vrednosti optimalne apsorpcije će biti dobijene kao proizvod koeficijenata apsorpcije i odgovarajućih površina u sali. U tabeli 2.4 dat je proračun vremena reverberacije.

Tabela 2.4 – Proračun vremena reverberacije

R. br.	Materijal	Površina (m ²)	Koeficijenti apsorpcije					
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
1.	Parket (1/3 poda nije pokrivena stolicama)	57	11,4	8,5	5,7	5,7	5,7	5,7
2.	Tavanica (gips na rabić mreži)	170	38,5	34,0	17,0	8,5	8,5	8,5
3.	Goli zidovi (50% od cele površine)	162	1,6	1,6	1,6	3,2	3,2	3,2
4.	Akustičke ploče (50% od cele površine)	162	51,5	48,0	45,3	45,3	48,0	52,2
5.	Fotelje (prazne)	80 kom.	20	24	28	36	40	40
6.	Sedišta sa slušaocima	160 kom.	32	64	88	96	96	96
7.	Ukupna apsorpcija (m ²)		155	180	184	194	201	205
8.	Vreme reverberacije (s)		1,0	0,95	0,9	0,82	0,8	0,76

Na osnovu proračuna u tabeli 2.4 moguće je prikazati promenu vremena reverberacije u zavisnosti od frekvencije, kako je dato na slici 2.8.

Izračunate vrednosti vremena reverberacije u potpunosti zadovoljavaju postavljene uslove.

2.11 Merenje koeficijenta apsorpcije

Koeficijent apsorpcije najrazličitijih materijala i konstrukcija je jedan od osnovnih parametara u akustici prostorija. Veoma je važno, za određivanje drugih akustičkih karakteristika prostorije, raspolagati što tačnijim vrednostima koeficijenata apsorpcije materijala korišćenih za obradu prostorije.

Prema standardima za ovu oblast, koeficijent apsorpcije se meri u reverberacionoj prostoriji i to na šest frekvencija: 125, 250, 500, 1000, 2000 i 4000 Hz. Ne postoji mogućnost izračunavanja koeficijenta apsorpcije, nego se do konkretnih vrednosti dolazi isključivo merenjem.

Postupak merenja se svodi na određivanje vremena reverberacije u reverberacionoj prostoriji.

Prvo se izmeri, za šest frekvencija, vreme reverberacije prazne prostorije. Ono je prema Sabinovom obrascu:

$$T_0 = \frac{0,16 \cdot V}{A_0}.$$

Pošto se unese ispitivani materijal, ponovo se izmeri vreme reverberacije, koje sada iznosi:

$$T_x = \frac{0,16 \cdot V}{A_0 + A_x}$$

Na osnovu ova dva merenja dobija se da je apsorpcija koju je izazvao uneti materijal:

$$A_x = 0,16 \cdot \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0} \right)$$

Kako je koeficijent apsorpcije α odnos A_x/S_x , gde je S_x površina ispitivanog materijala, to je:

$$\alpha_x = 0,16 \cdot \frac{V}{S_x} \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0} \right)$$

Pri izračunavanju α_x , zanemarena je promena apsorpcione površine same prostorije, po unošenju ispitivanog materijala. Ovo zanemarenje je opravdano, jer je uvek $\alpha_x \gg \alpha_0$.

Postupak merenja α_x je standardizovan, tako da se izmerene vrednosti malo razlikuju u zavisnosti od uslova merenja (dimenzija prostorije, difuznosti prostorije, mesta na koje se postavlja mereni materijal i drugo).

2.12 Akustički spregnute prostorije

U akustičkom pogledu postoje pojedinačne prostorije, kao što su bioskopi, slušaonice, konferencijske sale, studija radija i televizije, ali postoje i prostorije koje su spregnute kroz otvor, kao što su pozorišta, operne sale. Pojave koje prate prostiranje zvučnih talasa u spregnutim prostorijama su nešto složenije od onih koje karakterišu pojedinačne prostorije, pa ih zbog toga treba, bar u osnovnim crtama, posebno analizirati.

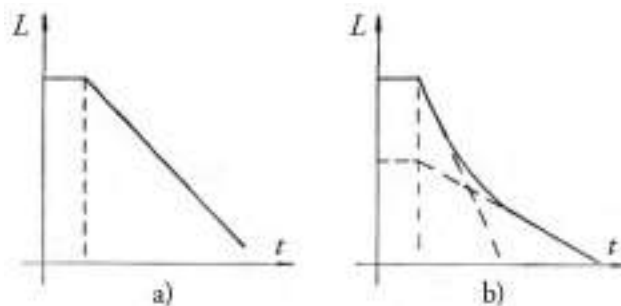
Za sve spregnute prostorije je karakteristično da prostorija, u kojoj se nalazi zvučni izvor, kroz manji ili veći otvor emituje zvuk u drugu, susednu prostoriju, koji može ponovo da se vrati u deo gde se stvara zvuk. Praktično, ovakva sprega uvek postoji između gledališta i bine i gledališta i galerija ili loža u pozorištu kao i između gledališta i podbalkonskog prostora u

koncertnim salama. Binski otvor je površina kroz koju se ostvaruje akustička sprega između gledališta i bine i od njegovih dimenzija, u svakom konkretnom slučaju, zavisi stepen ove sprege. Pored dimenzija otvora, na prolazak zvuka iz jedne prostorije u drugu utiče pre svega zapremina spregnutih prostorija i njihove akustičke, prvenstveno apsorpcione osobine.

Analiza akustički spregnutih prostorija se može izvesti i strogo matematički, u šta ovde nećemo ulaziti. Za praksu je interesantno da od dimenzija otvora i apsorpcije svih zidova prostorije zavisi i sprega. Ako sa S_{12} obeležimo površinu otvora između prostorija (bine i gledališta), a sa A_1 odnosno A_2 apsorpciju prostorija dobija se da:

- a) Ukoliko je A_2 (apsorpcija druge prostorije, one u kojoj se ne nalazi zvučni izvor) manje od S_{12} , obe prostorije će se ponašati kao jedna jedinstvena prostorija, i
- b) Ukoliko je A_2 veće ili znatno veće od S_{12} , prostorije će se ponašati kao spregnute.

Prvi slučaj (pod a) nastupa kada je binski otvor relativno veliki, odnosno kada su zidovi druge prostorije obrađeni tvrdim materijalima (beton ili sl.), dok se drugi slučaj (pod b), javlja u najvećem broju pozorišta i opera, gde je otvor između dve prostorije relativno mali u odnosu na ukupnu apsorpciju druge prostorije. U Beogradu, na primer, Narodno pozorište (opera) kao i sva druga pozorišta koja imaju veliki broj gledalaca, predstavljaju dobar primer spregnutih prostorija.



Slika 2.9 – Opadanje nivoa zvuka u: a) jedinstvenoj prostoriji i
b) spregnutim prostorijama

Kada su prostorije spregnute, nivo zvuka u njima opada na specifičan način. Na slici 2.9 prikazano je opadanje nivoa zvuka u jedinstvenoj prostoriji (a) i u spregnutim prostorijama (b).

Kada se radi o jedinstvenoj prostoriji, nivo zvuka opada ravnomerno sa vremenom. U spregnutim prostorijama dolazi do prelamanja krive koja predstavlja opadanje nivoa, što u stvari pokazuje da se vreme reverberacije produžava.

Ovakav, objektivni način praćenja nivoa zvuka, moguć je zahvaljujući instrumentima koji su za to konstruisani, i to u svakom trenutku i na svakom mestu u sali.

Subjektivno, produženo vreme reverberacije je lako zapaziti i ono može, u određenim slučajevima da naruši željene akustičke uslove.

Vredno je pomenuti i produženo vreme reverberacije kod elektroakustičke sprege. Navedimo kao primer slušanje govornika iz spikerskog studija. Pošto je u stanu, ili u nekoj drugoj prostoriji u kojoj se sluša spiker, vreme reverberacije veće nego u studiju, to će nam se činiti kao da se spiker nalazi u prostoriji u kojoj smo i mi.

2.13 Analiza zvučnog polja u prostorijama

Složen i važan problem u akustici prostorija je što tačnije definisanje zvučnog polja. Pri analizi zvučnog polja mogu se, u osnovi, razlikovati tri karakteristična stanja: način formiranja ili uspostavljanja, stacionarno stanje i stanje po isključenju zvučnog izvora.

U svim slučajevima zapremina i geometrijski oblik prostorije igraju primarnu ulogu. Pored toga način obrade tavanice, zidova i poda, što znači poznavanje akustičkih (apsorpcionih) osobina materijala upotrebljenih za obradu, je od velikog značaja. Važno je još ukazati i na ulogu sedišta, bilo da su prazna ili popunjena slušaocima. Po pravilu, apsorpcija sedišta je veća od apsorpcije svega ostalog u sali, tako da se pri grubim procenama uzima da $2/3$ ukupne apsorpcije u sali otpada na stolice i publiku.

Za vreme uspostavljanja zvučnog polja u prostorijama, dominantnu ulogu ima direktni talas. Postepeno, reflektovani talasi postaju sve brojniji i jači, tako da u najvećem delu sale preovladavaju. Samo u zoni direktnog zvuka, koja je karakteristična za svaku salu, direktni zvuk ostaje uvek dominantan.

Kada se uložena akustička energija izjednači sa apsorbovanom, nastupa stacionarno stanje u kome važe sva pravila statističke teorije. Tada se formira manje ili više izraženo difuzno polje, što znači da su svi pravci prostiranja podjednako zastupljeni. Pošto se u stacionarnom stanju sabiraju intenziteti zvuka iz svih pravaca, postoji verovatnoća da će u svim tačkama u prostoriji biti i intenzitet zvuka podjednak, što je osobina homogenog polja. Difuznost i homogenost su u praksi osobine svakog stacionarnog polja, u kome važi statistička teorija.

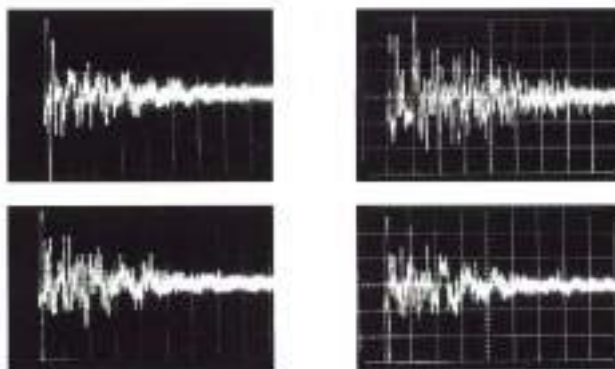
Po prestanku rada zvučnog izvora, dolazi do postepenog slabljenja akustičke energije. Kojom brzinom akustička energija opada zavisi od apsorpcionih osobina sale. Ovaj proces slabljenja se odvija sve dok zidovi i ostali objekti u sali ne apsorbuju svu akustičku energiju, a energija opada po eksponencijalnom zakonu.

Pojave koje prate promene zvučnog polja u prostorijama mogu se efikasno pratiti, o čemu će, u najkraćim crtama, biti reči u daljem tekstu.

Zvučno polje zavisi, u znatnoj meri, od zapremine prostorije. Pored toga, pojava stojećih talasa utiče na formiranje zvučnog polja. Tako će u malim prostorijama i na niskim frekvencijama biti pobuđen vrlo mali broj stojećih talasa, što će se odraziti na način opadanja zvuka. Može doći do odstupanja od eksponencijalnog zakona zbog toga što pojedinačne frekvencije različitom brzinom slabe, po prestanku rada zvučnog izvora.

U većim prostorijama, odnosno na višim frekvencijama, do nepravilnosti, pri slabljenju zvuka u prostoriji, neće doći. U tom slučaju se radi o zbiru velikog broja frekvencija različite jačine, što će dovesti do normalnog eksponencijalnog pada intenziteta zvuka.

Prema talasnoj teoriji, usled specifičnosti koje se javljaju u prostorijama različite veličine, dolazi do pojava koje se ne mogu objasniti statističkom teorijom, s tim što subjektivno neke od ovih pojava imaju dosta vidnu ulogu. Zavisnost od stojećih talasa, visine frekvencije i načina superpozicije zvuka širokog spektra (kao što su govor i muzika), dovodi do specifičnih pojava u zvučnom polju u prostorijama.



Slika 2.10 – Nekoliko primera ehograma za različite položaje izvora zvuka i mikrofona u sali

Jedan od načina da se objasne nepravilnosti u zvučnom polju je praćenje prvih refleksija, metodom impulsnog odziva. Postupak se sastoji u tome da se prostorija pobudi kratkim impulsom i da se prate promene zvučnog polja. Na taj način se dobijaju tzv. ehogrami, koji pokazuju kakva je jačina i koji je redosled prvih refleksija. Na slici 2.10 prikazani su ehogrami na kojima se jasno vide prve i ostale refleksije u sali. Na ordinatama je zvučni pritisak, a na apscisama vreme.

Na osnovu analize impulsnog odziva, pomoću ehograma, moguće je pratiti prve refleksije. Ukoliko se pokaže da prve refleksije nastupaju posle

više od 50 ms za govor, odnosno za više od 80 ms za muziku (koncertne sale), potrebno je preduzeti odgovarajuće mere, kako bi se nivo ovih refleksija smanjio i time izbegli neželjeni efekti. U principu, sve jače refleksije treba da su u navedenim vremenskim granicama, da bi se integrisale sa osnovnim signalom. U tom slučaju ove refleksije se smatraju korisnim.

Navedimo još i to da se proverava dolaska ranih i ostalih refleksija zvuka proverava na modelima. Prave se fizički modeli sala 10 puta manjih dimenzija od realnih, pa se ispitivanje vrši pomoću signala koji ima 10 puta višu frekvenciju, da bi talasna dužina bila usklađena sa dimenzijama sale na modelu. Prilikom projektovanja velikih i skupih sala, postupak pomoću modela je uobičajen i dosta korišćen. I kod nas u Beogradu su, u nekoliko slučajeva, pri projektovanju sala i proverili njihove akustike (Narodno pozorište, Nova opera u Moskvi) korišćeni fizički modeli.

Najnoviji postupci analize i kontrole zvučnog polja u salama su zasnovani na simulaciji sala i zvučnih pojava u njima pomoću računara. Postoje veoma razvijeni softveri za ovakve provere i ispitivanja.

2.14 Pitanja za proveru znanja.

1. Šta nazivamo difuznim zvučnim poljem?
2. Kako se definiše apsorpcija prostorije? Koje su njene dimenzije?
3. Šta je vreme reverberacije? Od čega ono zavisi?
4. Kako glasi Sabinov obrazac? Koliko iznosi optimalno vreme reverberacije, za prostorije različite namene, na oko 1000 Hz?
5. Kako se formira zvučno polje u prostoriji? Na koji način se izračunava intenzitet zvuka u prostoriji?
6. Šta je poluprečnik direktnog zvuka? Kako se ova veličina može izračunati?
7. Šta su mehanički rezonatori? Kolika je njihova frekvencija rezonancije?
8. Skicirati izgled akustičkih rezonatora i objasniti kako se oni u praksi konstruišu? Kolika je njihova frekvencija rezonancije?
9. Šta su porozni materijali? Koji materijali se svrstavaju u porozne?
10. Koliko geometrijski oblik prostorije utiče na akustičke uslove u njoj? Šta su korisne refleksije zvuka?

2.15 Literatura

- [1] Parkin-Hamfriz, *Akustika, buka i zgrade*, Neimar, Građevinska knjiga, Beograd, 1969 (prevod D.D. Kalić).
- [2] T. Jelaković, *Zvuk, sluh, arhitektonska akustika*, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- [3] G. Ballou, *Handbook for Sound Engineers*, Howard W. Sams & Co., Indianapolis, 1988.
- [4] H. Š. Kurtović, *Osnovi tehničke akustike*, Naučna knjiga, Beograd, 1990.

- [5] L.I. Makrinenko, *Acoustics of Auditoriums in Public Buildings*, Acoustical society of America, 1994. (prevod na engleski).
- [6] W.J. Cavanaugh, J.A. Wilkes, *Architectural Acoustics*, John Wiley and Sons. Inc., New York, 1999.
- [7] M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, Taylorand Francis, 2000.
- [8] M. Mijić, *Akustika u arhitekturi*, Nauka, Beograd, 2001.
- [9] F. A. Everest, *Master Handbook of Acoustics*, McGraw-Hill, 2001.
- [10] H. Kurtović, *Akustika za arhitekte*, Akademska misao, Beograd, 2002.
- [11] M. Long, *Architectural Acoustics*, Elsevier, 2006.
- [12] M.D. Egan, *Architectural Acoustics*, J. Ross Publishing, 2007.
- [13] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, Spon Press, 2009.

Fiziološka i psihološka akustika sa elementima akustičke fonetike

3.1 Uvod

Sve što je do sada izneseno u prve dve glave ove knjige spada u oblast objektivnog proučavanja pojava koje prate nastajanje i prostiranje zvučnih talasa. Kvantifikovanje fizičkih veličina u zvučnom polju ostvaruje se na objektivni način pomoću različitih mernih uređaja, sastavljenih od mikrofona i pripadajućih elektronskih sklopova. U svakom trenutku se može ustanoviti vrednost intenziteta zvuka, zvučnog pritiska, ili neke druge fizičke veličine. Objektivna merenja i objektivno praćenje zvučnih pojava je neophodno da bismo znali u kakvim uslovima se nalazi čovek kada je u domašaju delovanja različitih zvučnih izvora.

Pri tome treba imati u vidu, da je čovek uključen u zvučne pojave u svom okruženju na dva načina: kao prijemnik zvuka i kao generator zvuka. Poznavanje mehanizama prijema zvuka se u najvećoj meri odnosi na rad čula sluha i njegove karakteristike, dok je stvaranje zvuka (govor, pevanje) druga bitna akustička osobina čoveka, čije poznavanje je povezano sa načinom rada i osobinama čovekovog organa za govor ili govornog mehanizma.

U ovoj glavi ćemo se upoznati sa osnovnim aspektima vezanim za čovekove mehanizme prijema i generisanja zvuka, koji su osnova govorne komunikacije. Veliki broj naučnika se slaže da se čovek uzdigao iznad ostalih životinja zahvaljujući pre svega dvema svojim glavnim sposobnostima: komunikaciji sa okolinom preko sluha i govora (što je omogućilo prenošenje ideja drugim licima), i direktnim povezivanjem misli sa sluhom i govorom (razvojem pojmova i apstraktnog mišljenja ustaljenim govornim elementima) [4].

Prijem i generisanje zvuka kod čoveka proučava se u okviru mnogih naučnih disciplina od kojih su za nas ovde od značaja fiziološka i psihološka akustika i akustička fonetika.

U fiziološkoj akustici se proučavaju procesi nastajanja i prostiranja zvuka vezani za anatomiju organa sluha i govora.

Psihoakustika je naučna disciplina u okviru koje se proučavaju reakcije slušnog mehanizma na različite akustičke pobude ili nadražaje (stimuluse). Drugim rečima, psihoakustika se bavi predstavom zvučnog doživljaja u čovekovoj svesti ili zvučnom slikom. Akustički nadražaji su zvuci različitih izvora koji dospevaju do čoveka i koji se u psihoakustici nazivaju *zvučni događaji*. Proces njihovog subjektivnog doživljavanja naziva se *percepcijom* ili *auditornim događajem*. Veze između zvučnih i auditornih događaja, koje se proučavaju psihoakustičkim metodama su veoma složene i zavise od mnogih faktora.

Akustička fonetika je disciplina koja proučava akustičke osobine elemenata govora (glasova) i način na koji uvo reaguje na njih.

Danas je u velikoj meri poznato na koji način čovek prima i stvara zvuk. Ipak, postoje još uvek neki procesi u sastavu ova dva mehanizma koji nisu do kraja objašnjeni, pre svega zbog svoje složenosti. Primena savremenih metoda i saznanja u različitim oblastima nauke, vezanim za rad čula sluha i govornog mehanizma, svakim danom dovodi do novih saznanja.

3.2 Čulo sluha

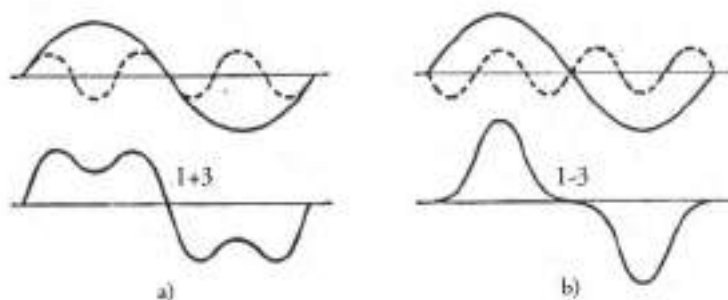
Primarni zadaci čula sluha su prijem informacija bitnih za opstanak u životnoj sredini i komunikacija sa okolinom. Nakon toga, po važnosti dolazi obrada drugih zvučnih informacija (korisne, ugodne, nekorisne, neugodne...). Čovek sluhom dobija preko 80% svih komunikacionih informacija.

Čulo sluha je deo čovekovog auditornog mehanizma gde još spadaju auditorni nervni sistem i slušne zone u kori velikog mozga [12]. Auditorni mehanizam treba da primi akustički signal, da ga transformiše u neuralni signal i da ga prenese do mozga.

Čulo sluha ili uvo, je izuzetno složen sistem, koji se, sa inženjerskog aspekta, može posmatrati kao vrlo selektivan frekventijski analizator, koji je u stanju da obuhvati opseg od čak 10 oktava (poređenja radi, napomenimo da je oko u stanju da primi opseg frekvencija u opsegu samo jedne oktave). Uvo je veoma precizan indikator glasnoće, visine i boje tona, kao i pravca prispeća zvučnih talasa, tj. lokacije zvučnog izvora. Uvo je izuzetno osetljivo čulo, koje reaguje na promene pritiska koje su 10^{10} puta manje od vrednosti atmosferskog pritiska, sa izuzetno velikim opsegom dinamike: odnos najvišeg i najnižeg akustičkog pritiska koje je čulo sluha u stanju da pretvori u korisnu informaciju je reda veličine $1.000.000 : 1$, tj. oko 120 dB.

Osnovne karakteristike zvuka koje uvo razlikuje su: jačina zvuka, visina tona i boja zvuka, i o njima će nešto kasnije biti više govora. Fazni stav

pojedine komponente zvuka u odnosu na ostale komponente uvo ne može da razlikuje jer je ono u osnovi frekvencijski analizator, koji analizira svaku komponentu pojedinačno[6]. Tako, uvo neće razlikovati dva složena signala prikazana na slici 3.1, ni po jednoj karakteristici, iako su potpuno različitog vremenskog oblika. Kao što se vidi ovi su signali sastavljeni od po dva harmonika (prvog i trećeg) od kojih je trećem harmoniku u slučaju pod b) promenjena faza za 180° .



Slika 3.1. Signali različitog oblika složeni od dva ista harmonika (uvo ne može da ih razlikuje) [6]

Mnogobrojna istraživanja su, naročito u poslednje vreme, usmerena ka iznalaženju korelacije između objektivnih karakteristika zvuka i subjektivnog čovekovog osećaja kod njegovog prijema. Teži se ka tome da osobine čoveka kao prijemnika zvuka budu što više uključene u objektivne karakteristike različitih audio uređaja i sistema, a time, koliko god je to moguće, uspostavljena pomenuta korelacija. U tom smislu su proučavanja čovekovih fizioloških i psiholoških odrednica u procesu prijema zvuka od izuzetne važnosti.

U fiziološkom smislu, čulo sluha se deli na spoljašnje, srednje i unutrašnje uvo. Uprošćen izgled čula sluha dat je, u preseku, na slici 3.2, gde su označeni njegovi osnovni delovi, dok je na slici 3.3 dat njegov šematski prikaz odakle je lakše sagledati osnovne uloge pojedinih njegovih delova.

Spoljašnje uvo se sastoji od ušne školjke i slušnog kanala, a završava se bubnom opnom. Spoljašnje uvo služi skupljanju i sprovođenju zvuka iz spoljne sredine do bubne opne koja se nalazi na kraju slušnog kanala. Ovo je glavni vazdušni put prenosa zvuka. Zvuk se manjim delom prenosi i koštanim putem obilazeći strukture spoljašnjeg i srednjeg uva. Ušna školjka je ulazni deo spoljašnjeg uva.

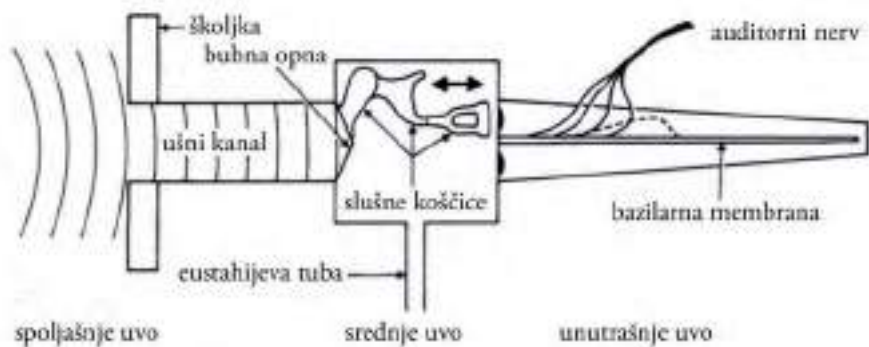
Primarna uloga ušne školjke je da prikuplja akustičku energiju iz okolnog prostora. Ušna školjka i slušni kanal koji se nalazi u njenom nastavku su tako podešeni po svojim dimenzijama da maksimalno doprinose pojačanju zvuka na srednjim i višim frekvencijama. Ovo pojačanje, koje je

reda veličine 15-20 dB, je najviše izraženo u opsegu od 3000 Hz do 5000 Hz, dok se stavljanjem šake iza uva zvuk dodatno može pojačati za oko 5-10 dB.



Slika 3.2. Čulo sluha i njegovi osnovni delovi (presek)

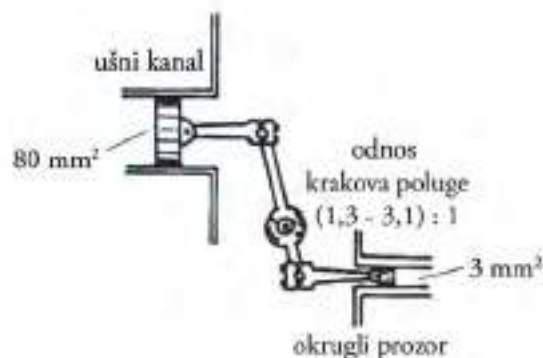
Ušna školjka ima ulogu i pri lokalizaciji zvučnog izvora kao i u prenošenju zvučnih vibracija putem kosti prema unutrašnjem uvu.



Slika 3.3 – Šematski prikaz čovečjeg čula sluha

Slušni kanal je uska cev površine poprečnog preseka od 0,3 cm² do 0,5 cm², dužine 25 mm - 27 mm i ukupne zapremina od oko 1 cm³. Ovaj kanal u akustičkom smislu predstavlja rezonantnu cev zatvorenu na jednom kraju. Pojačanje zvuka usled rezonanse ovako formiranog kanala je najveće u opsegu između 3 kHz i 4 kHz (do 12 dB), dok na frekvenciji od oko 7 kHz iznosi svega 3 dB. Ovo je još jedan primer na koji način je spoljašnje uvo prilagođeno prikupljanju informacija pre svega u srednjem opsegu frekvencija gde se nalazi većina akustičkih informacija bitnih za opstanak u životnoj sredini i neometanu komunikaciju.

Srednje uvo čine: bubna opna (preko koje se ostvaruje veza spoljašnjeg i srednjeg uva), slušne koščiце (čekić, nakovanj i uzengija), Eustahijeva tuba, mišići srednjeg uva, kao i otvori na pužastom telu (ovalni i okrugli prozor), preko kojih se ostvaruje veza srednjeg i unutrašnjeg uva, slika 3.4. Primarna uloga srednjeg uva je prenos, transformacija i pojačanje zvuka koji dolazi iz spoljne sredine na putu do unutrašnjeg uva, kao i zaštita osetljivih elemenata unutrašnjeg uva (od raznih štetnih uticaja, naglog dejstva zvuka velikog intenziteta itd.).



Slika 3.4 – Princip rada srednjeg uva kao pojačavača mehaničke energije pri prenosu vibracija sa bubne opne u unutrašnje uvo [18]

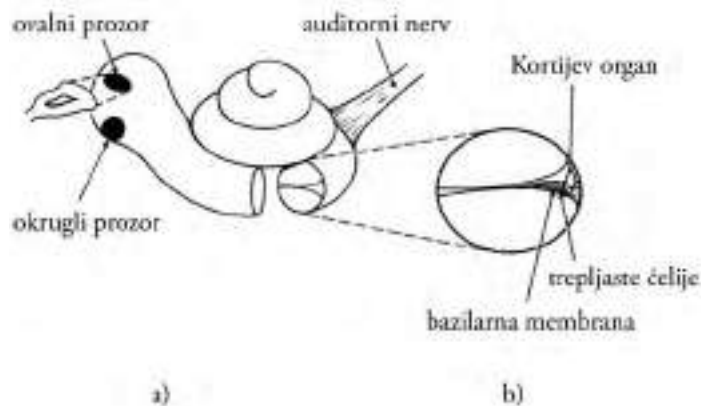
Bubna opna je eliptično-konusna membrana koja vibrira pod uticajem zvučnih talasa u slušnom kanalu. Pomoću nje se akustička energija pretvara u mehaničku i dalje prenosi na sistem slušnih košćica. Dimenzije, krutost, oblik i građa bubne opne su tako podešeni da se na kraju slušnog kanala postiže maksimalno efikasno prilagođenje koje doprinosi tome da se najveći deo akustičke energije prenosi dalje, ka slušnim košćicama. Bubna opna je tanka i veoma osetljiva membrana debljine 0,1 mm i površine od oko 0,8 cm². Na pragu čujnosti ima veoma male pomeraje, reda veličine od 10⁻⁹ cm (prečnik atoma vodonika) do 10⁻⁵ cm. Najosetljivija je u opsegu od 2 kHz do 4 kHz. Interesantno je pomenuti da je osetljivost bubne opne takva da, kada bi bila veća za samo jedan red veličine, reagovala bi i na termičke šumove, kretanje molekula, disajno strujanje itd., što bi ometalo svakodnevni život.

Slušne košćice, koje su u skladu sa svojim izgledom dobile deskriptivna imena – čekić, nakovanj i uzengija, predstavljaju najsitnije kosti u ljudskom organizmu. One su međusobno povezane mišićnim elastičnim vezama, i preko njih se vrši prenos mehaničkih vibracija sa bubne opne na ovalni prozor. Odnosi veličina košćica, način i mesto njihovog vešanja u srednjem uvu, kao i odnosi površina bubne opne (0,8 cm²) i ovalnog prozora (3 mm²), su tako usklađeni da omogućavaju pojačanje mehaničke energije pri prenosu vibracija sa bubne opne u unutrašnje uvo za čak oko 20 puta, što ceo ovaj sistem čini specifičnim mehaničkim pojačavačem, slika 3.4 [18].

Mišići koji vezuju sistem košćica, kako jednu za drugu, tako i za zidove šupljine srednjeg uva, obavljaju i funkciju delimične zaštite

unutrašnjeg uva od prejakih pobuda. Ova zaštita se ostvaruje na taj način što pri jakim pobudama dolazi do kontrakcije mišića čime se ceo sistem slušnih košćica izvodi iz optimalnog položaja, i smanjuje se njegova efikasnost prenosa vibracija ka unutrašnjem uvu. Ova pojava se obično naziva akustički refleks, i njena zaštitna uloga se ostvaruje sa zakašnjenjem od oko 10 ms – 150 ms u odnosu na trenutak prispeća akustičke pobude visokog nivoa [25]. Vreme reakcije je manje što je intenzitet zvuka veći. Na nesreću, akustički refleks je suviše spor da bi bio efikasna zaštita unutrašnjeg uva od iznenadnih impulsnih zvukova, visokog nivoa i izraženih visokih frekvencija u spektru (eksplozije, pucnji iz vatrenog oružja i sl.).

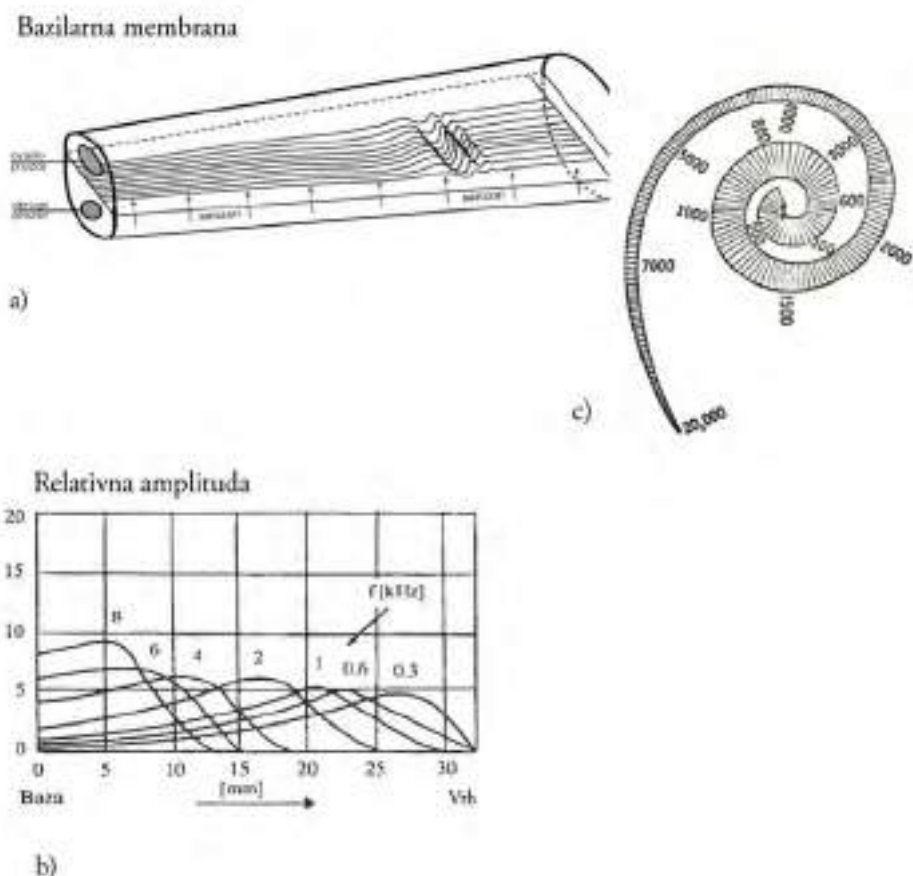
Eustahijeva tuba (cev) je kanal koji povezuje srednje uvo sa grlenom šupljinom, što za posledicu ima da je prostor srednjeg uva, koji se nalazi neposredno iza bubne opne, ispunjen vazduhom. Ova cev je na krajevima levkasta, a u sredini sužena, prečnika samo 1 mm. Eustahijeva tuba se otvara pri gutanju i zevanju, i na taj način se aktivira mehanizam izjednačavanja statičkih (u ovom slučaju atmosferskih) pritisaka sa obe strane bubne opne. U slučaju izloženosti izuzetno jakim zvučnim pritiscima, potrebno je otvoriti širom usta da bi se izjednačio pritisak sa obe strane bubne opne, čime se smanjuje ukupni pritisak na nju sa strane slušnog kanala. U slučaju nagle promene atmosferskog pritiska (uzletanje ili sletanje aviona i sl.) ovo izjednačavanje pritisaka se pospešuje intenziviranjem gutanja ili zevanjem.



Slika 3.5 – Unutrašnje uvo: a) pužasto telo, b) poprečni presek pužastog tela

Prozori između srednjeg i unutrašnjeg uva (ovalni i okrugli) su otvori na kohlei – koščatom pužastom telu, u kojem se nalazi unutrašnje uvo. Uzengija je direktno naslonjena na ovalni prozor, preko kojeg se ostvaruje prenos vibracija sa sistema košćica na limfu, kojom je kohlea ispunjena. S obzirom na činjenicu da se limfa, koja ima konačnu stišljivost, nalazi u zatvorenom prostoru pužastog tela, neophodno je postojanje još jednog otvora - okruglog prozora, koji je zatvoren elastičnom membranom čime se

omogućava neometano pokretanje limfe. Svaki pokret uzengije i ovalnog prozora prema unutrašnjem uvu ima za posledicu prenos vibracije putem limfe i pokret membrane okruglog prozora na suprotnu stranu, prema srednjem uvu i obratno.



Slika 3.6 – Bazilarna membrana: a) talasanje bazilarne membrane [23], b) prostorna raspodela amplituda vibriranja bazilarne membrane, c) topografska šema bazilarne membrane sa naznačenim mestima izražene osetljivosti za pojedine frekvencije [12]

Unutrašnje uvo je organ koji se, kao što je već napomenuto, nalazi u specifičnoj koščanoj strukturi, tzv. pužastom telu (kohlea). Kohlea je najotpornija koščana struktura u ljudskom telu, koja je u stanju da izdrži veće pritiske od butne kosti (koja se smatra za najjaču ljudsku kost) pre pucanja.

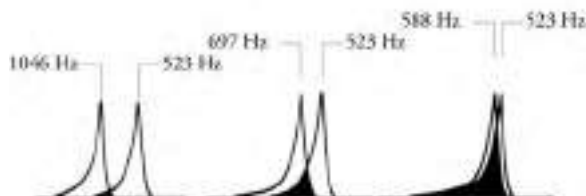
Košćani kanal u kojem se nalazi unutrašnje uvo je pužastog oblika, dva i po puta savijen, ukupne dužine 30 mm - 35 mm, i u potpunosti ispunjen

limfom. U neposrednoj vezi sa kohleom je i organ za ravnotežu (tri polukružna kanala), koji funkcioniše nezavisno od samog čula sluha.

Pužasto telo je pregradom podeljeno po horizontali (osim pri samom vrhu) na gornji (skala vestibuli) i donji (skala timpani) deo, slika 3.5b. Ova pregrada je poznata pod imenom bazilarna membrana. Bazilarna membrana je na početnom delu (prema srednjem uvu) uža, tanja i elastičnija dok je na drugom kraju šira, deblja i čvršća, slika 3.6a. Duga je 32 mm a širina joj se menja od 0,1 mm do 0,5 mm. Vibracije koje se u unutrašnje uvo prenose preko slušnih košćica izazivaju talasanje limfe koje se prenosi na ovu membranu. Zbog postojanja razlike u mehaničkim karakteristikama i različitom rastojanju od izvora pobude, pojedini delovi bazilarne membrane različito reaguju na pobudne vibracije različitih frekvencija.

Područje bazilarne membrane čija je frekvencija rezonanse najbliža pobudnoj frekvenciji će pri takvoj pobudi vibrirati jače nego ostala područja. Dakle, mesto najvećeg talasanja bazilarne membrane zavisi od frekvencije prenesenih vibracija iz srednjeg uva, slika 3.6b.

Visoke frekvencije izazivaju najveću amplitudu talasanja ili oscilovanja bazilarne membrane na njenom početnom delu, a niske na završnom delu. Duž bazilarne membrane mehanički talas prođe za nekih 50 μ s. Pošto pojedinačni delovi bazilarne membrane nisu međusobno nezavisni, zone membrane koje su blizu mesta maksimalnih vibracija, takođe će vibrirati u određenom iznosu. U tom smislu se način vibriranja ove membrane može vizualizovati kao talas koji povećava amplitudu idući od korena membrane prema mestu najvećih vibracija a zatim slabi u jačini idući prema vrhu membrane.



Slika 3.7 – Preklapanje krivih odziva bazilarne membrane sa približavanjem frekvencija pobudnih tonova

Dakle, zvučna vibracija na ovalnom prozoru proizvodi u kohlei talas koji putuje duž bazilarne membrane od baze prema vrhu. Ovaj talas raste po veličini, dostižući na izvesnom rastojanju svoj maksimum i onda se brzo gubi. Mesto na kome talas dostiže svoj maksimum zavisi od frekvencije pobudnog tona. Talasi visokih frekvencija brzo po nastanku dostižu maksimum i gube se, a talasi niskih frekvencija stižu do kraja bazilarne membrane, dostižući tamo svoj maksimum. Kod prijema visokih tonova, ova zona oko vrha puža ostaje potpuno mirna. Ovako nabrojane činjenice su poznate kao teorija mesta u percepciji zvuka, prema kojoj su mesta maksimalne deformacije bazilarne membrane frekvencijski zavisna, slike

3.6b i 3.6c. Varijacija mehaničkih karakteristika bazilarne membrane sa njenom dužinom stoga jeste fiziološka osnova za prepoznavanje frekvencijskog sadržaja zvuka.

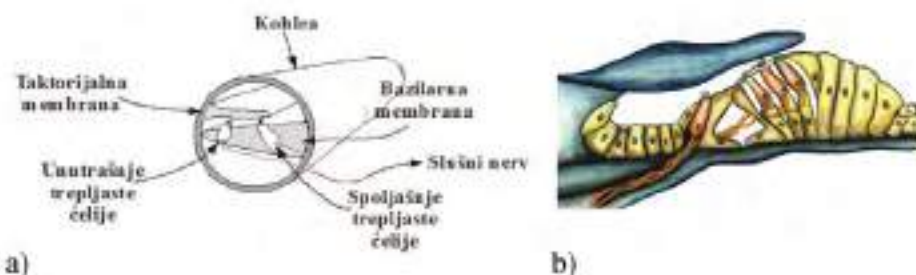
Kada se bazilarna membrana pobuđuje jednovremeno zvukom različitih frekvencija onda je njeno talasanje veoma složeno. Krive odziva bazilarne membrane se sve više preklapaju što su frekvencije pobudnih tonova međusobno bliže, slika 3.7. U okviru slušnog opsega postoje 24 tzv. „kritična opsega“ od kojih svaki na bazilarnoj membrani zauzima sektor od 1,3 mm dužine i obuhvata oko 1.300 neurona.

Kortijev organ

Na bazilarnoj membrani, celom njenom dužinom, nalazi se Kortijev organ, slika 3.8, do kojeg dopiru nervni završeci, i u kojem se obavlja proces pretvaranja mehaničkih vibracija u električne signale. Ovaj organ sadrži oko 30.000 osetljivih slušnih ćelija koje se završavaju izuzetno tankim dlačicama (trepljama), poznatim i pod imenom *cilije*. Neposredno iznad dlačica nalazi se još jedna membrana, koja je relativno nepokretna i nosi ime *tektorijalna* membrana. Pri pomeranjima pobuđenih delova bazilarne membrane dolazi do „trljanja“ dlačica o nepomičnu tektorijalnu membranu, zbog čega se dlačice savijaju, što predstavlja nadražaje slušnih ćelija. Pri tome se dešavaju složene hemijske i električne promene (u čije detalje ovde nećemo ulaziti) tako da se mehanički nadražaji pretvaraju u tzv. kohlearne električne potencijale, odnosno potencijalne razlike između unutrašnje i spoljašnje strane membrane nervne ćelije. Kada ova razlika dostigne odgovarajuću vrednost (tzv. prag okidanja) dolazi do naglog prolaska jona kalijuma i natrijuma u suprotnim smerovima kroz membranu ćelije, promene polariteta potencijalne razlike između dve strane membrane i generisanja nervnog impulsa, čiji potencijal može dostići 130 mV [12]. Generisani električni impulsi se preko nervnog sistema (brzinom od oko 30 m/s) prenose do mozga gde izazivaju konačan osećaj zvuka. Treba napomenuti i da su sve dlačice opremljene mikroskopskim mišićnim vlaknima koja omogućavaju regulaciju stepena njihovog povijanja, što predstavlja osnovu za spuštanje subjektivnog osećaja pozadinskog šuma i žamora, izdvajanje bitnih zvučnih informacija iz većeg broja manje bitnih i tome slično.

Konačna električna informacija o zvuku se, dakle, formira kao niz impulsa, što se sa aspekta prenosa signala može posmatrati kao specifičan tip diskretnog, digitalnog signala. Na ovaj način generisani električni impulsi, koji se kombinuju u neuronskoj mreži svih isprepletanih nerava spojenih za Kortijev organ, predstavljaju kodiranu informaciju o karakteristikama zvuka koju samo mozak može da dešifruje. Ova informacija se putem auditornog nerva (vestibulokohlearni nerv) prenosi do kohlearnog nukleusa, koji se nalazi u zoni malog mozga, na samom prelazu ka kičmenoj moždini, odakle se dalje prosleđuje do srednjeg mozga i talamusa. Tokom

celog svog puta informacija se postepeno dekodira, da bi se na kraju pojavila u kori velikog mozga, gde se formira konačan osećaj zvuka. I dok se kompletan način rada ljudskog čula sluha, zaključno sa načinom generisanja električnih impulsa, može smatrati poznatim i dobro istraženim, ovaj proces kodiranja i dekodiranja završne informacije u mozgu ostaje za sada potpuna nepoznanica, dobro sakrivena u misteriji postanka i funkcionisanja mozga kao organa, ali i ljudske svesti kao takve.



Slika 3.8 – Kortijev organ: a) njegov položaj u kohlei sa naznačenim slušnim ćelijama, bazilarnom i tektorijskom membranom, b) detalj uvećanih slušnih ćelija [23]

Za formiranje celovitog zvučnog osećaja, u mozgu se kombinuju informacije iz oba uva, koja su u funkcionisanju potpuno nezavisna. Zvuk se prenosi i preko kostiju glave, što ima značajan uticaj pri slušanju sopstvenog glasa. Govorni signal koji se prenosi preko kostiju glave (usled različitog otpora koji mu pružaju pojedini delovi) zvuči drugačije nego onaj koji se prenosi vazduhom. Upravo to je razlog zbog kojeg čoveku audio snimak sopstvenog glasa čudno zvuči.

Oštećenja čula sluha

Ovaj, najkraći prikaz mehanizma slušanja ukazuje na izuzetnu složenost čula sluha. Kako je prethodno rečeno, pomoću ovog organa se akustička energija zvučnog talasa, koji dolazi na ušnu školjku, pretvara u mehaničku, što dovodi do vibracija tečnosti u unutrašnjem uvu i konačno do okidanja električnih impulsa koji nose informaciju do centra za sluh u mozgu. Do poremećaja pri slušanju može doći usled promena ili oštećenja u bilo kom delu ovog prenosnog lanca. Promene na čulu sluha se dele na privremene i trajne. Privremene promene, poput dobro poznatog osećaja zujanja u ušima nakon izlaska iz bučnog okruženja, predstavljaju vrstu upozorenja i zaštite čula sluha od trajnih oštećenja. Pojava zujanja u ušima, poznata pod imenom tinitus, može postati trajan osećaj, koji u mnogome ometa i negativno utiče na kvalitet života.

Oštećenja unutrašnjeg uva, koja nastaju usled jakih pobuda (glasno slušanje muzike putem slušalica, boravak u sredinama sa visokim nivoima buke, delovanje impulsne buke velikog intenziteta i sl.), mogu dovesti do

prekida neuronskih veza u unutrašnjem uvu, čime oštećenje postaje trajno. Ova oštećenja sluha se kao po pravilu dešavaju u određenim delovima zvučnog spektra, u zavisnosti od toga koji je deo bazilarne membrane bio preporučen. Ovakva oštećenja se mogu konstatovati audiološkim pregledom, koji bi trebalo da postane standardan deo sistematskih pregleda koje pojedinac obavlja, pogotovo ukoliko je svestan svoje izloženosti buci, ili obavlja poslove koji se baziraju na stalnom procesu slušanja. Do trajnih poremećaja čula sluha može doći i usled mehaničkih oštećenja bubne opne, zbog čega treba izbegavati nekontrolisano uvlačenje bilo kakvih predmeta u slušni kanal. Slušni aparat je jedan od najsloženijih, ali i najosetljivijih mehanizama koje je priroda stvorila, te ga u tom smislu treba veoma pažljivo i sa punom svesću o mogućim negativnim posledicama koristiti i po potrebi štiti (korišćenje zaštitnih čepića, antifonskih slušalica, nezadržavanje u bučnim sredinama bez preke potrebe, izbegavanje dugotrajnijeg i glasnog slušanja muzike putem slušalica i sl.).

3.3 Percepcija kvaliteta zvuka

Pri prijemu zvuka čulo sluha razlikuje vrlo jasno tri psihoakustičke veličine. To su: jačina (glasnost) zvuka, visina tona i boja zvuka.

Jačinu zvuka određuje intenzitet, koji zavisi od snage zvučnog izvora i od udaljenosti od izvora. Visina tona zavisi od frekvencije, dok boju zvuka određuje njegov spektar.

Sva čula, preko kojih čovek ostvaruje kontakt sa okolinom i reaguje na nadražaje (zvuk, svetlo, toplota i drugo), podležu jednom istom zakonu. Taj zakon su ustanovili Veber i Fehner i on glasi: osećaj je srazmeran logaritmu pobude.

Praktično, prema ovom zakonu, čovečija čula ne reaguju na nadražaje linearno, nego logaritamski.

Veber-Fehnerov zakon se, kada je u pitanju zvuk, odnosi na jačinu i na visinu tona.

3.3.1 Jačina zvuka

U odeljku 1.9 je već dovoljno rečeno o razlozima zbog kojih se jačina zvuka u akustici umesto preko zvučnog pritiska ili intenziteta zvuka, uglavnom izražava preko njegovog nivoa datog u decibelima. Kao primer, u tabeli 3.1 su date neke karakteristične vrednosti nivoa zvuka u okviru decibelske skale.

Decibel je veličina za određivanje objektivne jačine zvuka, a s obzirom da predstavlja logaritamski odnos dve vrednosti iste veličine, on je istovremeno na neki način i merilo subjektivne jačine [6].

Sa druge strane decibel je jedinica upravo primerena uobičajenim jačinama zvuka u čovekovom okruženju. Veće jedinice kao što su bel ili neper

bile bi suviše velike za finu podelu skale nivoa zvuka. Najmanje promene nivoa zvuka koje uvo može da zapazi pri slušanju čistih tonova prikazane su na slici 3.9 u funkciji nivoa i frekvencije. Kao što se vidi sa slike 3.9 za veće nivoe i više frekvencije one iznose manje od 0,5 dB, dok su pri nižim nivoima i niskim frekvencijama veće od 1 dB. Međutim, uzima se u praksi da one (sem u ekstremnim slučajevima veoma niskih frekvencija i nivoa zvuka) iznose reda jednog decibela. Kada se radi o složenim zvukovima, rezolucija čula sluha je grublja, i smatra se da je najmanja promena ukupnog nivoa, koju sa sigurnošću možemo osetiti, reda 3 dB.

Tabela 3.1 – Prosečne vrednosti nivoa različitih vrsta zvuka

Vrste zvuka	Nivo [dB]
Granica bola	140
Kompresorski čekić	120
Fortisimo orkestra u sali	110
Tkačnice, fabrike obuće	100
Forte orkestra u sali	90
Veoma prometna ulica	80
Živ razgovor	70
Kancelarije, restorani, šalteri	60
Normalan razgovor	50
Biblioteka, stan (zatvoreni prozori)	40
Šuma, poletarac	20
Normalno disanje	10
Prag čujnosti	0

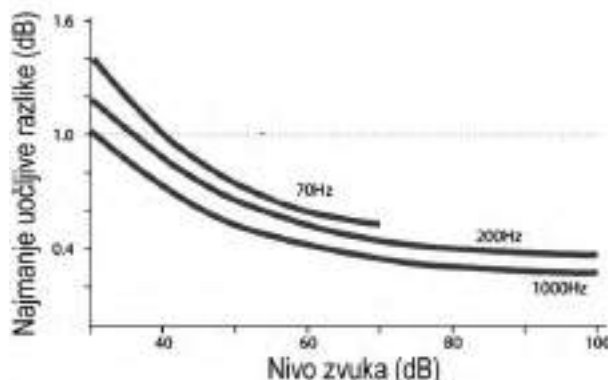
Ovo nam dalje govori da podela skale nivoa zvuka na manje jedinice od 1 dB, kao ni izražavanje mernih rezultata prilikom merenja nivoa zvuka u delovima decibela, nemaju nekog praktičnog smisla.

Kako je već prethodno rečeno, decibel je relativna jedinica, pa je u vezi sa tim od interesa pokazati kako se izračunava razlika jačina dva zvuka. Neka su njihovi intenziteti J_1 i J_2 , pa će, prema izrazu (1.13) razlika njihovih nivoa biti:

$$L_1 - L_2 = 10 \log \frac{J_1}{J_0} - 10 \log \frac{J_2}{J_0},$$

$$L_1 - L_2 = 10 \log \frac{J_1}{J_2}. \quad (3.1)$$

U praksi je upravo čest slučaj da se ne određuje nivo u decibelima prema pragu čujnosti, nego se izračunava relativna razlika dva nivoa. Recimo ako za neku prepreku (zid) znamo koliko iznosi razlika nivoa sa jedne i druge njene strane, doći ćemo do podatka koliko je prepreka dobar izolator zvuka.



Slika 3.9 – Najmanje promene nivoa zvuka koje uvo može da zapazi

Korisno je uvek imati na umu da podaci o nivou zvuka, izraženi u dB, ne zavise od frekvencije.

Interesantno je navesti i kako se decibeli „sabiraju“. Evidentno je da će sabiranje biti logaritamsko. Tako, ukoliko imamo dva ista nivoa, L_1 i L_2 , ukupni nivo se izračunava preko zbira intenziteta. Nivou L_1 odgovara intenzitet J_1 , a nivou L_2 intenzitet J_2 . Ukupni intenzitet je:

$$J = J_1 + J_2 = 2J_1,$$

pošto su intenziteti isti.

Povećanje ukupnog nivoa u odnosu na pojedinačni (sve jedno koji, jer su isti, $J_1 = J_2$) je:

$$\Delta L = 10 \log \frac{J_1 + J_2}{J_1} = 10 \log \frac{2J_1}{J_1},$$

$$\Delta L = 10 \log 2 = 3 \text{ dB}.$$

Znači da će zbir dva ista nivoa, od na primer 70 dB, biti uvećan za 3 dB, i iznosiće 73 dB. Ako su nivoi različite vrednosti njihov zbir će biti uvećan manje od 3 dB u odnosu na veći nivo.

Povećavanjem broja izvora, povećava se i ukupni nivo zvuka. Tako će, na primer, hor od 100 pevača, pod pretpostavkom da svaki član hora ima istu akustičku snagu, stvarati u odnosu na jednog pevača nivo veći za 20 dB, jer je:

$$\Delta L = 10 \log \frac{100}{1} = 10 \log 10^2 = 20 \text{ dB}.$$

Pri udaljavanju od zvučnog izvora svako udvostručavanje rastojanja dovodi, u slobodnom prostoru, do smanjenja nivoa zvuka za 6 dB, jer je:

$$\Delta L = 20 \log \frac{p_1}{p_2} = 20 \log \frac{r_2}{r_1} = 20 \log 2 = 6 \text{ dB.} \quad (3.2)$$

gde je r_2 dvostruko veće rastojanje od r_1 .

3.3.2 Subjektivna jačina zvuka

Subjektivnom osećaju promene jačine zvuka sasvim odgovara skala u dB, prikazana u tabeli 3.1. Međutim, pokazalo se da se subjektivni osećaj jačine zvuka ne može na pravi način izraziti preko nivoa zvuka.

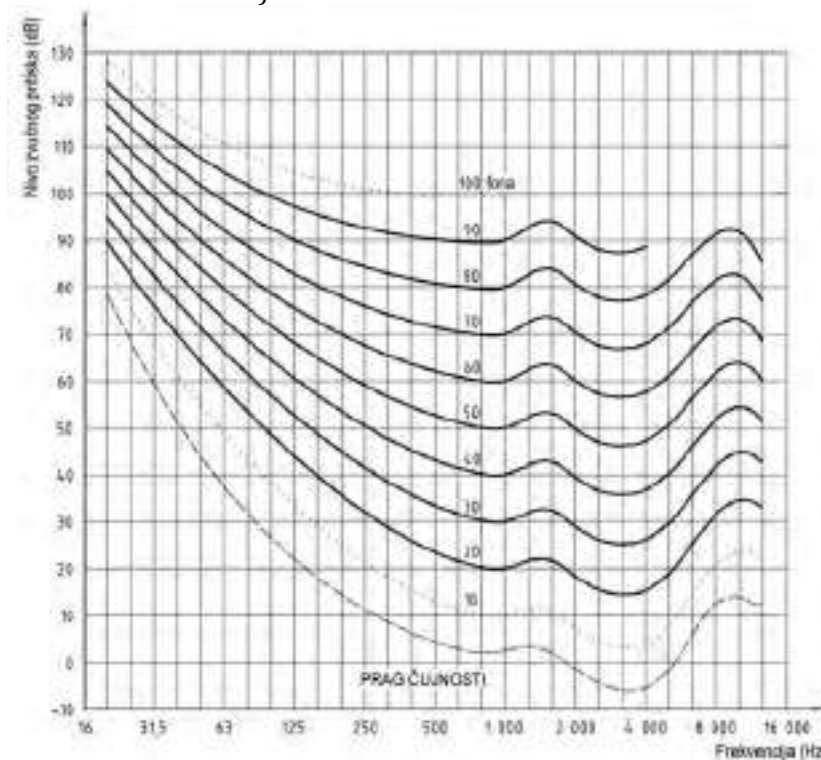
Dva zvuka iste objektivne jačine (odnosno istog nivoa) ali različitih frekvencija nisu po subjektivnoj oceni jednake jačine. Zato je uvedena jedinica za merenje subjektivne jačine zvuka, nazvana *fon*. Usvojeno je da, samo na 1000 Hz, fon bude jednak decibelu. Na ostalim frekvencijama broj fona i broj decibela su različiti i ovaj odnos zavisi od razlike osetljivosti čula sluha na različitim frekvencijama pri datom konstantnom nivou.

Subjektivna jačina zvuka je veličina koja se još naziva *nivo subjektivne jačine zvuka*, *nivo glasnosti* ili prosto *jačina zvuka* i označava se sa Λ ili L_N . Ova veličina se odnosi na čiste tonove i za sve ostale frekvencije (izuzev 1000 Hz) određena je eksperimentalno, tako što je utvrđeno kada neki ton izgleda jednako jak kao ton na frekvenciji 1000 Hz za koji je poznata jačina. Tako su dobijene izofonske linije (ili krive), tj. linije jednake subjektivne jačine zvuka. Ove krive su prvo odredili Flečer i Menson [1], kasnije su Robinson i Dadson [2] izvršili određene ispravke i tako izmenjene krive su bile osnova prvih verzija standarda ISO 226 (1961, 1987). Novije eksperimentalne rezultate iz ove oblasti sumirala je jedna međunarodna ekspertska grupa i na bazi tih rezultata urađena je 2003. godine revizija pomenutog standarda. U novoj verziji standarda [15] date su prilično izmenjene izofonske krive (u odnosu na ranije, tzv. klasične), slika 3.10, nazvane *normalne krive* iste glasnosti za čiste tonove. Krive se odnose na mlade, zdrave osobe normalnog sluha starosti od 18 do 25 godina, otološki normalne osobe, pa otuda i naziv *normalne krive*. Pored toga treba istaći da su rezultati na bazi kojih su formirane izofonske krive dobijeni u slobodnom polju ravanskih talasa, pri slušanju sinusnih tonova sa oba uva, koji dolaze spreda.

Kako se vidi sa slike 3.10, izofonske linije za 10 fona i 100 fona su na dijagramu označene tačkicama. Razlog tome je što se pokazalo da je subjektivnu jačinu zvuka od 10 fona i 100 fona u praksi veoma teško odrediti i da nema dovoljno relevantnih rezultata prema kojima bi se mogle definisati ove krive. Takođe, za krivu od 90 fona nije bilo dovoljno podataka na frekvencijama iznad 4 kHz.

Za svaku frekvenciju i za svaki nivo zvuka može se sa slike 3.10 pročitati u kakvom odnosu su objektivna i subjektivna jačina zvuka. U

standardu [15] su definisani i dosta složeni matematički izrazi preko kojih je moguće preračunati subjektivnu jačinu zvuka u nivo zvuka i obratno (tj. fone u decibele i obratno).



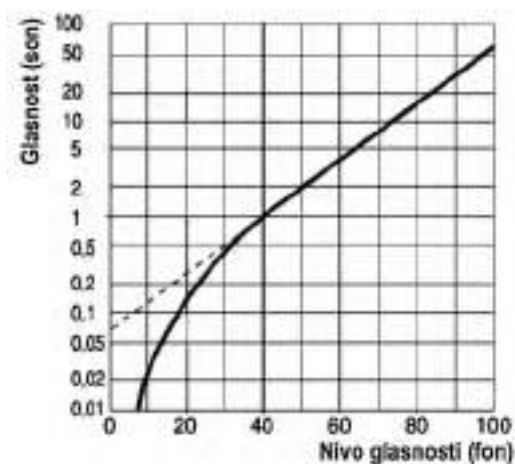
Slika 3.10 – Izofonske linije – Normalne krive jednake glasnosti za čiste tonove [15]

Linije sa slike 3.10 pokazuju frekvencijsku nelinearnost čula sluha. Recimo sinusni ton frekvencije 1 kHz i nivoa 50 dB ima subjektivnu jačinu 50 fona. Da bi istu jačinu imao sinusni signal frekvencije 63 Hz njegov nivo mora biti 80 dB. Kao što se vidi, ova nelinearnost je nešto manja kada su u pitanju zvukovi višeg nivoa, što je i razlog da se pri reprodukciji zvuka u bioskopima, režijama tona i sl., preporučuju nivoi od 80 dB do 90 dB [20].

Ekvidistantnost izofonskih krivih nam govori da i jedinica fon, kao i decibel ima logaritamski karakter iako su međusobno različite, izuzimajući frekvenciju od 1 kHz. Otuda, između ostalog i naziv *nivo glasnosti*, pošto se radi o logaritamskoj veličini. Tako možemo biti sigurni da će i za fon važiti isto što i za decibel: pojačanje nivoa glasnosti uvek za isti broj fona ocenjuje se kao ravnomerno [6].

Međutim, relativna promena subjektivne jačine zvuka nije proporcionalna nivou glasnosti izraženom u fonima, drugim rečima ton od 80 fona neće proizvesti dva puta glasniji zvuk nego ton od 40 fona. Ovaj problem je rešen uvođenjem nove skale kojom se izražava glasnost zvuka sa

novom jedinicom nazvanom *son*. Broj sona na ovoj skali daje nam podatak koliko je puta zvuk glasniji od zvuka čija je glasnost 1 son. Tako je npr. zvuk koji ima 10 sona dva puta glasniji od zvuka koji ima 5 sona ili 10 puta glasniji od zvuka koji ima 1 son.



Slika 3.11 – Glasnost S čistih tonova (izražena u sonima) u funkciji nivoa glasnosti Λ (izraženog u fonima)

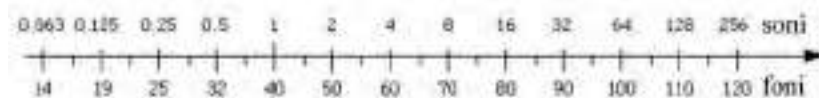
Skala u sonima, slika 3.11, je takođe dobijena eksperimentalno, pri čemu je dogovorom, na njoj utvrđena referentna tačka u kojoj glasnost od 1 son odgovara nivou glasnosti od 40 fona, što odgovara nivou od 40 dB za sinusni ton frekvencije 1 kHz. Rezultati eksperimenata su takođe pokazali da povećanje jačine zvuka za 10 fona odgovara udvostručavanju njegove glasnosti. Na osnovu prethodnih činjenica, veza između glasnosti, koju označavamo sa S , i nivoa glasnosti Λ može se izraziti relacijom:

$$S \text{ (sona)} = 2^{\frac{\Lambda(\text{fona}) - 40}{10}}, \Lambda \geq 40 \text{ fona} \quad (3.3)$$

koja na dijagramu sa vertikalnom osom (S osa) u logaritamskoj razmeri daje pravu liniju. Pokazalo se da pri nivoima glasnosti ispod 40 fona ne postoji ovako prosta zavisnost između S i Λ , što je uzeto u obzir prilikom izrade nove verzije DIN standarda [19], a što je prikazano zakrivljenim delom grafika na slici 3.11. Odgovarajuće vrednosti glasnosti i nivoa glasnosti prikazane su i na monogramu na slici 3.12.

Osećaj glasnosti tona zavisi i od njegovog trajanja. Pre svega treba naglasiti da postoji vremenski prag, tj. minimalno trajanje sinusnog tona da bi se stekao utisak da se uopšte radi o tonu. To minimalno trajanje iznosi oko 10 ms - 15 ms, ili minimalno dve do tri pune oscilacije tona date frekvencije. Tonovi koji traju duže od ovog minimalnog vremena mogu se prepoznati kao

tonovi date visine i glasnosti, pri čemu ova glasnost zavisi od dužine njihovog trajanja.

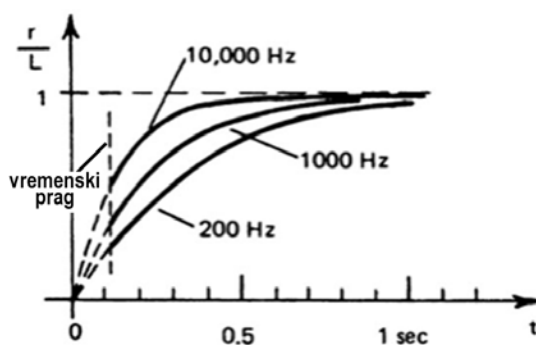


Slika 3.12 – Odgovarajuće vrednosti glasnosti i nivoa glasnosti za čiste tonove

Što je trajanje tona kraće (pri konstantnom intenzitetu) to je manja njegova glasnost. Konačna glasnost tona se dostiže za kraće vreme što je njegova frekvencija viša, slika 3.13. Kako se sa ove slike vidi, ton dostiže punu glasnost (za dati intenzitet) za otprilike oko 500 ms.

Nađeno je da za tonove kratkog trajanja njihova glasnost ne zavisi od intenziteta zvučnog talasa već od ukupne akustičke energije koju je uvo primilo (intenzitet x vreme). To je takozvani efekat vremenske integracije glasnosti. Smatra se da je u ovom slučaju osećaj glasnosti proporcionalan ukupnom broju prenetih nervnih impulsa do centra za sluh.

Sa druge strane, ako izlaganje tonu određene glasnosti traje suviše dugo dolazi do efekta *adaptacije*, koji se manifestuje padom glasnosti. Efekat adaptacije je veći za više tonove istog intenziteta. Za tonove iste frekvencije ovaj efekat se smanjuje kada njihov nivo raste [3].



Slika 3.13 – Vreme potrebno da tonovi različitih frekvencija dostignu punu glasnost. Na ordinati je dat odnos dostignute i pune glasnosti tona [3]

Određivanje subjektivne jačine složenog zvuka nije jednostavno rešiti. Da bi se osećaj jačine složenog zvuka izrazio u fonima potrebno je ustanoviti postupak koji će biti što približniji načinu rada čula sluha. Najbolje bi bilo kada bi se jačina složenog zvuka određivala poređenjem sa definisanom jačinom tona od 1000 Hz. Očigledno je da ovakav način nije pogodan za praksu.

Posle mnogih pokušaja, uvedeno je nekoliko postupaka za određivanje subjektivne jačine složenog zvuka, zavisno od toga kakva je njegova priroda i složenost.

Ukoliko se radi o složenom zvuku koji ima linijski spektar sa definisanim komponentama i njihovim amplitudama, subjektivna jačina se određuje na sledeći način:

- prvo se nivo svake komponente, izražen u dB, koriguje u skladu sa izofonskim linijama i na taj način dobiju pojedinačne vrednosti u fonima,
- zatim se foni pretvore u sone, saberu se soni i zbir sona, ako je potrebno, vrati ponovo u fone.

Nešto vrlo slično radi i čovečije uvo. Svaka se komponenta koriguje prema osetljivosti uva na odgovarajućoj frekvenciji. Zatim komponente pojedinačno pobuđuju na bazilarnoj membrani nervne završetke, da bi se duž nervnih puteva ostvarila superpozicija pojedinačnih nadražaja i konačno informacija stigla do centra za sluh u mozgu.

Pri tome pojedine komponente složenog zvuka moraju biti dovoljno razmaknute tako da pripadaju različitim kritičnim opsezima. Na najnižim frekvencijama širina kritičnog opsega je veća od širine oktave dok je na višim frekvencijama približno jednaka širini trećine oktave.

Problem je komplikovaniji kada složen zvuk ima kontinualni spektar. U tom slučaju se koriste složenije metode od kojih sve daju približne rezultate. Među njima je nešto prostija Stivensonova. Po ovoj metodi prvo se odrede spektri zvuka po tercama ili oktavama pa se za svaki opseg posebno izračunava glasnost zvuka. Tada se pojedinim opsezima daje prednost preko težinskih koeficijenata i izračunava se ukupna glasnost.

Treba pomenuti da na tržištu postoje različiti softverski paketi sa algoritmima za izračunavanje glasnosti. Takođe je interesantno da, od skoro, radio i TV stanice imaju obavezu da neprestano tokom emitovanja vrše normalizaciju glasnosti signala govora i muzike. Pri tome koriste relativno jednostavne algoritme, koji su se u praksi pokazali veoma prihvatljivim [20], [22].

3.3.3 Visina tona

Visina tona je subjektivna karakteristika koja se zapaža kod zvukova koji se periodično menjaju u vremenu (tonovi muzičkih instrumenata, samoglasnici u ljudskom govoru i sl.) i određena je njihovom osnovnom frekvencijom. Po ovoj karakteristici periodične zvukove (koji imaju diskretan spektar) možemo rangirati kao „niže“ i „više“, gde manja frekvencija daje osećaj nižeg tona, a veća frekvencija višeg.

Osnovni harmonik u spektru periodičnog zvuka merodavan je za ocenu visine tona. Međutim, pokazuje se u praksi, da uvo može precizno oceniti visinu tona i kada ne postoji osnovni harmonik. Na primer, ako preko uređaja čiji je propusni opseg ograničen sa donje strane reprodukujemo više

harmonike složenog zvuka na 1000 Hz, 1500 Hz, 2000 Hz i 2500 Hz, osećaj visine će biti isti kao da smo zajedno sa njima reprodukovali i osnovni harmonik na 500 Hz. Ovo je takozvani efekat nedostajućeg osnovnog tona (*missing fundamental effect*), koji je posledica nelinearne prenosne funkcije čula sluha. U ovom slučaju frekvencija osnovnog harmonika se dobija iz razlika i zbira frekvencija viših harmonika.

Sličan slučaj je i kod nekih muzičkih instrumenata (truba, oboa, fagot) gde viši harmonici imaju veću amplitudu od osnovnog, ali čulo sluha vezuje odsviranu notu za osnovni harmonik.

Međutim, kada se radi o akordima (zvuk sastavljen od više muzičkih tonova), gde razmak između komponenti nije jednak, visina tona ostaje nedefinisana, iako i akord ima linijski spektar [6].

Složeni zvukovi koji nemaju harmonijsku strukturu nemaju ni karakterističnu frekvenciju ni visinu.

Subjektivni osećaj visine tona ne poklapa se sa skalom u hercima, već je eksperimentalno ustanovljeno da uvo visinu tona čuje „logaritamski“. To znači da subjektivnom povećanju visine tona za isti interval odgovara povećanje frekvencije za isti procenat, što drugim rečima znači da je subjektivni osećaj visine tona proporcionalan logaritmu frekvencije, ili matematički:

$$visina\ tona \approx \log f. \quad (3.4)$$

Upravo činjenica da uvo čuje logaritamski tj. saznanje da je subjektivna visina tona proporcionalna logaritmu frekvencije je razlog što se za frekvenciju u svim dijagramima u oblastima vezanim za proučavanje zvuka (akustika, elektroakustika, audiotehnika itd.) koristi logaritamska skala. Time se postiže da jednaki razmaci na ovoj skali predstavljaju za ljudsko uvo jednake intervale. Na frekvencijskoj skali se najčešće koriste intervali oktave, ili intervali njenih delova kao što je trećina oktave (terca), na primer. Oktava je opseg frekvencija čije se granice odnose kao 2:1, dok je centralna frekvencija oktave jednaka geometrijskoj sredini njenih graničnih frekvencija. Standardizovane centralne frekvencije oktava u akustici su: 31,5 Hz; 63 Hz; 125 Hz; 250 Hz; 500 Hz; 1000 Hz; 2000 Hz; 4000 Hz; 8000 Hz; 16000 Hz. Terca je interval čije se granice odnose kao $\sqrt[3]{2} : 1 \approx 1,26 : 1$, a njena centralna frekvencija se takođe dobija kao geometrijska sredina graničnih frekvencija. Oktava ima tri terce: donju, centralnu i gornju. Centralne frekvencije terci u akustici su: 20 Hz; 31,5 Hz; 40 Hz; 63 Hz; 80 Hz; 100 Hz; 125 Hz; 160 Hz; ... itd.). Čujno područje uva (20 Hz do 20 000 Hz) obuhvata opseg od tačno 10 oktava.

U percepciji zvuka za prikaz rezultata subjektivnih osećaja koristi se interval 1/12 oktave koji se naziva poluton. Poluton se koristi i u muzici, gde je u pitanju tzv. temperovana skala, prema kojoj se podešavaju visine tonova

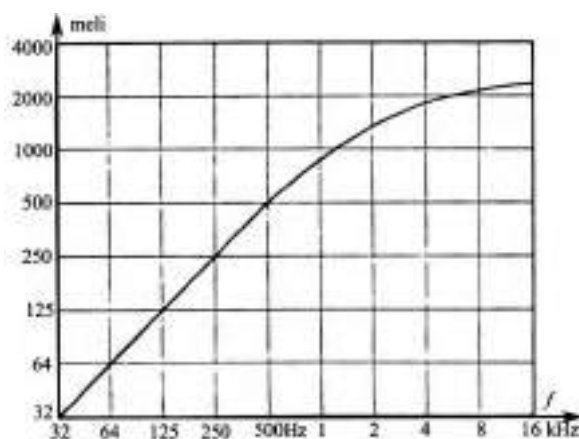
na muzičkim instrumentima kod kojih su one fiksne. Poluton je interval kod kojeg je promena frekvencije:

$$\frac{f_{n+1}}{f_n} = \sqrt[12]{2} \cong 1,06, \quad (3.5)$$

što znači da svaki sledeći poluton f_{n+1} ima za 6 % višu frekvenciju od prethodnog f_n .

Kada se radi o izradi mernih dijagrama u praksi, logaritamska podela na frekvencijskoj osi se dobija vrlo jednostavno. Ako se radi o intervalima oktava isti odsečki na apscisi se označavaju svaki put dvostruko većom vrednošću frekvencije. Ako je podela u trećinama oktava svaki put se na jednakim odseccima nanosi za 26 % veća frekvencija, a ako je podela u polutonovima svaki put za 6 % veća frekvencija.

Uvo može da zapazi još manju promenu frekvencije od polutona. Ova sposobnost uva nije podjednako izražena u celom opsegu čujnih frekvencija, o čemu će nešto kasnije biti više govora.



Slika 3.14 – Melodijska skala za visinu tona.

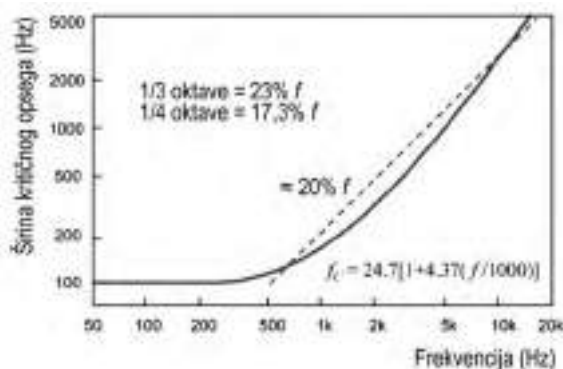
Veza između mela i herca (obe ose su u logaritamskoj razmeri)

Polazeći od upravo iznetih podataka može se utvrditi da u čujnom opsegu ima oko 850 koraka na skali visine tona koje uvo može da razlikuje. Ovim koracima odgovara 850 jednakih segmenata na bazilarnoj membrani koja je dugačka oko 32 mm. To drugim rečima znači da bi se osetila promena visine tona, maksimalna vrednost amplitude pobudnog signala na bazilarnoj membrani mora da se pomeri za dužinu jednog segmenta tj. za 37 μm .

Na osnovu iznetih činjenica uvedena je melodijska skala sa jedinicom *mel* za visinu tona, slika 3.14, koja unekoliko odstupa od čistog logaritamskog zakona između visine tona i frekvencije, kako je navedeno u vezi sa jednačinom (3.2). Jedinice mel i herc, prema ovoj skali, poklapaju se

ispod 500 Hz, dok iznad 500 Hz za jednake promene u melima potrebne su sve veće promene u hercima (logaritamska veza). Vrednosti u melima duž bazilarne membrane daju linearnu skalu, za razliku od skale u hercima koja iznad 500 Hz praktično prelazi u logaritamsku [23].

Ispitivanja osetljivosti uva na minimalne promene visine tona su dovela do zaključka da osetljive ćelije na bazilarnoj membrani koje pripadaju tzv. „radnoj grupi“ pobudne signale unutar ovog područja analiziraju u celini, a ne svaku komponentu nezavisno [6]. Radna grupa ima na svim mestima bazilarne membrane istu dužinu od 1,3 mm i obuhvata interval od 100 mela, za koji je uvedena nova jedinica visine tona nazvana *bark*. U čujnom području postoje 24 barka.



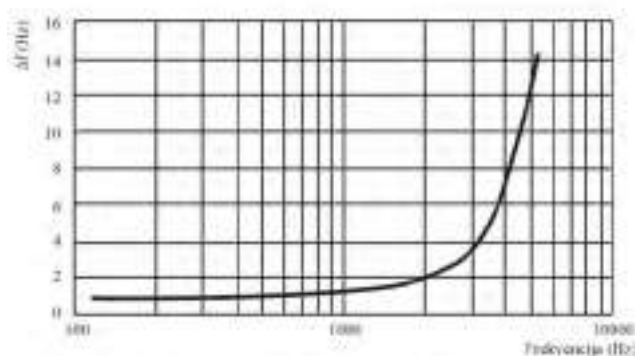
Slika 3.15 – Širina kritičnih opsega u funkciji frekvencije [25]

Položaj radnih grupa na bazilarnoj membrani nije fiksna, već se one formiraju oko mesta najjače pobude. Interval radne grupe, izražen u Hz, naziva se kritični opseg. Širina kritičnog opsega raste sa frekvencijom i može se približno uzeti da, na frekvencijama ispod 500 Hz iznosi približno 100 Hz a na frekvencijama iznad 500 Hz 20 % od centralne frekvencije opsega, slika 3.15. U praksi se širina kritičnog opsega iznad 500 Hz može (sa malom greškom) aproksimovati širinom odgovarajućeg tercnog filtra koja iznosi 23 % od centralne frekvencije opsega [25].

Ovde treba istaknuti činjenicu da fazna razlika između komponenta zvuka dolazi do izražaja ako su one bliskih frekvencija, odnosno ako pripadaju jednom kritičnom opsegu. Kasnije ćemo videti da je značaj kritičnog opsega širi, da je njegova fiziološka osnova sadržana u mehanizmu rada bazilarne membrane, i da se njegov efekat može primetiti kod mnogih pojava u fiziološkoj i psihološkoj akustici.

Zbog nelinearne prenosne karakteristike uva visina tona se u izvesnom iznosu menja sa promenom nivoa zvuka, što potvrđuju muzičari konstatujući promenu visine tona pri promeni intenziteta sviranja pojedinih instrumenata. Noviji eksperimenti pokazuju da sa povećanjem jačine tona

nema promene njegove visine na nižim frekvencijama već samo na višim (iznad 3 kHz) i da ta promena nije veća od 2 % [12].



*Slika 3.16 –
Najmanje
promene visine
tona koje uvo
može da
zapazi [27]*

Čovečjem uvu treba izvesno vreme da bi moglo da odredi visinu tona. Ovo vreme zavisi od frekvencije, tako da je za ton od 100 Hz potrebno vreme oko 40 ms dok je za ton od 1000 Hz potrebno vreme samo 13 ms.

Najmanja promena visine tona koju čoveče uvo može da zapazi zavisi od frekvencije, slika 3.16 [27]. Na frekvencijama ispod 500 Hz ona iznosi samo 1 Hz, dok je na frekvenciji od 4 kHz njena vrednost oko 8 Hz. Na još višim frekvencijama primetna razlika je još veća.

3.3.4 Boja zvuka

Pri slušanju čulo sluha razlikuje ton iste visine ali različite boje. Odmah ćemo reći da je ton proizveden na klaviru ili na violini, potpuno različite boje, iako imaju istu osnovnu frekvenciju. Boja tona je definisana frekvencijama i amplitudama njegovih harmonika. Isti osnovni ton može da ima vrlo različit broj harmonika; od nekoliko (frula, flauta), pa do dvadesetak i više (gudački instrumenti, klavir).

Zahvaljujući boji tona dobija se i zvuk sasvim različit, zavisno od toga koji su instrumenti uključeni u izvođenje neke kompozicije. Boja tona ima, pored ritma i dinamike, u muzici presudnu ulogu pri stvaranju određenog ambijenta i atmosfere. Potpuno drugi zvuk, drugu boju, ima grupa duvačkih instrumenata, od grupe gudačkih, što su kompozitori umeli vešto da iskoriste.

Kod šumova, gde spadaju i bezvučni glasovi, boja zvuka je vezana za obvojnici njihovog kontinualnog spektra. Na osnovu boje uvo upravo razlikuje pojedine šumove, pa i pojedine bezvučne glasove [23].

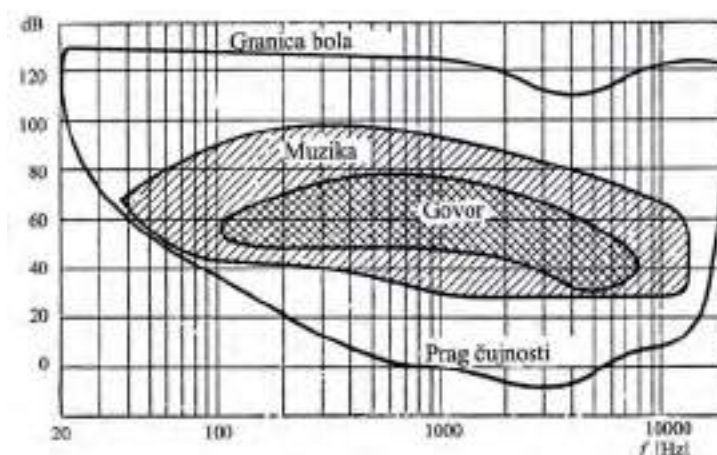
Reflektovani talasi u zatvorenom prostoru dopunjuju boju zvuka i daju mu karakterističan prizvuk (reverberacija i odjek), a doprinose i zvučnom reljefu, tj. osećaju udaljenosti pojedinih izvora [6].

3.3.5 Ostale promene važne za percepciju zvuka

Osnovne karakteristike zvuka (jačina, visina i boja) se menjaju i u vremenu i u prostoru, što predstavlja dopunske informacije za čulo sluha, koje obogaćuju raznovrsnost zvučnih utisaka [6]. Vremenske promene visine tona stvaraju melodiju, a vremenske promene jačine zvuka dinamiku u muzici. Brzina zvuka i difrakcija su elementi na bazi kojih čulo sluha dobija informacije o pravcu dolaska zvučnih talasa. Refleksije i reverberacija u zatvorenom prostoru obogaćuju boju zvuka i doprinose formiranju osećaja udaljenosti izvora zvuka [6].

3.4 Čujno područje uva

Kako smo već rekli u odeljku 1.4 granične frekvencije unutar kojih čovečje čulo sluha oseća promene pritiska kao zvuk iznose 20 Hz i 20 kHz. Čujno područje uva, slika 3.17, je takođe omeđeno graničnim vrednostima nivoa zvuka. Donja granica je prag čujnosti i predstavlja minimalni nivo zvuka koji čovek može da čuje. Ova granica je određena za ravanske talase u otvorenom prostoru. Kako je već rečeno, njena vrednost iznosi 20 μPa na frekvenciji od 1 kHz.



Slika 3.17 – Čujno područje čovečjeg uva sa ucrtanim zonama u kojima se nalaze muzika i govor

Gornju granicu nije lako odrediti jer zavisi od subjektivne osetljivosti ispitivanih osoba, dok je i same eksperimente sa visokim nivoima zvuka veoma komplikovano izvoditi. Tako se može prihvatiti da se gornja granica dostiže pri nivoima zvuka između 120 i 140 dB, zavisno od toga koji osećaj slušaoca se uzima kao kriterijum. Smatra se da zvuk nivoa od 120 dB izaziva osećaj neprijatnosti, od 130 dB jakog pritiska a pri nivoima od oko 140 dB nastaje osećaj bola [6]. U literaturi se gornja granica čujnosti najčešće povezuje sa pojavom bola do koga dolazi zbog relativno velikih pomeraja

pojedinih elemenata u organu sluha. Imajući u vidu prethodno iznesene podatke možemo zaključiti da ukupna skala jačine zvuka koji uvo može prihvatiti iznosi tačno sedam dekada; od $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ (0 dB) do 200 Pa (140 dB). Interesantno je primetiti da je zvučni pritisak na granici bola još uvek oko 500 puta manji od atmosferskog pritiska.

Međutim, ipak gornja granica čujnog područja uva, ako računamo na zvuk prihvatljivog informacionog sadržaja nije veća od 120 dB [20].

Kod starijih osoba gornja granična frekvencija je mnogo niža, dok je prag čujnosti na višim frekvencijama pomeren naviše.

Kako se dalje vidi sa slike 3.17 donja granica čujnog područja uva jako zavisi od frekvencije. Uvo je najosetljivije u opsegu frekvencija između 2 kHz i 5 kHz, dok njegova osetljivost značajno opada na najnižim i najvišim frekvencijama. Gornja granica se manje menja sa frekvencijom. Kako se može videti uvo najslabije podnosi visoke nivoe zvuka skoro u istom opsegu frekvencija u kojem je najosetljivije (gde je najniži prag čujnosti).

Čujno područje prikazano na slici 3.17 je utvrđeno eksperimentalno. I granične frekvencije i granični nivoi predstavljaju srednje statističke vrednosti za mlade i zdrave osobe.

Na slici 3.17 su ucrtane oblasti u kojima se nalaze nivoi i frekvencije signala muzike i govora. Kako se vidi čujno područje uva je mnogo šire, naročito po raspoloživom opsegu nivoa zvuka, nego polja prosečnih signala muzike i govora. To znači da je uvo sposobno da primi i znatno jače i znatno slabije signale od pomenutih. O ovoj činjenici se svakako mora razmišljati kada se projektuju ili koriste uređaji za obradu signala govora i muzike.

U svakodnevnom životu čovek se nalazi u zvučnom polju čiji je nivo zvučnog pritiska vrlo različit. Često su nivoi zvuka takvi da ometaju čoveka pri radu ili odmoru.

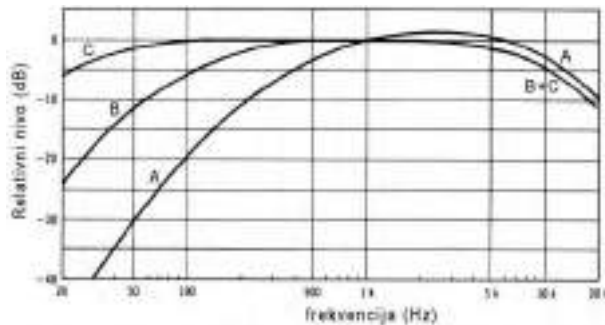
3.5 Merenje subjektivne jačine zvuka

Kao što je prethodno rečeno, za merenje nivoa zvuka uveden je decibel kao logaritamska, objektivna i relativna jedinica koja ne zavisi od frekvencije. Kada je ustanovljeno da osetljivost čula sluha zavisi od frekvencije, učinjeno je više pokušaja da se jednim brojem izrazi nivo zvuka na način koji najviše odgovara onome što ljudsko uvo oseća.

Posle brojnih eksperimenata ustanovljeno je da je ceo postupak „prilagođavanja“ mernog rezultata subjektivnom osećaju čovečjeg uva moguće svesti na primenu odgovarajuće frekvencijske korekcije tokom merenja.

Tako su uvedene i standardizovane različite korekcionne frekvencijske krive, od kojih se tri najčešće sreću. To su krive A, B i C, slika 3.18, koje u osnovi predstavljaju izvrnute ekvifonske linije na 40, 70 i 100

fona, respektivno. Zamisao je bila da se karakteristika A koristi kada su u pitanju nivoi zvuka od 20-55 dB, karakteristika B za nivoe zvuka od 55-85 dB i karakteristika C za nivoe od 85-140 dB. Nivoi zvuka izmereni korišćenjem ovih filtara izražavaju se takođe u dB, ali uz oznaku jedinice piše se i slovo koje pokazuje sa kojom karakteristikom je nivo meren, npr. 55 dBA, 70 dBC itd.



Slika 3.18 – Korekциони filtri ili standardizovane težinske krive (A, B i C)

Na ovaj način objektivni merni rezultat se koriguje na niskim i na visokim frekvencijama, dok na srednjim frekvencijama vrednosti ostaju praktično iste. Evidentno je da će se za složen zvuk, koji ima zastupljene komponente u širokom opsegu frekvencija, dobijati uvek najmanja vrednost u dBA. Samo kada se radi o prostom zvuku od 1000 Hz ili o zvuku uskog frekvencijskog opsega oko 1000 Hz, vrednosti će biti iste.

Danas se u praksi, za merenje nivoa zvuka, a naročito nivoa buke u čovekovom okruženju, bez obzira na iznos merne vrednosti, odomaćila, skoro isključivo, primena korekcije prema krivoj A.

U novijim propisima iz ove oblasti, i mernim uređajima u praksi, uvedena je i korekciona kriva Z, koja je u stvari ravna linija, i odnosi se na slučaj merenja bez korekcije, što je do skoro označavano sa „Flat“ ili „Linear“.

Instrumenti za merenje jačine zvuka koji imaju pomenute korekzione karakteristike često se nazivaju fonometrima iako oni daju izmerenu vrednost u dBA, dBB ili dBC. Izmerena vrednost tačno odgovara vrednosti u fonima samo ako se radi o prostom zvuku koji ima 40, 70 ili 100 fona i pri tom je primenjena odgovarajuća korekcija. Za sve ostale slučajeve prostog zvuka pravi se određena greška, pa je pravilno što se rezultat izražava u dBA, dBB ili dBC, a ne u fonima.

Međutim, kada se radi o složenom zvuku nivo koji se dobija pomoću ovakvog instrumenta značajno je različit od onoga što uvo oseća. S obzirom na stepen razvoja elektronskih komponenti, naročito procesora i algoritama za obradu signala, logično je očekivati skorašnju pojavu komercijalnih fonometara, čiji će merni rezultati biti veoma blizu onom što uvo čuje.

3.6 Maskiranje

Koristan zvuk će se slabije čuti, ili se uopšte neće čuti, u ambijentu u kojem pored njega postoje i drugi neželjeni zvuci ili buka. Pri ovome dolazi do pojave prekrivanja ili maskiranja korisnog zvuka neželjenim zvukom. Zvuk koji želimo da čujemo u ovom slučaju nazivamo *maskirani*, a zvuk koji ometa to slušanje nazivamo *maskirajući*. Uzrok pomenute pojave se nalazi u načinu rada organa sluha. Postojeći maskirajući zvuk aktivira određeni broj osjetljivih slušnih ćelija na bazilarnoj membrani. Ako maskirani zvuk ne aktivira dovoljan broj novih ćelija njegovo prisustvo se neće zapaziti kao da on i ne postoji [6]. Da bi se čuo, maskirani zvuk u ovom slučaju mora biti jači nego kada maskirajućeg zvuka ne bi bilo, što znači da je prisustvo maskirajućeg zvuka podiglo njegov prag čujnosti, slika 3.19.



Slika 3.19 – Maskirajući zvuk podiže nivo praga čujnosti za maskirane zvuke

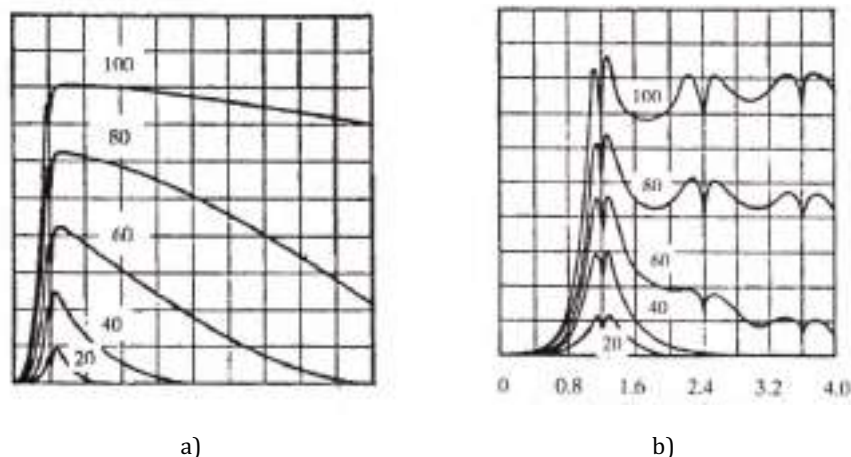
Razlika pragova čujnosti maskiranog zvuka u prisustvu i odsustvu (u tišini) maskirajućeg naziva se *nivo maskiranja*, a novi prag čujnosti maskiranog zvuka zove se *prag maskiranja* [12]. Kada maskirajući i maskirani zvuk deluju na čulo sluha jednovremeno radi se o frekvencijskom maskiranju. Kada se njihovo dejstvo ne odvija jednovremeno imamo vremensko maskiranje.

Ovde ćemo napomenuti da do efekta maskiranja dolazi samo kada se oba signala dovode na isto uvo. Ako se jedan signal dovodi na jedno, a drugi na drugo uvo, do efekta maskiranja može doći u veoma malom iznosu zavisno od toga koliko je preslušavanje između dva uva kroz kosti glave.

3.6.1 Frekvencijsko maskiranje

Efekat frekvencijskog maskiranja zavisi od jačine jednog i drugog zvuka i njihovih frekvencija. Na slici 3.20 su prikazani efekti maskiranja dva tona kada su frekvencije maskirajućeg tona 400 Hz i 1200 Hz [12]. Efekat

maskiranja je najjače izražen kada su dva zvuka bliskih frekvencija, a sve je manji što im se frekvencije više razlikuju. Efekat maskiranja slabi u zonama izbijanja između maskirajućeg i maskiranog tona uključujući i zone izbijanja na poziciji harmonika maskirajućeg tona.



Slika 3.20 – Rezultati maskiranja sinusnog tona različitih frekvencija sa maskirajućim tonom nivoa 20-100 dB kada je frekvencija maskirajućeg tona
a) 400 Hz, b) 1200 Hz [12]

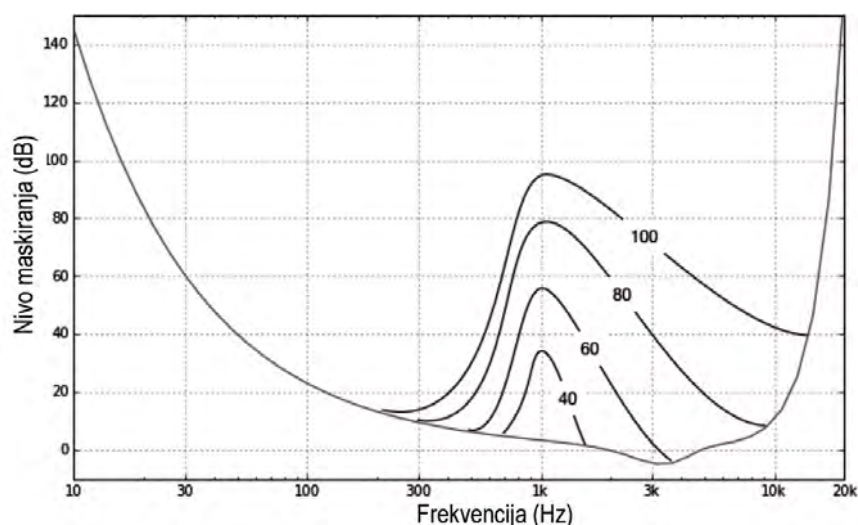
Sa dijagrama na slici 3.20 se dalje može zaključiti da signali niskih frekvencija više maskiraju signale visokih frekvencija nego obratno, što je posledica nesimetrije krivih „selektivnosti“ bazilarne membrane. Takođe se sa slike 3.20 može uočiti da je maskiranje više izraženo što je nivo maskirajućeg tona viši.

Ako se kao maskirajući zvuk koristi uskopojasni šum dobijaju se slične krive maskiranja, s tim što na njima nisu tako izraženi minimumi u zonama gde je dolazilo do izbijanja dva tona, slika 3.21.

Eksperimentima je utvrđeno da nivo maskiranja raste linerano sa porastom nivoa maskirajućeg zuka, tj. za svako povećanje nivoa maskirajućeg signala od 10 dB nivo maskiranja će porasti za približno 10 dB.

U realnim uslovima se najčešće radi o maskiranju koje izaziva složen zvuk ili buka kontinualnog spektra, gde je proces maskiranja složeniji, ali prethodni opšti zaključci izvedeni na bazi rezultata maskiranja prostim zvukom ipak ostaju.

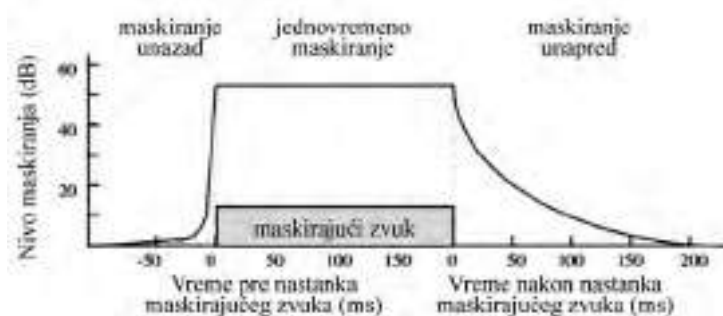
Ako je maskirajući zvuk beli šum (ima konstantnu spektralnu gustinu snage) rezultati ispitivanja pokazuju da efektu maskiranja doprinosi samo deo spektra u neposrednoj blizini maskiranog zvuka. Naime pri nepromenjenom spektralnom nivou šuma centriranog oko frekvencije maskiranog signala, utvrđeno je da se efekat maskiranja povećava sa povećanjem širine opsega, ali samo do jedne granice. Ta granica predstavlja upravo širinu kritičnog opsega na frekvenciji maskiranog signala.



Slika 3.21 – Efekat maskiranja uskopojasnim šumom na 1 kHz, za nivoe maskirajućeg zvuka 40-100 dB

3.6.2 Vremensko maskiranje

Maskiranje takođe može nastati kada maskirani zvuk prednjači ili kasni u odnosu na maskirajući. Pri tome, zavisno od tipa vremenske razlike između prisustva dva zvuka, razlikujemo maskiranje unazad ili pred-maskiranje (kada maskirajući zvuk kasni za maskiranim) i maskiranje unapred ili post-maskiranje (kada maskirajući zvuk prednjači u odnosu na maskirani).



Slika 3.22 – Princip vremenskog maskiranja

Ne ulazeći u detalje ovog dosta složenog procesa ovde ćemo navesti samo neke osnovne činjenice. Odmah možemo istaći da je vremensko maskiranje veće ukoliko su maskirajući i maskirani zvuk bliži jedan drugom, slika 3.22. Rezultati testova pokazuju da vremensko maskiranje ne raste linearno sa porastom nivoa maskirajućeg zvuka. Može se približno uzeti da

je porast nivoa vremenskog maskiranja 3 dB za porast nivoa maskirajućeg zvuka od 10 dB [12].

Kao što se može videti sa slike 3.22 maskiranje unapred je mnogo izraženije nego maskiranje unazad. Njegov uticaj je primetan do oko 100 ms nakon prestanka maskirajućeg tona, dok je ovaj interval za maskiranje unazad znatno kraći. Vremensko maskiranje unapred raste što je trajanje maskirajućeg zvuka duže.

3.7 Lokalizacija izvora zvuka

Čovekova sposobnost da locira izvor zvuka predstavlja komplikovanu kombinaciju različitih procesa. Auditorni sistem za ovu namenu koristi nekoliko podataka koji zavise od pravca dolaska zvučnih talasa. Naše uši se nalaze na međusobnom rastojanju od oko 20 cm pa u opštem slučaju zvuk koji prima jedno uvo dolazi pre od zvuka koji prima drugo uvo, usled čega nastaje vremenska razlika između signala u dva uva koja se naziva *interauralna vremenska razlika*. Takođe, usled uticaja glave, postoji razlika u nivoima zvučnog pritiska na pozicijama dva uva. Ova razlika se naziva *interauralna intenzitetna razlika*.

Pored toga, postoje i razlike u spektralnom sastavu zvuka na ulazu u dva slušna kanala koje su najvećim delom rezultat uticaja oblika ušnih školjki. Sve ove informacije mozak obrađuje i na osnovu rezultata te obrade postajemo svesni pravca dolaska zvučnih talasa.

3.7.1 Lokalizacija izvora u horizontalnoj ravni

Kada čovek isti zvuk prima sa oba uva, iz smera koji sa osom glave zaklapa ugao θ , onda oseća interauralnu vremensku razliku u pobudjivanju jednog i drugog uva. Ova vremenska razlika se, prema slici 3.23a, može predstaviti i odgovarajućom faznom razlikom na sledeći način:

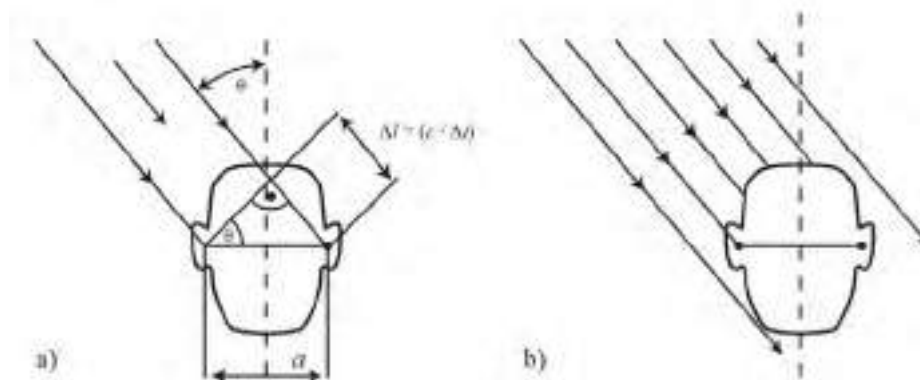
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\Delta t} = 2\pi \frac{\Delta l}{\lambda} = 2\pi \frac{a \sin \theta}{\lambda} \text{ (radijana)} = 360 \frac{a \sin \theta}{\lambda} [^\circ] \quad (3.6)$$

gde je a - rastojanje između ušiju, λ - talasna dužina zvuka i θ - ugao između pravca koji zaklapa položaj izvora sa osom simetrije glave.

Na bazi interauralnih vremenskih razlika pravac dolaska zvučnih talasa moguće je odrediti na nižim frekvencijama ($f \leq 1,5$ kHz).

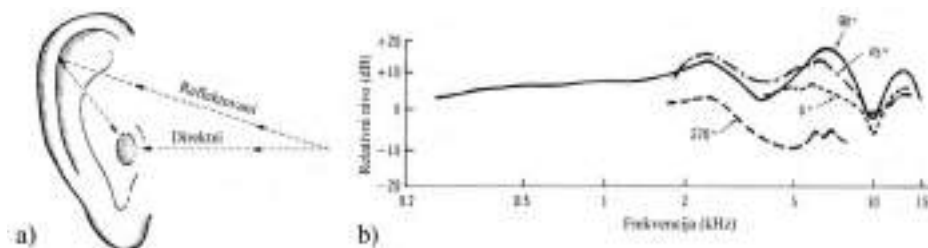
Na višim frekvencijama ($f \geq 2,5$ kHz) gde je veličina ljudske glave uporediva sa talasnom dužinom zvuka ni intenziteti zvuka u oba uva nisu isti jer glava u ovom slučaju predstavlja prepreku za zvučne talase, slika 3.23b. Na strani glave suprotnoj od pravca dolaska zvučnih talasa uvo je u zvučnoj senci i prima slabiji zvuk. Suprotno, na strani glave okrenutoj u pravcu dolaska zvučnih talasa dolazi do povećanja zvučnog pritiska na srednjim i visokim frekvencijama. Na primer na frekvenciji od oko 1000 Hz nivo zvuka

je za oko 8 dB viši u uvu koje je bliže izvoru zvuka, dok je na frekvenciji od oko 10 kHz ova razlika veća od 30 dB. Usled ovakvog uticaja glave nastaju intenzitetne interauralne razlike u dva uva.



Slika 3.23 – Vremenske a) i intenzitetne b) razlike u dva uva kada zvučni talase dolaze pod uglom od θ u odnosu na osu simetrije glave

Iz razlika u intenzitetu i fazi (odnosno vremenu dolaska) zvučnih talasa u dva uva centar za sluh omogućava čoveku da vrlo precizno odredi smer njihovog dolaska. Ova preciznost je nešto umanjena u opsegu frekvencija između 1,5 kHz i 2,5 kHz gde su vremenske razlike manje upotrebljive a intenzitetne nedovoljne.



Slika 3.24 – Superponiranje zvučnih talasa na ulazu u slušni kanal levog uva pri različitim pravcima dolaska zvuka iz horizonralne ravni; a) ušna školjka kao uzrok superpozicije, b) promena spektra primljenog zvuka kao rezultat superpozicije [8]

Mogućnost određivanja smera dolaska zvučnih talasa (odnosno lokalizacije izvora) je oslabljena i na niskim frekvencijama zbog relativno malih razlika u intenzitetu i fazi. Međutim, u praksi retko kada slušamo zvukove koji imaju samo niske frekvencije.

Na višim frekvencijama značajnu ulogu u lokalizaciji zvučnog izvora imaju i ušne školjke. Na slici 3.24a je prikazano kako se direktni zvučni talas i talas reflektovan od neravnina ušne školjke akustički sabiraju na ulazu u slušni kanal. Superponiranje zvučnih talasa, koje pri ovom nastaje, dovodi

do različitih spektralnih karakteristika primljenog zvuka zavisnih od pravca iz kojeg je došao. Na slici 3.24b su prikazane krive koje predstavljaju spektar primljenog zvuka na ulazu u slušni kanal levog uva, kada on dolazi iz pravaca u horizontalnoj ravni, koji sa ravni simetrije glave zahvataju uglove od 0° (dolazi спреда), 45° , 90° (dolazi sa leve strane) i 270° (dolazi sa desne strane).

3.7.2 Lokalizacija izvora u vertikalnoj ravni

Interauralne vremenske i intenzitetne razlike ne postoje kada se izvor zvuka nalazi u medijalnoj odnosno vertikalnoj ravni. Tada dolaze do izražaja samo spektralne razlike signala u dva uva koje unose ušne školjke i na osnovu njih naš sistem za slušanje određuje pravac dolaska zvuka [13].

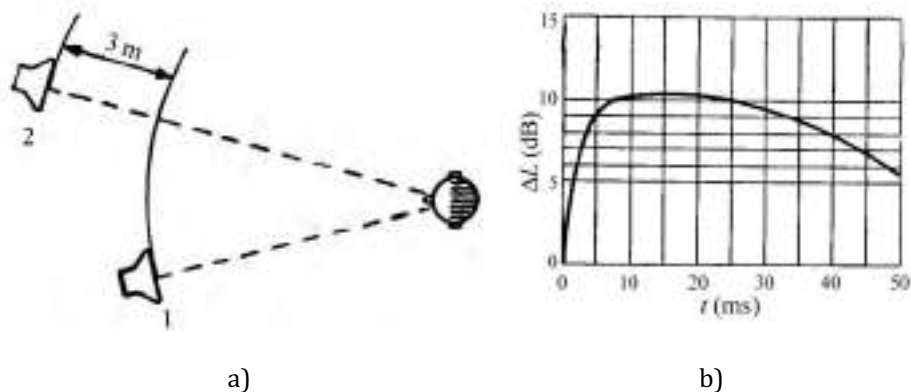
3.8 Efekat prvenstva

U mnogim praktičnim situacijama uvo prima zvuk od više izvora, kao što je slučaj u zatvorenom prostoru, gde do slušaoca pored direktnog zvuka od izvora stižu i refleksije od zidova prostorije. U ovakvim i sličnim situacijama čoveče čulo sluha se „ravna“ prema direktnom, odnosno prema prvom zvuku koji do njega stiže, i za taj zvuk vezuje pravac izvora, odnosno pravac dolaska zvučnih talasa. Ova pojava se naziva u literaturi efekat prvenstva ili Hasov (H. Hass) efekat. Princip delovanja efekta prvenstva objasnimo na primeru sa dva zvučnika, slika 3.25a, koji reprodukuju isti zvuk [7]. Zvučnik 2 je dalje od slušaoca, njegov zvuk stiže kasnije, i slušaocu će izgledati kao da radi samo zvučnik 1. Ako se prekine rad zvučnika 2, slušalac će primetiti promenu intenziteta zvuka, ali ne i promenu mesta zvučnog izvora. Zvučnik 2 može čak biti i jači u izvesnoj meri od zvučnika 1, pa da to još uvek ostane bez efekta. Tek ako intenzitet njegovog zvuka pređe određenu granicu (približno 10 dB), slušalac će osetiti postojanje dva jednako jaka zvučna izvora. Isto tako, tek ako jedan zvuk zaostane za više od približno 50 ms (razlika puteva 17 m), slušalac će čuti dvostruki zvuk, sličan odjeku.

Dakle, naknadno pristigli zvuk može biti i većeg nivoa (čak i do 10 dB), i može doći iz različitog pravca, ali ga uvo neće konstatovati ako je njegovo kašnjenje u granicama između 5 ms i 30 ms, slika 3.25b. Pravac dolaska zvuka biće vezan za pravac dolaska prve komponente.

Uz to, sva zvučna energija koja stigne u okviru prvih 30 ms subjektivno će biti dodata energiji prve pristigle komponente. Drugim rečima, izgledaće nam kao da je prva pristigla zvučna komponenta znatno veće energije nego što je njena sopstvena energija. Uvo se ovde ponaša kao integrator zvučne energije stvarajući utisak glasnijeg odnosno punijeg zvuka. Zona ispod prvih 30 ms se naziva zona fuzije (stapanja) ili zona integracije uva. Ovaj efekat se u praksi široko primenjuje u sistemima

ozvučavanja gde se pojačani zvuk kasni, da bi slušaoci imali utisak da sva zvučna energije stiže od primarnog izvora tj. govornika, pevača, izvođača i sl. Time se postiže poklapanje vidne i zvučne ose (slušalac ima utisak da mu zvuk dolazi od izvora koji vidi) što je prirodan osećaj, iako najveći deo zvučne energije upravo stiže od pomoćnog izvora, tj. zvučnika, koji obično nije na pravcu iz kojeg dolazi primarni zvuk.



Slika 3.25 – Efekat prvenstva: a) međusobni položaj slušaoca i dva zvučnika koji reprodukuju isti zvuk, b) relativni nivo zvuka daljeg i bližeg zvučnika, u funkciji vremena kašnjenja, pri uslovu da su oba zvuka iste glasnosti za slušaoca [7]

3.9 Akustička svojstva govora

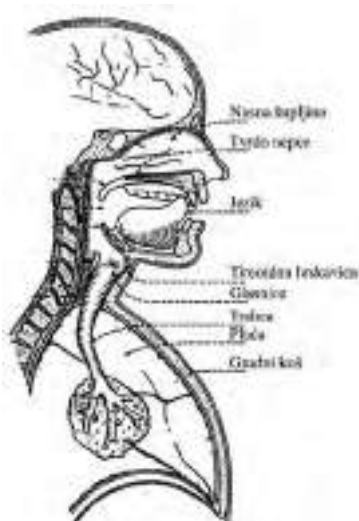
Čovek ima sposobnost da prima zvuk preko čula sluha, ali je istovremeno u stanju i da proizvodi zvuk. Među zvukovima koji okružuju čoveka posebno i veoma značajno mesto zauzima upravo ljudski glas. On je osnovno sredstvo komunikacije među ljudima. Pod glasom se podrazumevaju svi zvukovi proizvedeni u ljudskom glasovnom aparatu (govorni glas, pevani glas, šapat, imitacije prirodnih zvukova itd). Mehanizam koji služi za stvaranje glasova je dosta složen. Pojedini delovi tog mehanizma, učestvuju u obavljanju i drugih funkcija ljudskog organizma, kao što su, na primer, disanje, žvakanje, gutanje, razmena kiseonika itd.

3.9.1 Glasovni sistem

Glasovni sistem ili glasovni mehanizam, slika 3.26, je skup organa u koje spadaju:

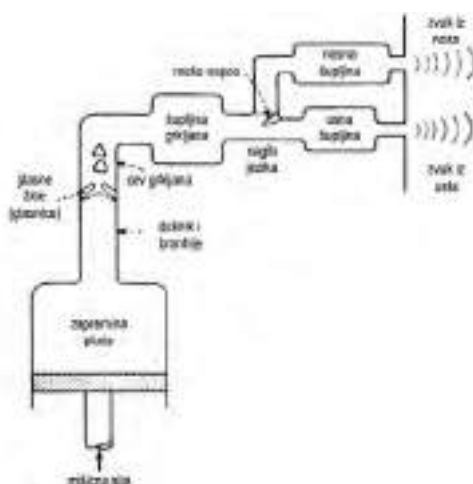
- respiratorni organi (izvor vazduha);
- fonatorni organi (izvor zvuka);
- artikulacioni organi (komplet akustičkih filtara ili rezonatora koji modifikuju zvuk na različite načine).

Respiratorni organi su: pluća, bronhije i dušnik (trahea). Fonatorni organi su grkljan (larinks) sa glasnim žicama (glasnicama), dok su atrikulacioni organi, koji se još nazivaju i vokalni trakt, ždrelo (farinks), usna i nosna šupljina.



Slika 3.26 – Osnovni delovi glasovnog sistema [6]

Glas se stvara u grkljanu pod kontrolom nervnog sistema i povratnih sprega: glas-sluh-centralni nervni sistem. Stvaranje glasa počinje na glasnim žicama čiji rad definišu nervni impulsi. U tom procesu pluća služe kao izvor energije. Prilikom izdisaja, u plućima se stvara nadpritisak usled čega pluća formiraju struju vazduha koja se, kroz bronhije i dušnik preko glasnih žica, uvodi u vokalni trakt, slika 3.27.



Slika 3.27 – Princip nastajanja glasa u čovekovom glasovnom sistemu [23]

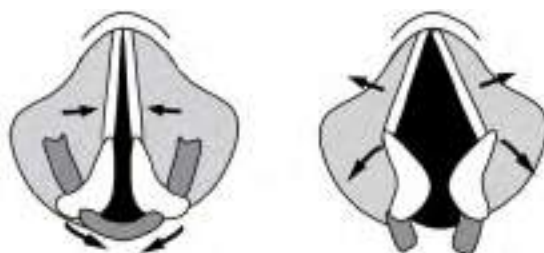
Glasovni sistem generiše zvuke (glasove). Redno povezani glasovi, na bazi lingvističkih pravila, daju govornu informaciju, a akustički signal nastao tom prilikom nazivamo govornim signalom.

S jedne strane glasovi su proizvod rada govornih organa, a sa druge strane oni su fizička pojava – zvuk. Fonetika je nauka koja se bavi izučavanjem glasova sa aspekta anatomije i sa aspekta fizike tj. akustike.

Glasne žice

Osnovu glasovnog sistema čine glasne žice, slika 3.28. One se nalaze sa gornje strane dušnika. To su trakasti mišićno-vezivni organi, veoma pokretljivi po srednjoj liniji grkljana. Dužina im je oko 18mm - 20 mm (žene) do 22mm - 25 mm (muškarci). Glasne žice imaju dvostruku funkciju: biološku (zatvaraju dušnik pri gutanju) i akustičku (stvaraju zvučne talase). Glasne žice regulišu protok vazduha iz pluća sužavanjem ili širenjem otvora u vidu pukotine.

Otvaranjem i zatvaranjem ovog prolaza periodično se prekida struja vazduha iz pluća. Glasne žice se otvaraju pod pritiskom vazduha iz pluća. Nakon toga, zbog pojačanog strujanja vazduha smanjuje se bočni pritisak i glasne žice se zatvaraju.



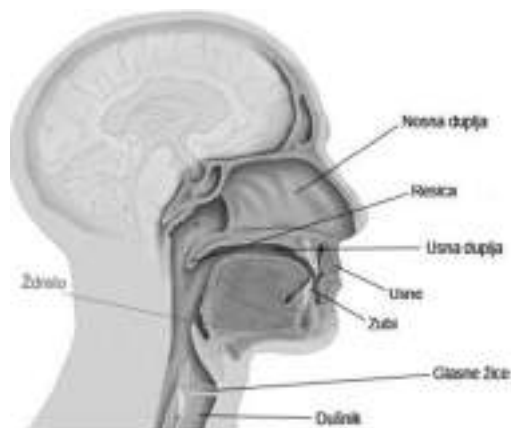
Slika 3.28 – Glasne žice otvaranjem i zatvaranjem prolaza vazdušne struje iz pluća stvaraju zvuk: otvorene (desno), zatvorene (levo).

Prilikom izgovaranja pojedinih glasova glasne žice su zategnute a prilikom izgovaranja drugih opuštenе. Kada su glasne žice zategnute, prolazak vazdušne struje izaziva njihovo treperenje i tako nastaju zvučni glasovi. Sa druge strane, kada su glasne žice opuštenе vazdušna struja prolazi ne izazivajući njihovo treperenje, pri čemu nastaju bezvučni glasovi.

Osnovnu frekvenciju glasa neke osobe određuje ritam prekida vazdušnog protoka koji zavisi od veličine grkljana u kome su smeštene glasne žice. Kako veličinu grkljana određuju pol, uzrast i individualne osobine čoveka, to od istih ovih parametara zavisi i osnovna frekvencija glasa svakog pojedinca. Prosečna vrednost osnovne frekvencije za muški glas je oko 125 Hz, za ženski oko 200 Hz i za dečji oko 300 Hz.

Vokalni trakt

Vokalni trakt, slika 3.29, se u procesu govora ponaša kao zapreminski rezonator. Usna i nosna šupljina (ili duplja) prilikom govora neprestano menjaju oblik i veličinu, što u akustičkom smislu predstavlja promenljivi sistem rezonatora koji oblikuju vazдушnu struju koja iz dušnika prolazi kroz njih.



Slika 3.29 – Delovi vokalnog trakta

Usnu šupljinu čine usta i ždrela. Između njih se nalazi resica. Resica i meko nepce otvaraju i zatvaraju put vazdušnoj struji kroz nosnu šupljinu. U stvaranju glasova učestvuju i usne i jezik. Jezik ima veoma značajnu ulogu zbog svoje velike pokretljivosti. Vokalni trakt kod odraslog muškarca je dug približno 17 cm a poprečni presek mu se menja od 0 do 20 cm², zavisno od položaja pojedinih njegovih delova.

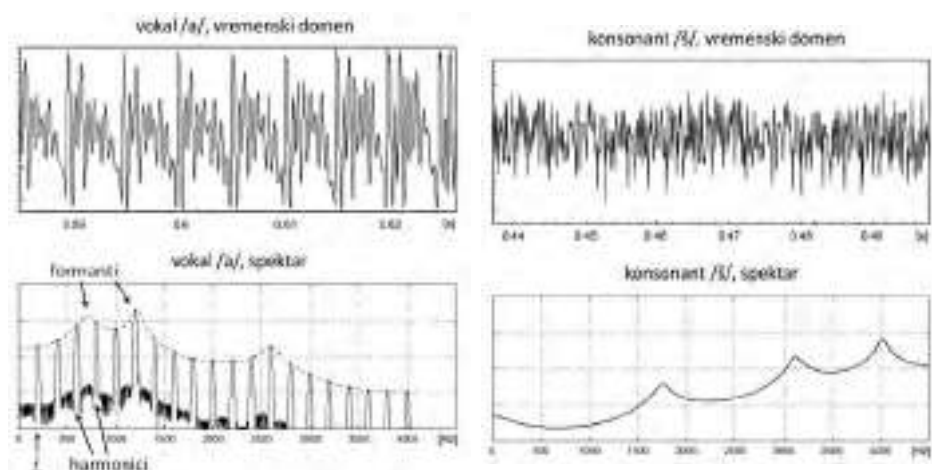
Kao što je prethodno rečeno osnovna frekvencija glasa je određena brojem treptaja glasnih žica u sekundi, dok boja glasa zavisi od veličine i oblika rezonatora u vokalnom traktu. Svaki glas ima posebnu boju jer je oblik rezonatora pri izgovoru svakog glasa drugačiji, što važi i za svakog govornika. Jačina glasa zavisi od veličine pritiska vazduha iz pluća.

Glasovi

Glasovi ili foneme su najmanje jezičke jedinice, od kojih se stvaraju složenije jezičke celine – reči. Znakovi u pisanju kojima se obeležavaju glasovi nazivaju se slova ili grafeme. U srpskom jeziku ima 30 glasova. Svaki glas ima tačno po jedan znak (slovo) koje ga opisuje, što naš pravopis čini fonetskim.

Glasovi se mogu klasifikovati na razne načine. Osnovna podela se zasniva na tipu artikulacije i prema njoj sve glasove delimo na samoglasnike (vokale), suglasnike (konsonante) i glasnike (sonante). Samoglasnika ima ukupno pet (/a/, /e/, /i/, /o/, /u/), suglasnika 17 (/b/, /g/, /d/, /đ/, /ž/,

/z/, /k/, /p/, /s/, /t/, /ć/, /f/, /h/, /c/, /č/, /dž/, /š/) i glasnika 8 (/v/, /m/, /n/, /nj/, /r/, /j/, /l/, /lj/). U literaturi iz oblasti fonetike sreće se i podela po kojoj su glasnici podgrupa suglasnika. Kao što ćemo kasnije videti, kada budemo govorili o akustičkim karakteristikama pojedinih grupa glasova, čini nam se da je navedena podela, na samoglasnike, suglasnike i glasnike, logična.



a) b)
Slika 3.30 – Vremenski oblik i spektar glasova: a) samoglasnika /a/ i
b) suglasnika /š/

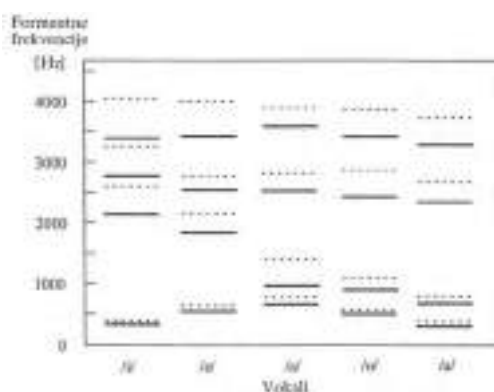
Samoglasnici

Samoglasnici su nosioci sloga u reči. Pri izgovoru samoglasnika vazdušna struja slobodno prolazi, prethodno pokrenuvši zategnute glasne žice, pa se oni smatraju nelokalizovanim glasovima, jer se ne može odrediti mesto njihovog nastajanja pošto se stvaraju duž celog vokalnog trakta. Imaju linijski spektar, slika 3.30a, i boju karakterističnu za konkretan glas. Jasno se razlikuje kad isti glas izgovore različite osobe.

Specifičnosti u boji samoglasnika zavise od oblika i veličine šupljina vokalnog trakta. Mogu se pevati i zvuče kao tonovi. U njihovom spektru se javlja do 5 grupa istaknutih harmonika, slika 3.31a, koje nazivamo formantima i označavamo ih sa F_1 , F_2 , ... Prva tri nose osnovna obeležja samoglasnika, dok su prva dva dovoljna za njihovo prepoznavanje. Samoglasnici nose najveći deo akustičke energije, čak oko 95% ukupne akustičke energije govora.

Suglasnici

Pri formiranju suglasnika glasne žice su otvorene i zvuk nastaje negde dalje u glasovnom sistemu. Tu se stvara prepreka ili tesnac, vazдушna struja nema drugog prolaza već mora da ih savlada, usled čega se generiše šum. Suglasnici imaju kontinuiran spektar, slika 3.30b, kao i druge vrste šuma. Kod svakog suglasnika spektar je drugačiji što im je važna akustička osobina. Ne mogu se pevati pošto vazдушna struja nailazi na prepreke u vokalnom traktu. Suglasnici se razlikuju po načinu i mestu nastanka.



	F ₁ (Hz)	F ₂ (Hz)
/i/	200-400,	2200-3200
/e/	400-700,	1800-2500
/a/	700-1200	
/o/	400-800	
/u/	200-400	

a)

b)

Slika 3.31 – Formantne frekvencije samoglasnika; a) raspored formanta samoglasnika za muški (puna linija) i ženski (tačkasta linija) glas [12], b) frekvencijski opsezi prvog i drugog formanta

Glasnici

Pri stvaranju glasnika vazдушna struja pokreće glasne žice i prolazi neometano, uprkos preprekama koje predstavljaju delovi vokalnog trakta, tj. zaobilazi prepreke. Ova grupa glasova ima osobine i samoglasnika i suglasnika. Glasnici su slični samoglasnicima po tome što glasne žice trepere kada se ovi glasovi izgovaraju, a suglasnicima po tome što za njih može da se utvrdi mesto na kome se formiraju (mesto tvorbe) gde govorni organi stvaraju prepreke. Ipak, te prepreke nisu potpune i zbog toga za glasnike kažemo da su polulokalizovani.

Usled aktivnosti glasnih žica, glasnici takođe imaju formantnu strukturu spektra ali ne tako jasnu kao kod samoglasnika. Viši formanti su slabijeg intenziteta. Glasnici imaju i šumni deo spektra karakterističan za suglasnike. Dakle, uopšteno se može reći da su samoglasnici tonovi, glasnici mešavina šumova i tonova, a suglasnici šumovi.

Glasnik /r/ je posebno interesantan, s obzirom da on može u pojedinim rečima da ima i ulogu samoglasnika, kada se kaže da je slogotvoran.

Podela glasova prema zvučnosti

Kada je treperenje glasnih žica sastavni deo izgovora (artikulacije) glasa, dobija se zvučni glas, a kada su glasne žice opuštene, pa vazduh prolazi između njih ne izazivajući treperenje, dobija se bezvučni glas. Prema prethodno iznesenim detaljima vezanim za nastajanje pojedinih skupina glasova samoglasnike i glasnike ubrajamo u zvučne, jer i jedni i drugi u svome spektru imaju izražene formantne strukture. U grupu zvučnih glasova spada i sedam suglasnika (/b/, /g/, /d/, /đ/, /ž/, /z/, /dž/), tabela 3.2. Njihova zvučnost potiče od jako izraženog dela spektra neposredno iznad osnovne frekvencije.

Tabela 3.2 - Podela glasova prema tipu artikulacije, zvučnosti i šumnosti.

Bešumni	Šumni		
Samoglasnici	Glasnici	Suglasnici	
/i/, /e/, /a/, /o/, /u/	/m/, /n/, /nj/, /r/, /l/, /lj/, /v/, /j/	/b/, /d/, /g/, /z/, /ž/, /š/, /dž/	/p/, /t/, /k/, /s/, /š/, /f/, /h/, /c/, /ć/, /č/
Zvučni			Bezvučni

Podela glasova prema načinu nastanka

Pod načinom nastanka ili izgovora glasova podrazumeva se način na koji vazдушna struja prolazi prilikom njihovog formiranja. Ako vazдушna struja prolazi slobodno, bez prepreka, tada se generiše harmonijski zvučni signal karakterističan za zvučne glasove. Kada na putu vazdušne struje postoje prepreke ili suženja, dolazi do trenja (frikcije) između čestica vazduha i delova vokalnog trakta, koje se manifestuje kao šum koji postoji kod svih suglasnika i glasnika. Nastali šum može biti kontinualan kada se radi o suženjima vokalnog trakta, ili sa prekidima, kada se u vokalnom traktu formiraju potpune prepreke. Zavisno od toga pri kakvom obliku vazdušne struje se formiraju, razlikujemo tri grupe suglasnika (strujne, praskave i slivene) i četiri grupe glasnika (nazali, laterali, vibrant i poluvokal).

Praskavi suglasnici (plozivi) su oni suglasnici kod kojih se pri izgovoru stvara potpuna prepreka vazdušnoj struji, koja se naglo otvara usled čega dolazi do praska. U plozive spadaju /p/, /b/, /t/, /d/, /k/, /g/.

Strujni suglasnici (frikativi) su suglasnici kod kojih je pri izgovoru formira prepreka u vidu tesnaca i glas nastaje neprekidnim strujanjem vazduha kroz njega. U frikative spadaju /f/, /s/, /z/, /š/, /ž/, /v/, /h/.

Sliveni (afrikati) su suglasnici kod kojih se pri izgovoru takođe stvara potpuna prepreka, ali se ona ne otklanja naglo već postepeno, prelazeći u tesnac. Tako pri njihovom izgovoru imamo kombinaciju oslabljenog praska i strujanja. U slivene suglasnike ubrajamo: /c/, /ć/, /đ/, /č/, /dž/. Ovi

glasovi su sliveni od elemenata dva glasa, praskavog i strujnog. Tako se /c/ sastoji od elemenata glasova /t/ i /s/, /č/ od elemenata glasova /t/ i /š/, itd.

Nosni (nazali) su glasnici /m/, /n/ i /nj/. Prilikom njihovog nastanka pojavljuje se prepreka u usnoj duplji, a otvoren je prolaz vazduha kroz nosnu duplju. Kod njih zato imamo kombinaciju sva tri oblika vazdušne struje (slobodna, frikiona sa prekidom i frikciona kontinualna).

Laterali (/l/, /lj/) nastaju tako što vazdušna struja zaobilazi prepreku u usnoj duplji, prolazeći sa jedne ili obe strane jezika, tako da se i kod njih formiraju sva tri oblika strujanja.

Vibrant /r/ nastaje tako što vrh jezika stvara prepreku priljublivanjem uz nepce ali je otvara vazdušna struja vrlo brzim i kratkim odbacivanjem jezika. Vrh jezika se ponovo vraća u početni položaj i tako dolazi do treperenja (vibriranja) 2 do 4 puta u sekundi. Pri prekidima vazdušne struje dolazi do frikcije a između prekida protok struje je slobodan kada se generiše harmonijski oblik zvučnog signala.

Glasnik /j/ ima četiri poluformanta i akustičku strukturu veoma sličnu samoglasniku /i/. Zavisno od njegovog položaja u reči nekad se čuje šumna komponenta a nekad skoro iščezava, tako da se on obično naziva polusamoglasnikom.

Podela glasova prema mestu nastanka

Za suglasnike i glasnike se smatra da nastaju tamo gde se pri njihovom izgovoru formira prepreka duž vokalnog trakta, tako da prema mestu nastanka razlikujemo sledeće grupe:

- usni (bilabialni),
- zubni (dentalni),
- usno-zubni (labialno-dentalni),
- zazubni (postdentalni),
- alveolarni,
- nepčani (palatalni),
- mekonepčani (velarni).

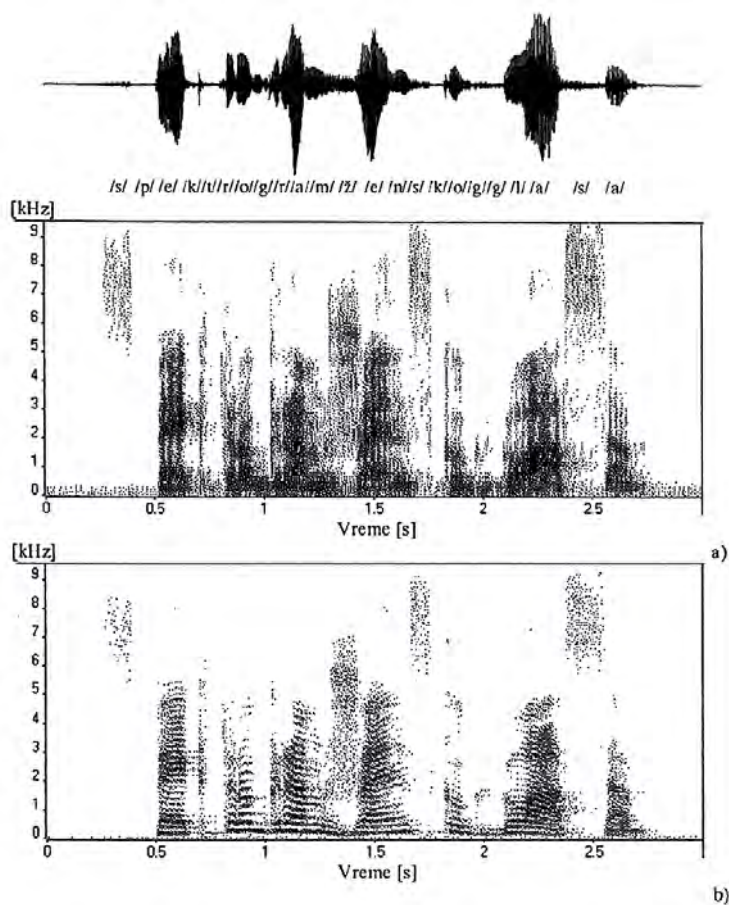
U tabeli 3.3 je pregledno prikazana podela suglasnika i glasnika prema mestu i prema načinu izgovora.

Tabela 3.3 – Pripadnost suglasnika i glasnika prema mestu i načinu nastanka

Mesto Način	Usni	Zubni	Usno- zubni	Zazubni	Alveo- larni	Nepčani	Meko- nepčani
Plozivi	/b/, /p/	/d/, /t/					/g/, /k/
Afrikati		/c/		/đ/, /ć/	/č/, /dž/		
Frikativi		/z/, /s/	/v/, /f/		/ž/, /š/		/h/
Nazali	/m/	/n/				/nj/	
Laterali		/l/				/lj/	
Vibrant					/r/		
Poluvokal						/j/	

Spektrogram

Spektrogram predstavlja trodimenzionalnu vizuelizaciju analiziranog signala, gde su na jednom dijagramu prikazane tri veličine: vreme (horizontalna osa), frekvencija (vertikalna osa), i amplituda (stepen zatamnjenja ili boja). Spektrogram se koristi za analizu promenljivih signala u različitim oblastima tehnike, pa je pogodan i za analizu akustičkih signala koji nastaju izgovaranjem glasova, reči ili čitavih rečenica. Spektrogrami mogu iskusnim stručnjacima pružiti značajne informacije u identifikaciji nepoznatog govornika, mogu biti od pomoći hendikepiranim osobama u razumevanju govora, ili u oblasti istraživanja na polju akustičke fonetike [12].



Slika 3.32 – Spektrogram rečenice: „Spektrogram ženskog glasa“, a) širokopojasni i b) uskopolasni [12]

Zavisno od širine opsega filtra za analizu razlikujemo uskopojasni (45 Hz) i širokopojasni (300 Hz) spektrogram. Kod uskopojasnog spektrograma moguće je jasno uočiti osnovnu frekvenciju govora (pošto je ona veća od 45 Hz) i njene harmonike kao horizontalne talasaste pruge. Širokopojasni spektrogram nema izraženu harmonijsku strukturu (osnovna frekvencija govora je uglavnom manja od 300 Hz), ali su dobro vidljivi regioni formanta (zatamnjenja).

Na slici 3.32 je prikazan spektrogram rečenice „Spektrogram ženskog glasa“ odakle se mogu videti osnovne akustičke karakteristike pojedinih glasova. Primetno je da frikativ /s/ na sve tri pozicije u rečenici ima izrazito šumnu strukturu u višem delu spektra (6 kHz do 9 kHz). Šum koji generiše frikativ /ž/ je u nižem delu spektra (2 kHz do 7 kHz), a jasno se mogu uočiti periodi tišine koji odgovaraju okluziji ploziva /p/, /t/ i /k/. Takođe je uočljiv položaj formanta samoglasnika /e/ i /a/ itd. [12].

3.9.2 Razumljivost govora

Kada se radi o govoru potrebno je za uspešnu komunikaciju ostvariti odgovarajuću razumljivost, kako bi kombinacije glasova u slogovima i rečima bile prepoznatljive. Problem razumljivosti govora je važan u prostornoj akustici (pozorišta, konferencijske sale, učionice), kao i u komunikacionim sistemima najrazličitije vrste (radiodifuzija, telefonija i drugo).

Razumljivost govora se meri dosta egzaktno postupkom koji je razrađen i standardizovan. Osnova ovog postupka je u sledećem. Formiraju se, za svaki jezik, jednosložne reči bez smisla koje se nazivaju *logatomi*. Moraju biti bez smisla, kako smisao ne bi uticao i poboljšavao razumljivost. Logatomi su najčešće sastavljeni od četiri glasa i to u kombinaciji: suglasnik-samoglasnik i još jednom suglasnik-samoglasnik. Na primer: JAŽO, MIFO, RANJU, SIBA, TIKE i slično.

Pri sastavljanju logatoma vodi se računa o tome da zastupljenost pojedinih glasova odgovara pojavljivanju glasova u govoru, te se na taj način formiraju tzv. fonetski balansirane liste logatoma.

Za merenje razumljivosti sastavljaju se liste od po 100 logatoma koji se čitaju ili emituju sa uređaja za reprodukciju slušaocima. Svaki slušalac beleži ono što je čuo i na taj način se dođe do podataka koliko je logatoma ispravno primljeno. Razumljivost R (u procentima) se određuje kao odnos tačno primljenih logatoma prema ukupnom broju pročitanih ili emitovanih:

$$R (\%) = 100 \cdot (\text{broj tačnih logatoma} / \text{broj logatoma}) \quad (3.7)$$

Ovakvo subjektivno merenje daje vrlo dobre rezultate, s tim što se u praksi smatra da će razumljivost rečenice, koja ima smisao, biti potpuna ukoliko izračunata vrednost R bude preko 75 %. Što je procenat tačno

primljenih logatoma veći to je i razumljivost bolja. U pozorištima i slušaonicama se teži da razumljivost logatoma bude preko 90 %, jer će tada, i pored eventualnih manjih smetnji (šumovi u sali i sl.), slušaoci bez problema i naprezanja moći da prate izgovoreni tekst.

Na razumljivost govora utiču brojni faktori. Nabrojaćemo najvažnije:

- širina frekvencijskog opsega (pri prenosu kroz neki komunikacioni sistem),
- izobličenja u prenosnom sistemu,
- nivo govora,
- šumovi (buka),
- vreme reverberacije prostorije,
- odnos direktnog i reflektovanog zvuka u prostoriji.

Svaki od ovih faktora može da smanji razumljivost na vrednost R ispod 75 %, što će salu ili prenosni sistem činiti nekvalitetnim. Vreme reverberacije, na primer, što je veće to je razumljivost manja. Zato je i uveden pojam optimalnog vremena reverberacije, koje za prostore za govor predstavlja vrednost preko koje se ne sme ići, jer će uslovi za dobru razumljivost biti poremećeni.

Danas se pri projektovanju prostorija i prenosnih sistema razumljivosti govora, s razlogom, poklanja velika pažnja. Koriste se međunarodni standardi koji propisuju uslove za odgovarajuću razumljivost govora.

3.10 Pitanja za proveru znanja

1. Šta se proučava u fiziološkoj akustici?
2. Skicirati čulo sluha i njegove osnovne delove. Objasniti funkciju pojedinih delova ovog čovekovog organa.
3. O čemu govori Veber - Fehnerov zakon? Kako su uvedeni decibeli?
4. Šta je subjektivna visina tona? U kojim se ona jedinicama izražava?
5. Šta je boja zvuka?
6. Čime je određeno čujno područje uva? Skicirati ovo područje.
7. Šta su izofonske linije? Kako su dobijene? Skicirati ih.
8. Kako su definisani foni, a kako soni? Na koji način se određuje subjektivna jačina složenog zvuka u fonima?
9. Šta su decibeli 'A'?
10. Od kojih delova se sastoji vokalni trakt?
11. Navesti osnovne akustičke osobine samoglasnika, suglasnika i glasnika.
12. Šta je razumljivost govora? Kako se ona meri? Od čega zavisi?

3.11 Literatura

- [1] H. Fletcher, W. A. Munson, "Loudness, its definition, measurement and calculation," *J. Acoust. Soc. Am.* 5, 82-108, 1933.
- [2] D. W. Robinson, R. S. Dadson, "A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones," *Br. J. Appl. Phys.* 7, 166-181, 1956.
- [3] J. Roederer, *The Physics and Psychophysics of Music*, Springer Verlag, 1975.
- [4] M. Simonović, *Audiologija I*, Savremena administracija, Beograd, 1977.
- [5] T. Jelaković, *Zvuk, sluh, arhitektonska akustika*, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- [6] H.Š. Kurtović, *Osnovi tehničke akustike*, Naučna knjiga, Beograd, 1982.
- [7] H. Š. Kurtović, *Ozvučavanje*, Naučna knjiga, Beograd, 1983.
- [8] G. Bellou, Ed., *Handbook for Sound Engineers*, Howard W.Sams &Co. 1988.
- [9] Ž. Stanojčić, Lj. Popović, *Gramatika srpskoga jezika, udžbenik za srednje škole*, peto izdanje, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1997.
- [10] *Basic Concepts of Sound*, Brüel & Kjær Sound and Vibration Measurement A/S, 1998.
- [11] I. Klajn, *Gramatika srpskog jezika*, zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1999.
- [12] S.T. Jovičić, *Govorna komunikacija, fiziologija, psihoakustika i percepcija*, Nauka, Beograd 1999.
- [13] J. Blauert, *Spatial Hearing*, The MIT Press, London, 2001.
- [14] M. Bosi, R.E. Goldberg, *Introduction to Digital Audio Coding and Standards*, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [15] ISO 226:2003, *Acoustics - Normal equal-loudness-level contours*, Geneva 2003.
- [16] ANSI S 3.4, *Procedure for the computation of loudness of steady sounds*, Melville, NY, USA, 2007.
- [17] P. Pravica, D. Drinčić, *Elektroakustika*, VIŠER, Beograd, 2008.
- [18] F.A Everest, K.C. Pohlmann, *Master Handbook of Acoustics*, Fifth Ed., Mc. Graw Hill, 2009.
- [19] DIN 45631/A1: Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche – Amendment 1: Calculation of the loudness of time-variant sound, Berlin, Germany, 2010.
- [20] M. Mijić, *Audio sistemi*, Akademska misao, 2011.
- [21] M. Florentine, A. N. Popper, R. R. Fay, editors, *Loudness*, Springer, 2011.
- [22] EBU – Recommendation R 128, *Loudness normalisation and permitted maximum level of audio signals*, Geneva, 2011.

- [23] V. Delić, Fiziološka akustika, prezentacija, FTN Novi Sad, 2013, <http://vtsns.edu.rs/wp-content/uploads/2013/12/MM2-2-Fiziolo%C5%A1ka-akustika.pdf>, preuzeto: mart 2013.
- [24] S. Sovilj-Nikić, *Razvoj matematičkog modela trajanja glasova u automatskoj sintezi govora na srpskom jeziku*, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 2014.
- [25] C.J Struck, *Psychoacoustics and Hearing*, CJS Labs, San Francisco, 2014.
- [26] M. Sečujski, N. Jakovljević, „Pdt5- Digitalna obrada govora u mobilnoj telefoniji“, <http://ktios.net/moodle/mod/resource/view.php?id=952>, preuzeto: februar 2017.
- [27] K. Forinash, *An Interactive eBook on the Physics of Sound*, School of Natural Sciences Indiana University Southeast, New Albany, https://soundphysics.ius.edu/?page_id=914 preuzeto: sept. 2017.

Buka

4.1 Uvod

Buka je, naročito poslednjih decenija, jedan od osnovnih uzroka ometanja mnogih aktivnosti i kompleksnog oštećenja zdravlja čoveka, ponajviše u industrijski razvijenim zemljama. Sve veća prerada dobara, sve brojnije i brže saobraćajne veze i sve veća primena pomoćnih uređaja u komunalnoj sredini, omogućavaju udobniji način života, ali istovremeno dovode i do svoje negacije, ometanja čovekovih aktivnosti i ugrožavanja njegovog zdravlja. Borba protiv buke i njenog štetnog dejstva deo su napora koji se čine na poboljšanju uslova života i zaštite životne i radne sredine. U tom cilju preduzimaju se mnoge ekonomski opravdane mere kojima bi se ometajuće dejstvo buke smanjilo i rizik oštećenja čovekovog zdravlja sveo na prihvatljivu meru.

Buka predstavlja neprijatan, nepoželjan ili ometajući zvuk u okruženju. To znači da svaka zvučna pojava (larma, šum, galama, lupa, govor, i sl.) koja ometa rad ili odmor - predstavlja buku. Da bismo neki zvuk smatrali bukom on mora da bude dovoljno jak, da ga izdvajamo od ostalih zvukova i dobro čujemo. Međutim, pod određenim uslovima, i relativno tihi zvuci mogu da predstavljaju buku (razgovor ili čak šapat gledalaca tokom predstave u pozorišnoj sali).

Ovde je značajno da se uvodi kategorija neželjenog zvuka da bi se merila njegova štetnost, što dalje znači da je samo neki zvuk buka. Status zvuka koji dobija oznaku buke ne zavisi od apsolutne vrednosti njegovog nivoa, nego od činjenice da li on nekog ometa. Relativno tiha muzika koja dolazi iz susedne prostorije, može se smatrati bukom. Iz istih razloga ne može se reći da je buka zvuk enormno visokog nivoa kakav se može čuti u diskotekama ili na rok koncertima. Šta više, publika plaća da bi ga slušala.

Pored štetnog dejstva na zdravlje čoveka buka posredno utiče i na rezultate rada. Efikasnost proizvodnje i kvalitet rada direktno zavise od buke. Buka deluje na čoveka i kada se odmara, što se odražava na redovne aktivnosti.

Buku kao nepoželjan zvuk je potrebno potisnuti u cilju smanjenja ugroženosti ljudi izloženih njenom dejstvu. Ovo važi bez obzira da li se radi o objektivno visokim intenzitetima buke, koji direktno mogu uticati na

fizičko zdravlje pojedinaca, ili o buci kao ometajućem faktoru koji ugrožava kvalitet života, komunikaciju, produktivnost na radnom mestu, i slično.

Prvi deo ovoga poglavlja bavi se definisanjem različitih tipova buke i opisom njenih izvora. Zatim su definisani deskriptori buke i načini njihovog merenja.

U drugom delu poglavlja govori se o štetnim dejstvima buke na čoveka i definišu objektivni kriterijumi za procenu ovih dejstava. Na kraju su objašnjeni načini širenja buke i načini odbrane od njenog štetnog delovanja.

4.2 Podela buke

Prema poreklu buku možemo podeliti na buku prirodnih izvora (šum vode, cvrkut ptica, grmljavina, zavijanje vetra, buka vodopada, vulkana i seizmičkih pojava i sl.) i buku svega onoga što je čovek stvorio (buka saobraćaja, industrijskih postrojenja, kućnih aparata, ventilacije, eksplozija, glasne muzike itd.). Međutim, buka prirodnih izvora nije uzrok oštećenja zdravlja većih populacija, niti je za urbanu sredinu, na koju uglavnom mislimo kada govorimo o buci, ova vrsta buke značajna.

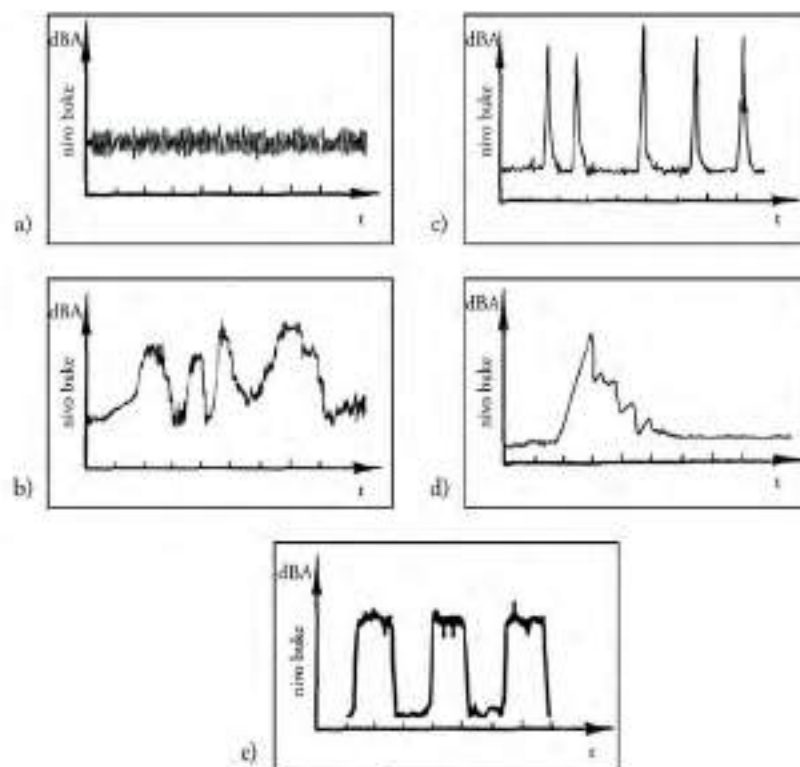
Kada se govori o buci u urbanoj sredini (svuda gde čovek živi i radi; stambene prostorije i radno okruženje, kao i spoljašnji prostori, poput ulica, trgova i zelenih površina) delimo je prema mestu u kojem deluje, pa razlikujemo buku u radnoj sredini i buku u životnoj sredini (koja se često naziva i komunalna buka).

Pod bukom u radnoj sredini podrazumeva se svaki zvuk stvoren radom mašine, aparata ili uređaja u proizvodnji. Tu razlikujemo buku oruđa na radnom mestu, buku oruđa sa drugih radnih mesta i buku neproizvodnih izvora (uređaji za ventilaciju i klimatizaciju, drugi pogoni, saobraćaj i sl.).

Buka u životnoj sredini predstavlja svaki zvuk koji se javlja van radnog mesta (u stanovima, na ulici u vozilima, na mestima za rekreaciju, u školama, bolnicama itd.). Očigledno je da se ovde radi o veoma različitim vrstama buke, kao što su: saobraćajna buka, industrijska buka, ulična buka raznog porekla (građevinske mašine, ozvučenja u baštama restorana, istovar i utovar raznih predmeta i sl.), buka u domaćinstvima (od kućnih uređaja i instalacija, iz susednih stanova itd.).

Prema trajanju buku delimo na kontinualnu (trajnu) buku, diskontinualnu buku (sa prekidima) i pojedinačne zvukove ili šumove.

Zavisno od toga kako se menja jačina buke u vremenu razlikujemo: buku stalne jačine (nepromenljiva, ujednačena) i promenljivu buku, slika 4.1. Promenljiva buka može biti kontinualno promenljiva, isprekidana, impulsna, i izolovani impulsi buke.

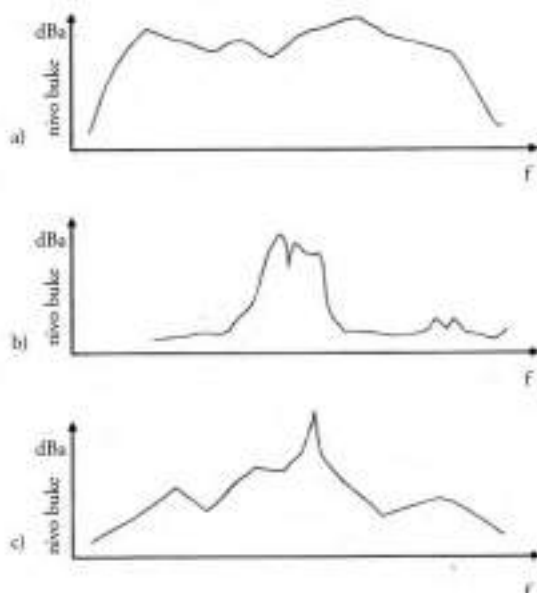


*Slika 4.1 – Različite vrste buke prema načinu njenog menjanja u vremenu:
a) buka stalne jačine, b) promenljiva kontinualna buka, c) impulsna buka,
d) izolovani impuls buke e) isprekidana buka.*

Stepen ometanja bukom veoma zavisi od toga kako se menja njen nivo u vremenu. Subjektivno najmanje ometa buka stalne jačine, dok buka promenljive jačine i impulsna buka imaju veći štetan uticaj na čoveka. Zbog toga se pri merenju i valorizaciji štetnosti uvode posebni postupci kako bi uticaj buke mogao biti ispravno ocenjen.

Prema vrsti spektra, slika 4.2, razlikujemo: širokopojasnu buku (ima komponente u širokom opsegu frekvencija), uskopojasnu buku (u čijem spektru dominiraju komponente u užem opsegu frekvencija - recimo opsegu jedne oktave), tonalnu buku (sadrži jedan ili više istaknutih tonova) i buku sa karakterističnom akustičkom informacijom (sadrži muziku ili glas).

Kada je reč o spektru buke veoma je važno znati koje frekvencije su najzastupljenije. Naime, nije svejedno da li neka buka ima izražene visoke, srednje ili niske frekvencije. Ukupni nivo buke može biti isti ali su uvek štetnije visoke frekvencije, o čemu treba voditi računa kada se u praksi procenjuje njen uticaj.



Slika 4.2 – Podela buke prema obliku njenog spektra:
a) širokopojasna buka,
b) uskopojasna buka,
c) tonalna buka

4.3 Izvori buke

Buka u određenom prostoru može biti izazvana izvorima izvan tog prostora (spoljašnja) ili izvorima koji se nalaze u samom prostoru (unutrašnja). Zavisno od sredine u kojoj je generisana, buka može biti vazдушna i strukturna (nastala u čvrstim materijalima).

Tabela 4.1 – Važniji izvori vazdušne i strukturne buke u zgradama i spoljašnjoj sredini

	Vazдушna buka	Strukturna buka
Spoljašnja buka	drumski saobraćaj, vazdušni saobraćaj, železnički saobraćaj, industrijska buka	šinski saobraćaj, industrijska buka
Unutrašnja buka	glasen govor i vika, muzika, uređaji u domaćinstvu, kućni ljubimci	koraci, pomeranje nameštaja, lupa vratima, mašinska postrojenja, liftovi

U tabeli 4.1 navedeni su neki važniji izvori vazdušne i strukturne buke u zgradama i spoljašnjoj sredini. Koji od njih će biti dominantan zavisi od različitih okolnosti, kao na primer urbanizovanosti i naseljenosti lokacije,

blizine saobraćajnih čvorišta, većih saobraćajnica, pruga, aerodroma ili industrijskih postrojenja i slično, ali i intenziteta buke generisane u susednim domaćinstvima i zgradama.

Pored nabrojanih izvora i čovek je u mnogim slučajevima značajan uzročnik nastale buke. Recimo i najmanji pokreti, kašalj, šaputanje i sl. su radnje koje u pozorišnoj ili koncertnoj dvorani mogu svojim zvukom maskirati najtiše deonice neke predstave ili koncerta. Svakodnevne čovekove aktivnosti koje prati govor, pevanje ili vika, ili korišćenje različitih elektroakustičkih uređaja, mogu biti značajna smetnja drugim ljudima u njegovoj okolini. Čovek je takođe uzročnik izuzetno visokih nivoa buke koji se stvaraju u prostorima za zabavu (disko klubovi, kafići, kafane, splavovi) čije delovanje ometa ili ugrožava značajan broj ljudi u njihovom bližem i daljem okruženju.

4.4 Deskriptori buke

Nivo buke i ekvivalentni nivo buke

Osnovni podatak o buci do kojeg se najlakše dolazi je ukupni nivo buke L koji se određuje na osnovu zvučnog pritiska, kao što se određuje i nivo kod bilo kog drugog zvuka, jednačina (1.12). Za numeričko izražavanje nivoa buke, kao i za zvuk uopšte, koriste se decibeli (dB).

Međutim, u najvećem broju slučajeva, nivo buke se menja u vremenu, pa se umesto njega koristi pogodnija, vremenski ponderisana veličina, koja se naziva *ekvivalentni nivo buke* ili što je isto ekvivalentni nivo zvuka L_{eq} . Ekvivalentni nivo buke L_{eq} je onaj obračunati konstantni (prosečni) nivo buke, slika 4.3, koji u određenom vremenskom intervalu ima istu zvučnu energiju kao posmatrana, vremenski promenljiva buka.

Takođe, ekvivalentni nivo buke predstavlja nivo buke koji bi svojim dejstvom na čoveka izazvao iste efekte kao i njegov ekvivalent – vremenski promenljiva buka.

Najopštija definicija ekvivalentnog nivoa zvuka, data je izrazom:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \quad (4.1)$$

gde je: $t_2 - t_1$ – vremenski interval u kojem se obračunava L_{eq} , $p(t)$ – trenutna vrednost zvučnog pritiska i p_0 - referentni zvučni pritisak.

Ekvivalentni nivo buke se u praksi može izračunati na nekoliko načina. Najjednostavnije je ako posedujemo integracioni merač nivoa zvuka, koji na bazi definicije date jednačinom (4.1) izračunava traženu vrednost.

Drugi način je *metodom uzorkovanja*, na osnovu diskretnih vrednosti dobijenih uzorkovanjem promenljivog nivoa buke definisanom brzinom. U ovom slučaju L_{eq} se dobija iz izraza:

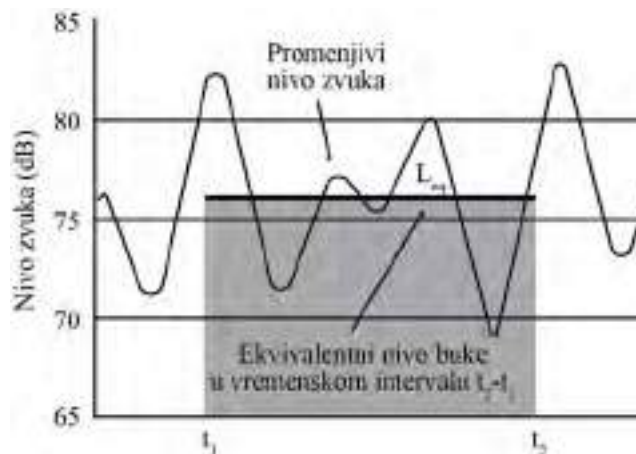
$$L_{eq} = 10 \log \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (10^{L_i/10}) , \quad (4.2)$$

gde je n - broj slučajnih uzoraka i L_i - vrednost nivoa zvuka i -tog uzorka.

Treći način je *metodom klasiranja*, pri čemu je dinamički opseg nivoa promenljive buke potrebno podeliti na n jednakih klasa, definisane širine, pa potom odrediti procenat vremena merenja t_i u kome je nivo zvuka u granicama i -te klase ($i = 1, \dots, n$). Ovaj način omogućava računsko određivanje ekvivalentnog nivoa buke, ukoliko se raspolaže rezultatima statističke analize promenljive buke u vremenskom domenu. U tu svrhu koristi se relacija:

$$L_{eq} = 10 \log \sum_{i=1}^n \frac{1}{100} (t_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_i}) , \quad (4.3)$$

gde je t_i procenat vremena merenja u kome se nivo zvuka nalazi u granicama i -te klase, L_i - srednja vrednost nivoa zvuka i -te klase.



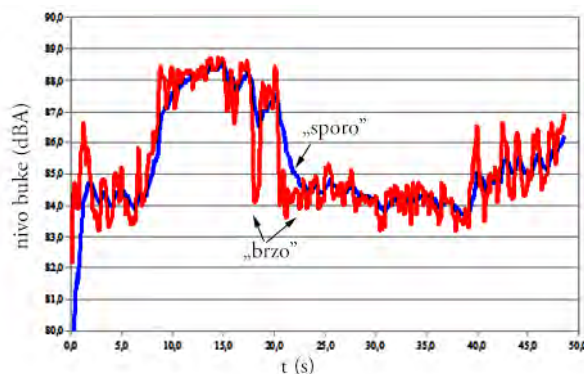
Slika 4.3 – Ekvivalentni nivo buke L_{eq}

Vremenska ponderacija podrazumeva merenje ekvivalentnog nivoa buke u određenim vremenskim intervalima, to jest vremenskim „prozorima“. Najčešće je to 1 s, kada ponderaciju označavamo kao „sporo“ (*slow*), ili 125 ms, kao „brzo“ (*fast*), slika 4.4. Za detekciju vršnih vrednosti buke koriste se i kraći vremenski intervali, kao što je „peak“ (35 ms).

Da bi se fluktuacije nivoa buke tokom dužeg vremenskog perioda usrednjile, za određivanje ekvivalentnog nivoa buke koriste se i daleko duži vremenski intervali: od 15 minuta do delova dana (dan, večer, noć i slično), celog dnevnog ciklusa od 24 h, pa čak i čitave godine.

Frekvencijska ponderacija nivoa buke vrši se zbog prilagođavanja dobijenih vrednosti ekvivalentnog nivoa zvučnog pritiska subjektivnom

utisku jačine zvuka. Iako je rad čula sluha u svakom pogledu veoma složen, za praktične potrebe ta ponderacija se svodi na jednostavnu frekventijsku korekciju koja je po svojoj prirodi bliska frekventijskoj karakteristici slušanja. Kako je već rečeno u poglavlju 3, korekcija se izvodi pomoću filtara čije amplitudske karaktersitke približno oponašaju izvrnute ekvifonske linije od 40 fona, 70 fona i 100 fona. Ti filtri se konvencijom nazivaju "A", "B" i "C", filtri, respektivno, slika 3.18, pa se tako dobijeni podaci o nivou zvuka izražavaju u jedinicama koje se nazivaju dBA (čita se "decibeli a"), dBB i dBC. Ipak, odomaćeno je u akustici da se nivo buke najčešće izražava u dBA. U slučajevima buke visokih intenziteta koristi se C-ponderacija kao bolji reprezent subjektivnog doživljaja takvog zvuka. Retko kada se koristi B ponderacija.



Slika 4.4 – Primer uticaja „spore” i „brze” ponderacije kod merenja buke

Frekventijski ponderisani ekvivalentni nivo buke se može takođe izračunati prema izrazima (4.1) – (4.3), samo što umesto vrednosti trenutnog zvučnog pritiska p i nivoa zvuka L_i moramo uzeti frekventijski ponderisane vrednosti (p_{Ai} i L_{Ai}). Drugim rečima, moramo uzeti vrednosti nakon prolaska originalnog signala kroz odgovarajući filter. Koje ponderacije su primenjene u konkretnom slučaju, naznačava se u indeksu oznake za datu veličinu odgovarajućim slovima. Na primer, oznake $p_A(t)$ i L_A predstavljaju A frekventijski ponderisanu trenutnu vrednost zvučnog pritiska i nivoa zvuka, respektivno. Vremenska ponderacija *fast* se označava slovom F, dok se za ponderaciju *slow* koristi slovo S. Tako se formiraju oznake kao što je L_{AF} , koja označava da je korišćena A frekventijska i *fast* vremenska ponderacija.

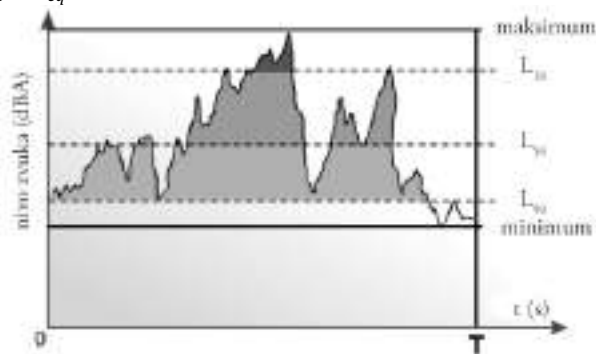
U novije vreme, za frekventijski neponderisan signal (nije primenjena frekventijska ponderacija) sve češće se sreće oznaka Z. Tako se oznaka L_{ZS} odnosi na frekventijski neponderisan nivo zvuka, sa vremenskom ponderacijom *slow*.

Statistički parametri buke

Buka u opštem slučaju ima manje ili više izražene varijacije nivoa u vremenu. Zbog toga su pored standardno korišćenih dugovremenskih ekvivalentnih nivoa zvučnog pritiska (L_{eq}) uvedeni i dodatni deskriptori, takođe zasnovani na vremenski i frekvencijski ponderisanom nivou zvučnog pritiska, slika 4.5.

To su:

- maksimalni nivo zvučnog pritiska (L_{max}),
- minimalni nivo zvučnog pritiska (L_{min}),
- standardna devijacija nivoa zvuka tokom dužeg vremenskog intervala (σ),
- kvantili, odnosno nivoi zvuka premašeni u N % vremena (L_N), gde je N obično 5, 10, 50, 90 ili 95,
- kombinacije prethodnih parametara, na primer razlike $L_{10} - L_{90}$, $L_5 - L_{eq}$ i slično.



Slika 4.5 – Šematski prikaz značenja statističkih parametara buke [23]

Indikatori buke u životnoj sredini

Buku u životnoj sredini izražavamo preko osnovnih i dodatnih indikatora. Osnovni indikatori buke opisuju ometanje bukom za određeni vremenski period. Tako imamo indikatore buke za period od 24 časa (L_{den}), za period dana (L_d), večeri (L_e) i noći (L_n). L_{den} se još naziva i ukupni indikator buke. Osnovne indikatore buke moguće je dobiti računski ili merenjem, kako je definisano u [11], [16] i [20]. Koriste se za procenu, predviđanje ili utvrđivanje stanja buke, izradu strateških karata buke i planiranje mera zaštite. Na osnovu poznatih vrednosti osnovnih indikatora buke moguće je, recimo, oceniti procenat stanovništva ugroženog bukom u toku dana (koristi se L_d), ili procenat stanovništva koji može biti uznemiren bukom tokom noći (koristi se L_n).

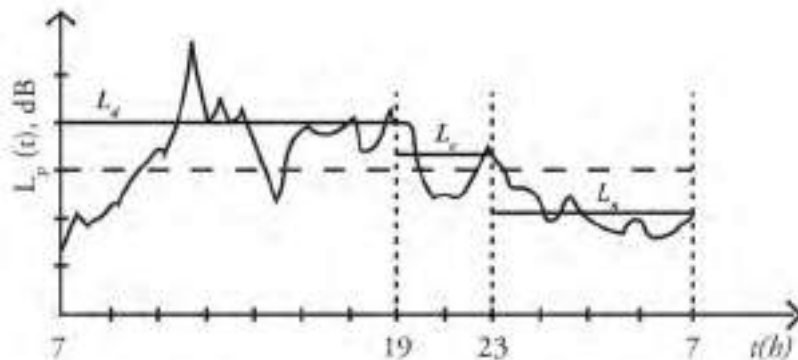
Dodatni indikatori buke su merodavni nivo buke $L_{RAeq, T}$ i nivo izloženosti buci L_{AE} , a koriste se za monitoring i pojedinačna merenja buke.

Ukupni indikator buke

Ukupni indikator buke se definiše kao [11], [20]:

$$L_{den} = 10 \log \frac{1}{24} \left(12 \cdot 10^{L_d/10} + 4 \cdot 12 \cdot 10^{(L_e+5)/10} + 8 \cdot 10^{(L_n+10/10)} \right), [\text{dBA}] \quad (4.4)$$

gde su: L_d , L_e i L_n , A-ponderisani dugovremenski prosečni nivoi zvuka koji se određuju za sve dnevne, večernje i noćne periode u toku jedne godine, respektivno, slika 4.7. Kao što se iz izraza (4.4) vidi, za večernju i noćnu buku su uvedeni korekcionni faktori od 5 dB i 10 dB, respektivno.



Slika 4.6. Princip određivanja ukupnog indikatora buke L_{den} polazeći od dnevnog L_d večernjeg L_e i noćnog L_n nivoa buke.

Ova korekcija proizilazi iz činjenice da postoji veća osetljivost stanovništva na buku tokom večeri i noći u odnosu na period dana, o čemu će više reći biti u narednom odeljku.

Ovako definisana vrednost L_{den} korelisana je sa procentom stanovništva za koji se očekuje da će biti ugrožen bukom kojoj je izložen.

A - ponderisani dugovremenski prosečni nivo buke za odgovarajuće periode dana određuje se prema jednačini:

$$\overline{L_{Aeq,T}} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N 10^{0,1(L_{Aeq,T})_i} \right), [\text{dBA}] \quad (4.5)$$

gde je:

N - broj dana u godini (365);

$L_{Aeq,T}$ - A-ponderisani ekvivalentni nivo određen za odgovarajući referentni vremenski interval;

T - trajanje referentnog vremenskog intervala (za dan 12 časova, za večer 4 časa i za noć 8 časova).

Merodavni nivo buke

Merodavni nivo buke $L_{RAeq,T}$, izražen u dBA, je ekvivalentni A-ponderisani nivo tokom određenog vremenskog intervala T , kome se dodaju korekcije zbog karaktera buke u frekventijskom i vremenskom domenu.

Merodavni nivo buke je dat izrazom [11], [20]:

$$L_{RAeq,T} = L_{Aeq} + \sum_{i=1}^n K_i, [\text{dBA}] \quad (4.6)$$

gde je L_{Aeq} – A ponderisani ekvivalentni nivo buke, a K_i korekcionni faktor.

Korekcionni faktor K_i (u dB) izražava korekcije za impulsni karakter buke, za tonalni karakter buke, za trajanje buke, za period dana itd. Iznosi ovih korekcija se određuju na različite načine prema pojedinim nacionalnim i međunarodnim standardima. Vrednosti korekcionnog faktora K_i , koje se najčešće sreću u standardima i propisima iz ove oblasti date su u tabeli 4.2.

Tabela 4.2 – Vrednosti korekcionnog faktora K_i za buku različitih karakteristika

Osnovi korekcije		K_i
Tip izvora buke	Drumski saobraćaj	0
	Avionski saobraćaj	3 do 6
	Železnički saobraćaj	-3 do -6
	Industrijska buka	0
Karakter buke	Impulsna buka	5
	Izrazito impulsna buka	12
	Buka sa prisustvom tonova	3 do 6
Doba dana	Veče	5
	Noć	10

U većini zemalja Evropske unije merodavni nivo buke - $L_{RAeq,T}$ se koristi za ocenu industrijske buke, a ekvivalentni nivo buke - L_{Aeq} za ocenu buke drumskog i železničkog saobraćaja. U našem nacionalnom zakonodavstvu definisano je korišćenje merodavnog nivoa buke za ocenu nivoa buke svih izvora u radnoj i životnoj sredini.

Nivo izloženosti buci

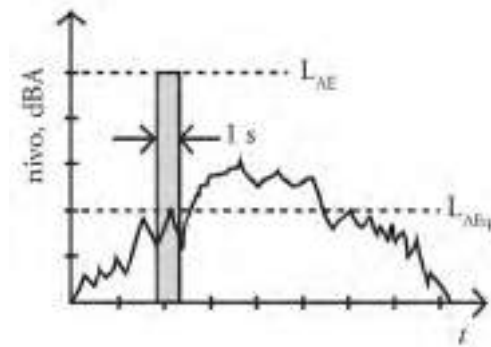
Nivo izloženosti buci je nivo buke pojedinačnog događaja za određeni vremenski interval i određuje se prema sledećoj jednačini [11], [20]:

$$L_{AE} = 10 \log \left[\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right], [\text{dBA}], \quad (4.7)$$

gde je:

$p_A(t)$ - trenutna vrednost A-ponderisanog zvučnog pritiska;

t_2-t_1 - posmatrani vremenski interval dovoljno dug da obuhvati sve značajne pojave buke u datom slučaju;
 p_0 - referentni zvučni pritisak ($20 \mu\text{Pa}$);
 t_0 - referentno vreme (1s).



Slika 4.7 – Šematski prikaz značenja nivoa izloženosti buci

Kao što se iz jednačine (4.7) i sa slike (4.7) može zaključiti, nivo izloženosti buci L_{AE} predstavlja onaj konstantni nivo zvuka čija je energija u jednoj sekundi, jednaka energiji originalnog zvučnog događaja.

Parametri za procenu rizika usled izlaganja buci na radnim mestima

Fizički parametri koji se koriste u postupku procene rizika usled izlaganja buci na radnom mestu su:

- nivo dnevne izloženosti buci ($L_{EX,8h}$) i
- vršna vrednost zvučnog pritiska (p_{peak}).

Nivo dnevne izloženosti buci

Nivo dnevne izloženosti buci predstavlja vremenski normalizovan srednji nivo izloženosti buci za osmočasovno radno vreme, izražen u dBA, ili [20]:

$$L_{EX,8h} = L_{Aeq,T_e} + 10 \log(T_e/T_0), [\text{dBA}] \quad (4.8)$$

gde je T_e efektivno, a T_0 referentno trajanje (8 sati) radnog dana. L_{Aeq,T_e} je ekvivalentni A-ponderisani nivo zvučnog pritiska, za period T_e u kojem je izvršeno njegovo usrednjavanje. Vreme merenja ili izračunavanja T_e treba da bude odabrano tako da daje rezultate reprezentativne za čitav period posmatranja.

Ako je na primer, radnik izložen buci od 100 dBA za vreme od 2 h a buci od 70 dBA ostatak radnog vremena do 8 sati, slika 4.8, onda je njegov nivo dnevne izloženosti buci:

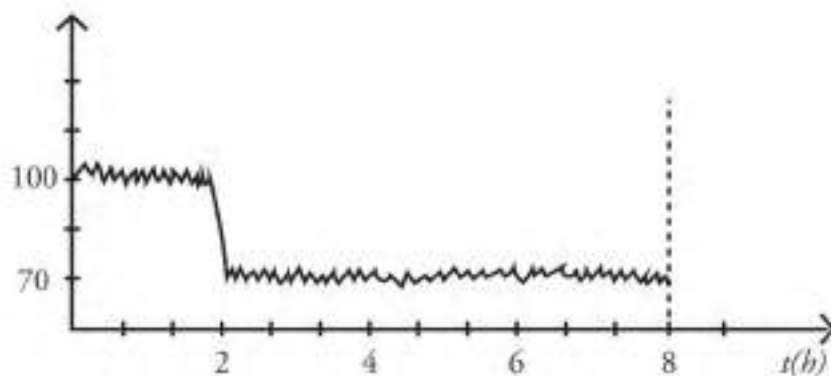
$$L_{EX,8h} = L_{Aeq,8h} = 10 \log \left(\frac{2}{8} 10^{\frac{100}{10}} + \frac{6}{8} 10^{\frac{70}{10}} \right) = 94 \text{ dBA}.$$

Ako efektivno trajanje radnog dana T_e ne prelazi 8 sati onda je brojno $L_{EX, 8h}$ jednako L_{Aeq, T_e} [20]. Za kontinualnu nepromenljivu buku, umesto L_{Aeq} može se koristiti A ponderisani nivo pritiska (L_{pA}).

Na radnim mestima na kojima se obavljaju poslovi pri kojima dnevna izloženost buci značajno varira od jednog do drugog radnog dana, rizik od uticaja buke se procenjuje na bazi nivoa nedeljne izloženosti buci $\bar{L}_{EX, 8h}$. Pod ovim nivoom se podrazumeva vremenski normalizovan prosek dnevnih izloženosti buci za radnu nedelju od pet osmočasovnih radnih dana:

$$\bar{L}_{EX, 8h} = 10 \log \left[\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 10^{0,1(L_{EX, 8h})_i} \right] \text{ [dBA]} \quad (4.9)$$

gde je $(L_{EX, 8h})_i$ - nivo izloženosti buci za i-ti dan.



Slika 4.8 – Izračunavanje ekvivalentnog nivoa buke

Vršna vrednost zvučnog pritiska

Vršna vrednost zvučnog pritiska (p_{peak}) predstavlja najvišu vrednost „C“ frekvencijski ponderisanog trenutnog zvučnog pritiska izraženu u dBC.

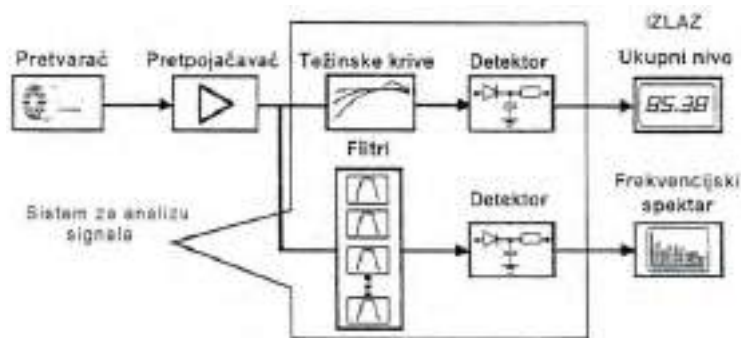
4.5 Merenje buke

Za procenu štetnog dejstva buke i preduzimanje određenih mera zaštite u konkretnim uslovima, potrebno je merenjem utvrditi određene parametre buke. Pri ovome se sve više teži iznalaženju veze između subjektivnih procena ometajućeg dejstva buke i njenih objektivnih parametara, kako bi se jednostavnim postupcima objektivnog merenja moglo što tačnije odmah ustanoviti i štetno dejstvo buke. Danas se za dobar deo pojedinačnih vrsta buke zna kakve će efekte izazvati i do kakvih će štetnih posledica dovesti.

Za poznavanje buke kao fizičkog stanja sredine potrebno je meriti nivo buke, uključujući i njegove vremenske promene, kao i spektar buke. Sve ove veličine mere se instrumentima posebnih karakteristika koji se izrađuju sa manjom ili većom tačnošću merenja, za kratkotrajna ili permanentna merenja, za teren ili istraživačku laboratoriju. Merenja se uvek izvode prema važećim pravilima i međunarodnim i nacionalnim propisima. Pri tome se nastoji da uslovi pod kojima se mere parametri buke budu ujednačeni i dovoljno poznati kako bi i rezultati bili međusobno uporedivi.

Instrumenti za merenje buke

Danas su u upotrebi veoma različiti instrumenti koji se koriste za merenje parametara buke u vremenskom i frekvencijskom domenu. Iako po prirodi merni lanac može biti analogni, digitalni, ili zasnovan na određenom softverskom paketu, on se uvek sastoji od nekoliko osnovnih delova prikazanih na slici 4.9.



Slika 4.9 – Merni lanac za mrenje i analizu buke

Pretvarač pretvara zvučne oscilacije izazvane dejstvom zvučnih talasa u električne signale. Pojačavač pojačava električni signal relativno male amplitude koji se dobija na izlazu pretvarača. Sistem težinskih krivih ima zadatak da ponderiše signal u frekvencijskom domenu čime se dobija trenutni nivo signala sa određenom (A, B, C ili linearna) ponderacijom.

Filtiri su namenjeni za analizu signala u frekvencijskom domenu. Kao rezultat ove analize dobija se frekvencijski spektar analiziranog signala. Detektor služi za izračunavanje efektivne vrednosti signala, dok se rezultati merenja i analize buke mogu prikazati na displeju samog instrumenta ili na nekom drugom uređaju kao što je štampač, ploter ili monitor računara.

U zavisnosti od strukture sistema za analizu signala, instrumenti za merenje buke se mogu podeliti u tri grupe: instrumenti za merenje ukupnog nivoa buke (sistem za analizu signala sadrži težinske krive i detektor signala), instrumente za frekvencijsku analizu buke (sistem za analizu signala sadrži skup filtara i detektor signala) i instrumente koji su kombinacija ova dva tipa.

Merenje spektra buke

Pošto je buka kompleksna zvučna pojava, često je potrebno pri analizi njenog ometajućeg i štetnog dejstva poznavati raspored i jačinu komponenata od kojih je sastavljena. Razlaganje buke na komponente ostvaruje se filtriranjem pomoću filtera propusnika opsega frekvencija. Tako dobijene vrednosti postaju merilo nivoa komponenata buke koje se nalaze u odabranom opsegu.

Analiza se može izvršiti filterima propusnicima opsega frekvencija bilo koje širine. Međutim, da bi rezultati bili ujednačeni merenja se uglavnom izvode pomoću oktavnih ili trećinsko – okavnih filtera.

4.6 Štetna dejstva buke

Buka deluje kao ometajući faktor pri radu čime direktno utiče na rezultate rada. Rad u prisustvu buke zahteva povećanu koncentraciju, usled čega dolazi do bržeg zamaranja, smanjenja kvaliteta rada i pojave grešaka. Pored toga, buka ometa komunikaciju među zaposlenima i može da predstavlja ozbiljnu smetnju prilikom sporazumevanja, davanja neophodnih komandi i uputstava.

Ometanje tokom odmora je takođe vid štetnog delovanja buke na čoveka.

Dejstvo buke na čovečki organizam je kumulativno. Tokom vremena ometanje bukom raste, što znači da se promene u organizmu superponiraju i povećavaju u zavisnosti od dužine trajanja ekspozicije. Do kumulacije uticaja buke dolazi ne samo tokom osmočasovnog rada (buka na radnom mestu) nego i tokom celog radnog veka, čemu se dodaju i posledice izazvane delovanjem buke i van radnog mesta (komunalna buka).

Štetno dejstvo buke na čoveka je višestruko. Buka utiče na sluh, mogućnost komunikacije, radnu sposobnost, na rad pojedinih organa i na opšte stanje celog organizma čoveka. Rezultati dejstva buke mogu biti razna ometanja bez štetnih posledica, prolazne promene ili trajna oštećenja.

Nekada se smatralo da je dejstvo buke ograničeno samo na organ sluha, ali danas je dokazano da je njeno dejstvo mnogo složenije. Na osnovu opsežnih i sistematskih ispitivanja ustanovljeno je da buka šteti zdravlju i dovodi do čitavog niza oboljenja. Buka ozbiljno pogađa nervni sistem, i to kako centralni tako i vegetativni, a preko ovog utiče na srce, krvne sudove, krvni pritisak, digestivni trakt i mnoge druge organe i tkiva u kojima izaziva promene i funkcionalne smetnje.

Pored direktnog štetnog dejstva na zdravlje čoveka buka posredno utiče na rezultate rada, i to što je jača sve vidnije i značajnije. Smanjenje produktivnosti rada, povećanje broja grešaka i povreda na radu evidentno je u svim delatnostima uz prisustvo buke. Na primer kod daktilografa sa

povećanjem nivoa okolne buke raste broj pogrešno otkucanih znakova. U industrijskim pogonima, u kojima je smanjena buka, dolazi do znatnog poboljšanja u kvalitetu proizvoda i ostvarenoj produktivnosti.

Štetni efekti dejstva buke mogu se, u zavisnosti od nivoa buke, razvrstati u sledeća četiri stepena, kako je dalje navedeno.

U prvom stepenu, koji obuhvata nivo buke od 30 dBA do 65 dBA, većina populacije ne oseća nikakve smetnje. Samo vrlo osetljive osobe postaju razdražljive.

Drugi stepen obuhvata nivo buke od 65 dBA do 90 dBA. Dejstvo ovih nivoa izaziva neurovegetativne smetnje s mogućim efektima na sluh i organizam. Oštećenja sluha su moguća samo kod osetljivih osoba i to ako su izložene duži niz godina dejstvu buke.

Treći stepen obuhvata nivo buke od 90 dBA do 110 dBA. Obično uz buku ovog nivoa kao prateći neželjeni efekti javljaju se vibracije. Kod velikog broja ljudi evidentan je gubitak sluha i teže neurovegetativne smetnje.

U četvrtom stepenu, koji obuhvata nivo buke od 110 dBA do 130 dBA, nije moguć rad, jer buka brzo izaziva psihološke smetnje i gubitak sluha. Nivo iznad 130 dBA dovodi do gotovo trenutnog gubitka sluha.

4.7 Kriterijumi za procenu štetnog dejstva buke

Granične vrednosti buke na radnim mestima

Usled izlaganja buci relativno velike jačine, tokom osmočasovnog radnog vremena, dolazi do prolaznih promena, kao što su: smanjena osetljivost organa sluha, manje nervne smetnje, nešto ubrzan puls i povećan krvni pritisak. Sve ovo se smatra bezopasnim ukoliko posle rada usledi normalan period odmora za vreme kojeg se organizam vrati u stanje pre izlaganja buci. Ukoliko posle ponovljenih dejstava buke, radnik nema uslova za kvalitetan i redovan odmor, treba u praksi očekivati razne trajne poremećaje zdravlja.

Tabela 4.3 – Granične vrednosti parametara koji se koriste u postupku procene rizika usled izlaganja buci na radnim mestima [21]

Parametar	$L_{EX,8h}$ (dBA)	p_{peak}	
		Pa	dBC
Dnevna granična vrednost	85	140	137
Dnevna akciona vrednost	80	112	135

Radi zaštite radnika, u većini zemalja se dosta pažnje poklanja propisivanju najveće dozvoljene jačine buke na radnom mestu. Ova granica, za koju se smatra da ne šteti zdravlju, postepeno se kroz preporuke i propise spušta, kada praksa ospori ranije procene štetnosti i kada ekonomski uslovi i nivo razvoja određene sredine to dozvole.

Domaći propisi [21] definišu minimalne zahteve koje je poslodavac dužan da ispuni u cilju smanjenja rizika od nastanka oštećenja zdravlja (pre svega sluha) zaposlenih, koji bi mogli nastati pri izlaganju buci.

Za parametre buke na radnom mestu propisane su: granična i akciona vrednost nivoa dnevne izloženosti buci ($L_{EX,8h}$) i vršne vrednosti zvučnog pritiska (p_{peak}), kako je dato u tabeli 4.3. U direktivi Evropske komisije [12] i pojedinim nacionalnim propisima i preporukama drugih zemalja figuriraju dve akcione vrednosti (80 dBA – donja i 85 dBA – gornja) a granična vrednost iznosi 87 dBA.

Kada je izloženost buci veća od akcione vrednosti poslodavac je dužan da sredstva i opremu za zaštitu sluha učini dostupnim zaposlenima, a kada je izloženost buci jednaka ili veća od granične vrednosti, poslodavac je dužan da na korišćenje zaposlenima sredstva i opremu za zaštitu sluha.

Tabela 4.4 – Maksimalno dozvoljeni dnevni nivoi izlaganja buci za vremena kraća od 8 h

Maksimalno dozvoljeno dnevno izlaganje (h)	Dozvoljeni nivo buke (dBA)	
	Pravilo "3 dB"	Pravilo "5 dB"
8	85	85
4	88	90
2	91	95
1	94	100
0.5	97	105
0.25	100	110

Ako se nivo zvuka poveća iznad maksimalno dozvoljene osmočasovne vrednosti, vreme eksponiranja se mora skratiti. Koliko je to vreme, može se lako izračunati, ako se zna pravilo za koliko se sme povećati nivo zvuka ako se vreme prepolovi. U literaturi i nacionalnim propisima za ovo povećanje se uzimaju dve vrednosti: 3 dB ili 5 dB. Polazeći od maksimalno dozvoljenog osmočasovnog nivoa od 85 dBA, za kraća vremena izlaganja maksimalno dozvoljeni nivoi imaju vrednosti date u tabeli 4.4.

Maksimalno dozvoljeno vreme izlaganja buci nivoa L_m , većeg od dozvoljenog odmočasovnog L_{doz} , može se izračunati iz relacije:

$$t_d = \log \frac{8}{2^{\frac{L_m - L_{doz}}{K}}} \text{ [dBA]} \quad (4.10)$$

gde je $K = 3$ dB ili 5 dB, u zavisnosti od toga koje se pravilo primenjuje prilikom skraćivanja vremena izlaganja na polovinu.

Uticađ buke određene jačine na radni učinak i na zdravlje radnika za različite vrste delatnosti veoma je različit. Pri ovim procenama uzima se u obzir i faktor ometanja pri radu, pošto skoro u svim slučajevima (izuzimajući

isključivo fizički rad) buka utiče na koncentraciju, a time i na kvalitet i efikasnost rada.

Maksimalni dopušteni nivoi buke na radnim mestima, s obzirom na vrstu delatnosti, dati su u tabeli 4.5.

Tabela 4.5 – Maksimalno dozvoljeni nivoi buke za različite delatnosti

R. br.	Vrsta delatnosti	Maksimalno dozvoljeni ekvivalentni nivoi buke (dBA)	
		Proizvodni izvori	Neproizvodni izvori
1	Najzahtevniji umni rad, vrlo velika usredsređenost, rad vezan za veliku odgovornost, najsloženiji poslovi upravljanja	45	40
2	Pretežno umni rad koji zahteva usredsređenost, kreativno razmišljanje, dugoročne odluke, istraživanje, projektovanje, komuniciranje sa grupom ljudi	50	40
3	Zahtevniji kancelarijski poslovi, doktorske ordinacije, dvorane za sastanke, školska nastava, neposredna govorna i/ili telefonska komunikacija	55	45
4	Manje zahtevni kancelarijski poslovi, pretežno rutinski umni rad koji zahteva usredsređenost ili neposrednu govornu i/ili telefonsku komunikaciju, telefonske centrale	60	50
5	Manje zahtevni i uglavnom mehanizovani kancelarijski poslovi, prodaja, vrlo zahtevno upravljanje sistemima, fizički rad koji zahteva veliku pažnju i usredsređenost, zahtevni poslovi montaže	65	55
6	Pretežno mehanizovani kancelarijski poslovi, zahtevno upravljanje sistemima, upravljačke kabine, fizički rad koji zahteva stalnu usredsređenost, rad koji zahteva nadzor sluhom, rad koji se obavlja na osnovu zvučnih signala	70	60
7	Manje zahtevni fizički poslovi koji zahtevaju usredsređenost i oprez, manje zahtevno upravljanje sistemima	75	65
8	Pretežno rutinski fizički rad koji zahteva praćenje okoline slušanjem	80	65
9	Fizički rad bez zahteva za umnim naprezanjem i praćenjem okoline slušanjem	85	70

Granične vrednosti indikatora buke u naseljenim mestima, prema zonama naselja

Buka ugrožava ljude i van radnog mesta, gde može biti neprijatnija i jača nego pri radu. Pri procenjivanju dozvoljene granice jačine buke u životnoj sredini uzima se u obzir činjenica da čovek veći deo vremena provede van radnog mesta. U zaštiti životne sredine poseban problem predstavlja buka noću pri čemu treba ustanoviti koje su to jačine buke koje ne ometaju san. Maksimalni dozvoljeni nivoi buke u životnoj sredini, na otvorenom prostoru (izvan objekata), zavise od tipa zone o kojoj se radi. Normalno je očekivati da oni budu manji u zonama za odmor i zonama za stanovanje od onih u zonama sa teškom industrijom i u blizini glavnih saobraćajnica, tabela 4.6 [20]. Kao što se vidi iz tabele 4.6, granične vrednosti za dan i veče u domaćim propisima su jednake. Granične vrednosti se odnose na osnovne indikatore buke i na merodavni nivo buke, uključujući ukupnu buku koja potiče od svih izvora na posmatranoj lokaciji.

Tabela 4.6 – Granične vrednosti indikatora buke na otvorenom prostoru [20]

Zona	Namena prostora	Nivoi buke u dBA	
		Za dan i veče	Za noć
1	Područja za odmor i rekreaciju, bolničke zone i oporavilišta, kulturno-istorijski lokaliteti, veliki parkovi	35	30
2	Turistička područja, kampovi i školske zone	50	45
3	Čisto stambena područja	55	45
4	Poslovno-stambena područja, trgovačko-stambena područja i dečja 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 buka ne sme prelaziti graničnu vrednost u zoni sa kojom se graniči	

Granične vrednosti indikatora buke u zatvorenim prostorijama u kojima borave ljudi

Granične vrednosti indikatora buke utvrđene su za boravišne prostorije stana, gde je potrebno zadovoljiti uslove za odmor ljudi, i za prostorije u javnim i drugim objektima gde se zahteva koncentracija pri radu i komuniciranje govorom. Takođe, postoje utvrđene vrednosti i za boravišne prostorije u drugim vrstama objekata (hoteli, škole, bolnice, prostorije za boravak dece, domovi za stara lica, bioskopske, pozorišne i koncertne dvorane).

Najveći dozvoljeni nivoi buke u zatvorenim prostorijama, pri zatvorenim prozorima prikazani su u tabeli 4.7 [20]. Ove vrednosti se odnose na merodavni nivo buke.

Tabela 4.7 – Granične vrednosti indikatora buke u zatvorenim prostorijama [20]

R. br.	Namena prostora	Nivoi buke u dBA	
		Za dan i	Za noć
1	Boravišne prostorije (spavaća i dnevna soba) u stambenoj zgradi pri zatvorenim prozorima.	35	30
2	U javnim i drugim objektima, pri zatvorenim prozorima:		
2.1	a) bolesničke sobe	35	30
	b) ordinacije	40	40
	c) operacioni blok bez medicinskih uređaja i opreme	35	35
2.2	Prostorije u objektima za odmor dece i učenika, i spavaće sobe domova za boravak starih lica i penzionera	35	30
2.3	Prostorije za vaspitno-obrazovni rad (učionice, slušaonice, kabineti i sl.), bioskopske dvorane i čitaonice u bibliotekama	40	40
2.4	Pozorišne i koncertne dvorane	30	30
2.5	Hotelske sobe	35	30

Kada se merenjima ustanovi da nivo buke prelazi granične vrednosti onda se mora uraditi oktavna analiza buke. Za procenu štetnosti na osnovu oktavne analize koriste se NR krive (*Noise Rating curves*) [13], prikazane na slici 4.10. NR krive su definisane međunarodnim standardom i predstavljaju prihvatljive nivoe buke u zatvorenim prostorijama, za zaštitu čula sluha, govornu komunikaciju i ometanje bukom. Uglavnom se koriste u Evropi, dok se slična familija krivih pod nazivom NC krive, više primenjuje u SAD. Stalno opadajući tok ovih krivih, koje možemo shvatiti i kao krive jednake podnošljivosti buke, ukazuje na činjenicu da više frekvencije jače ometaju od nižih.

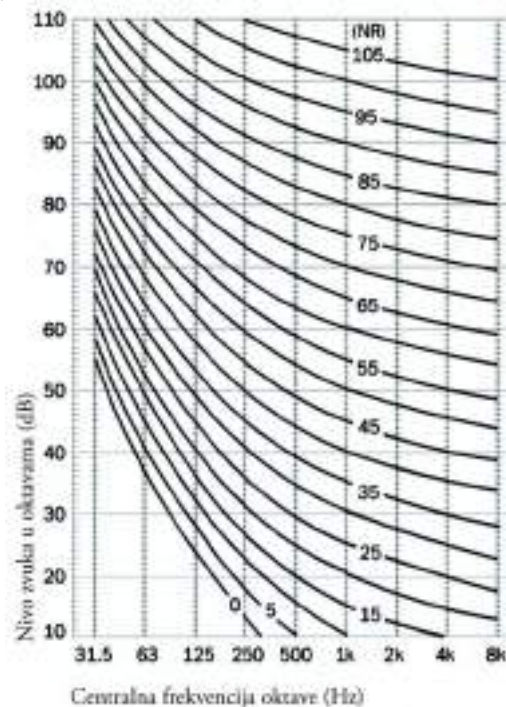
Tabela 4.8 – Preporučene NR krive za prostorije različitih namena

Kriterijum	Namena prostorija
NR25	Koncertne sale, radio studiji, studiji za snimanje, crkve
NR30	Privatne kuće, bolničke sobe, pozorišta, bioskopi, konferencijske sale
NR35	Biblioteke, muzeji, sudnice, škole, operacione sale, stanovi, hoteli
NR40	Hale, hodnici, garderobe, restorani, noćni klubovi, kancelarije, prodavnice
NR45	Robne kuće, supermarketi, kantine
NR50	Daktilo biro, kancelarije sa poslovnim mašinama
NR60	Manje proizvodne hale
NR70	Livnice, hale sa teškom industrijskom proizvodnjom

Oznaka krive (NR35, NR50 i sl.) odgovara dozvoljenoj vrednosti nivoa buke u oktavi sa centralnom frekvencijom na 1000 Hz. Nominalna vrednost krive približno odgovara 5 dB većem ukupnom nivou buke L_{Aeq} .

Tako kriva NR50 približno odgovara ukupnom nivou buke od 55 dBA, kriva NR65 nivou buke od 70 dBA i tako redom.

Koji kriterijum, odnosno graničnu krivu za buku treba primeniti za pojedine prostorije, može se videti i iz tabele 4.8. Podrazumeva se da ni u jednoj oktavi nivo buke ne sme preći vrednost na propisanoj krivoj. Drugim rečima, spektar buke (po oktavama) mora u celini ležati ispod krive usvojenog kriterijuma.



Slika 4.10 – Standardizovane NR krive [13]

Znajući spektar spoljne buke i usvajajući određeni NR – kriterijum, oduzimanjem vrednosti odgovarajućih ordinata, dobijamo podatke o potrebnoj akustičkoj izolaciji.

4.8 Širenje buke

Izvori buke su veoma različiti. To može biti kompletan saobraćaj u jednom delu naselja. Unutar tog saobraćaja kao posebne izvore buke imamo autobuse, automobile ili druga prevozna sredstva. Dalje, na samom vozilu pojedinačni izvori buke su motor, izduvni lonac, menjačka kutija itd.

Kod svakog izvora buke razlikujemo vremenske, prostorne i akustičke karaktersitike. Prema načinu vremenskog delovanja razlikujemo izvore stalne buke i izvore promenljive buke. Izvori buke prema načinu svog

prostornog delovanja mogu biti stacionarni i mobilni. Osnovne akustičke karaktersitke izvora buke su jačina, spektar i usmerenost.

Način prostiranja i prenošenja buke od izvora do prijemnika zavisi od toga o kakvim se putanjama radi. Vrsta putanje je od primarnog značaja i kada se radi o zaštiti od buke pomoću tehničkih sredstava. Pri tome je veoma bitno da li se zvuk prenosi kroz neku čvrstu pregradu, ili se prostire kroz gasovitu i tečnu sredinu.

Prijemno mesto ili prijemnik buke u širem značenju može biti prostor različitih dimenzija, što zavisi od načina posmatranja i postavljenog cilja. Na primer, za buku aviona ceo jedan grad je prijemno mesto, dok je za buku u radnoj prostoriji prijemno mesto uvo radnika.

Buka može da se širi, u okolinu izvora koji je stvara, na dva načina:

- kroz vazduh ili
- kroz pregrade.

U praksi su oba slučaja zastupljena, pa će biti, ukratko, svaki od njih posebno analiziran.

4.8.1 Širenje buke kroz vazduh

Kroz vazduh se buka širi po svim zakonima koji važe i za širenje (prostiranje) zvučnih talasa. Što se više udaljavamo od izvora buke, to će i nivo biti manji. Kako i koliko će se nivo buke menjati zavisi od više faktora.

Ukoliko se radi o ravnom terenu, bez prepreka, buka će se širiti u svim pravcima, a sa udvostručavanjem rastojanja od izvora nivo će opadati za 6 dB.

Ako teren nije ravan, nivo buke će se smanjivati zavisno od konfiguracije terena. U svakom konkretnom slučaju moguće je dosta dobro predvideti kako će se nivo buke menjati.

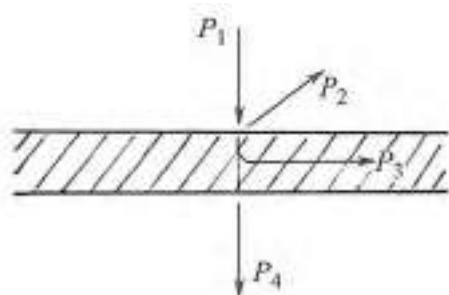
Dodatnim sredstvima, kao što su razne pregrade ili kako ih najčešće nazivamo barijere, nivo buke se može uspešno smanjivati prema ukazanim potrebama. Duž autoputeva, u okolini industrijskih pogona koji su bučni, pored transformatorskih stanica i na sličnim mestima postavljaju se barijere koje moraju da zadovolje određene uslove kako bi njihova efikasnost bila evidentna. Presudnu ulogu igra visina barijere, koja mora da bude reda veličine talasne dužine dominantnog zvuka, a zatim su važna i rastojanja od izvora buke do barijere i od mesta prijema do barijere. Kratke barijere nemaju efekta, kao ni niske.

Vrlo su uočljive visoke barijere (4-7 m) duž autoputeva u Evropi. To su dosta masivni zidovi koji odvajaju put od okolnih naselja. Njihova efikasnost je lako merljiva. U najkritičnijim slučajevima se prave i tuneli, u koje se sa unutrašnje strane postavljaju apsorpcioni materijali. Oni su i najbolje sredstvo zaštite od buke.

Kod nas tek od skoro počinju da se postavljaju zaštitni zidovi duž autoputeva. Postavljaju se i barijere oko industrijskih pogona i najviše oko transformatora. Očigledno tek dolazi vreme bolje i veće zaštite od buke na otvorenom prostoru.

4.8.2 Prenosenje buke kroz pregrade

Ukoliko zvučni talas pri prostiranju kroz vazduh udari u neku pregradu, deo akustičke energije će se reflektovati, dok će deo proći kroz pregradu. Na slici 4.11 šematski i vrlo uprošćeno je prikazan način prenošenja akustičke energije pri nailasku na pregradu.



Slika 4.11 – Šematski prikaz širenja buke pri udaru o pregradu.

Sa P_1 je označena akustička energija (u jedinici vremena) zvučnog talasa koji je udario u pregradu, dok P_2 predstavlja reflektovanu energiju koja se sastoji od energije odbijenog talasa i energije zračenja usled vibracija pregrade. P_3 predstavlja energiju odvedenu bočno kroz pregradu a P_4 energiju koja je prošla na drugu stranu pregrade. Ona je posledica poroznosti materijala i vibracija pregrade.

Koliki deo akustičke energije prođe kroz pregradu definiše se koeficijentom transmisije. Ovaj koeficijent daje odnos energije koja je prošla kroz pregradu i energije koja je udarila u pregradu. Koeficijent transmisije je:

$$\tau = \frac{P_4}{P_1} \quad (4.11)$$

U praksi je koeficijent transmisije znatno manji od jedinice i ima vrednost reda veličine 10^{-3} do 10^{-4} . Ovako male vrednosti nisu pogodne za upotrebu, pa je zato uvedena njegova recipročna logaritamska vrednost. Tako se definiše *izolaciona moć* pregrade koja iznosi:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \text{ [dB]} \quad (4.12)$$

Za razne vrste pregrada može se izračunati ili izmeriti izolaciona moć pregrade. U Tabeli 4.9 date su neke tipiče vrednosti izolacionih moći građevinskih elemenata.

U posebnim građevinskim priručnicima može se naći mnogo više podataka o izolacionoj moći građevinskih elemenata i materijala, dok su ovde dati samo neki podaci kao primeri.

Kada je poznata izolaciona moć pregrade, koju često zovemo i akustička izolacija, moguće je definisati *zvučnu izolovanost* između dve prostorije. Ona iznosi [1], [5]:

$$D = L_1 - L_2 = R + 10 \log \frac{A_2}{S_{12}} \quad [\text{dB}] \quad (4.13)$$

gde su: L_1 - nivo buke u prostoriji br. 1, gde se nalazi izvor;

L_2 - nivo buke u prostoriji br. 2 (prijemna prostorija);

R - izolaciona moć pregrade;

A_2 - apsorpcija prostorije br. 2;

S_{12} - površina pregradnog zida između prostorije br. 1 i br. 2.

Tabela 4.9 – Izolaciona moć nekih građevinskih elemenata

R. br.	Vrsta pregrade	Debljina [cm]	Površinska masa [kg/m ²]	Izolaciona moć R[dB]
1.	Betonski zid	20	430	54
2.	Zid od pune opeke, omalterisan	27	480	55
3.	Zid od šuplje opeke, omalterisan	27	390	52
4.	Gips-karton ploča	1,25	10	29
5.	Šper ploča	1	7	24
6.	Dve gips-karton ploče (svaka po 1,25 cm) na metalnoj nosećoj konstrukciji		25	43
7.	Termički prozor (dva stakla). Svako staklo 3 mm	1,4	15	27
8.	Dva AL-lima 0,6 mm sa kartonskim saćem	6,5	6	12

Zvučna izolovanost se u praksi često meri, jer je ovu veličinu moguće relativno lako odrediti. Ona služi kao dobar indikator u slučajevima kada nije jednostavno naći izolacionu moć laboratorijskim merenjem.

4.8.3 Zakon mase

Izolaciona moć se može izračunati na osnovu teorijskih razmatranja za upadni ugao zvučnih talasa od 90° kao [1], [5]:

$$R_0 = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m_s}{2\rho c} \right)^2 \right] \cong 20 \log \frac{\omega m_s}{2\rho c}, \quad [\text{dB}], \quad (4.14)$$

gde su: ω - kružna frekvencija ($2\pi f$),

m_s - površinska masa pregrade [kg/m^2],

ρc - konstanta koja iznosi 400 jedinica SI.

Obrazac za izračunavanje R_0 naziva se zakon mase. Način izračunavanja R_0 se navodi posebno zbog toga što ova veličina ukazuje kako se menja izolaciona moć sa debljinom (površinskom masom) pregrade i sa frekvencijom.

U vezi sa debljinom pregrade iz navedenog obrasca za R_0 vidi se da svako udvostručavanje mase pregrade dovodi do povećanja izolacione moći od 6 dB. U praksi se može, nažalost, često čuti da će udvostručavanje mase pregrade povećati i izolacionu moć na dvostruko veću vrednost, a ne samo za 6 dB! Značajnije povećanje izolacione moći se ostvaruje isključivo dvostrukim pregradama koje su tako konstruisane da budu dovoljno razmaknute jedna od druge. Što se tiče frekvencije, evidentno je da izolaciona moć raste za 6 dB pri povećanju frekvencije dva puta.

U praksi su vrednosti R_0 po pravilu manje od izračunatih što je rezultat većeg broja faktora, u šta ovde nećemo ulaziti.

4.8.4 Strukturna buka

Posebnu vrstu buke predstavlja strukturna buka, koja je rezultat vibracija čvrstih tela stvorenih mehaničkom pobudom. Strukturnu buku stvaraju razni udari i mašine, a ona se prenosi preko građevinskih konstrukcija i cevi (vodovod, kanalizacija).

Ukoliko postoje čvrste i krute veze između mesta nastanka vibracija i prenosnih konstrukcija strukturna buka se javlja čak i u vrlo udaljenim prostorijama.

Čvrsta tela, u kojima se stvara strukturna buka, zrače akustičku energiju u vazdušni prostor oko sebe. Zaštita od strukturne buke se svodi na stvaranje diskontinuiteta na putevima prenošenja vibracija. Ubacivanjem elastičnih veza i materijala strukturna buka se može uspešno ograničiti.

4.9 Odbrana od buke

Postoje tri načina odbrane od prekomerne buke: fiziološki, tehnički i socijalno-pravni.

4.9.1 Fiziološka odbrana od buke

Fiziološka odbrana obuhvata: promenu fizičkih karakteristika srednjeg uva, slušnu adaptaciju i slušni zamor. To je u stvari reakcija organa sluha na povećani nivo buke.

Pod dejstvom buke dolazi do kontrakcije mišića srednjeg uva, čime se smanjuje prenos zvuka prema unutrašnjem uvu, i tako štiti ostatak slušnog mehanizma od dejstva prekomerne buke.

Slušna adaptacija predstavlja spuštanje osećaja glasnosti i pad osetljivosti sluha usled delovanja akustičke stimulacije. Tokom vremena ove veličine se asimptomski približavaju svojim vrednostima karakterističnim za datu akustičku stimulaciju.

Slušni zamor predstavlja funkcionalno stanje organa sluha tokom ili nakon stimulacije većim intenzitetom zvuka. On pokazuje kako se organ sluha ponaša kada je opterećen preko svojih mogućnosti. To stanje se ogleda u progresivnom padu osećaja glasnosti i praga čujnosti pod dejstvom zvuka većeg intenziteta.

4.9.2 Odbrana od buke tehničkim sredstvima

Veoma važan način odbrane od buke sastoji se u primeni različitih tehničkih sredstava. U oblasti tehničke zaštite od buke iskustva su dovoljno velika da se znaju pravila koja se primenjuju u različitim slučajevima stvaranja i širenja buke. Zaštita od buke, kao jedna podoblast akustike, bavi se metodama za ostvarivanje prihvatljive buke, pre svega po nivou i spektralnom sadržaju. Zaštita se postiže raznim merama i intervencijama na tri osnovna elementa tog procesa: na samom izvoru buke, na potencijalnim prijemnicima, i na putanji koju zvuk prelazi prostirući se od izvora do prijemnika.

Kao najefikasnije rešenje u borbi protiv buke nameće se, samo po sebi, suzbijanje buke na izvoru. Treba, dakle, učiniti da mašine u fabrikama, aparati u domaćinstvu, saobraćajna sredstva i drugi izvori stvaraju što manje buke. To je tehnički izvodljivo jer u suštini svaka buka pri radu nekog uređaja, dokaz je njegove tehničke nesavršenosti.

Nekada se smanjenje buke može postići vrlo jednostavnim sredstvima, kao što je postavljanje elastičnih podmetača ispod mašine da se vibracije ne bi prenosile na podlogu, ili drugačijim postavljanjem mašine koja usmereno zrači zvuk. U drugim prilikama se mora ići dalje, na primer zameniti zupčasti prenos frikcionim, i slično. U svakom slučaju, na tom polju može još mnogo da se uradi, ali uz određene materijalne žrtve koje, nažalost, današnji svet u želji za sticanjem što većeg profita, nije spreman da podnese.

Ukoliko buka nije smanjena na izvoru ostaje nam da smanjimo njen uticaj na putanji od izvora do prijemnika. Ovaj vid zaštite se realizuje kroz: prostorno planiranje objekata, raspored prostorija u zgradi, izradu pregrada (zidovi i međuspratne konstrukcije) određenih karakteristika, izradu vrata i prozora prema definisanim normama i postavljanje kućnih postrojenja i instalacija prema važećim principima zaštite od vibracija.

Na kraju, ako ni jedan od prthodno opisana dva postupka zaštite od buke (na izvoru i na putanji od izvora do prijemnika) nije dao očekivane rezultate mora se primeniti zaštita od buke na prijemu. Prijemnik je uvek čovek, a zaštitne mere koje se primenjuju neposredno na ljudima nazivamo lične mere zaštite od buke.

Kada nivo dnevne izloženosti buci pređe 80 dBA, osoblju koje radi u takvoj sredini moraju se staviti na raspolaganje lična zaštitna sredstva a ako ovaj nivo pređe 85 dBA osoblje mora koristiti lična zaštitna sredstva. Iz ovoga zaključujemo da lično zaštitno sredstvo treba da smanji nivo buke ispod 80 dBA.

Prilikom primene ličnih zaštitnih sredstava mora se voditi računa o spektru buke, zbog toga što je prigušenje zaštitnih sredstava veoma zavisno od frekvencije. Kod svih sredstava ove vrste više frekvencije su jače prigušene.

Prigušenje istog tipa sredstva se menja od komada do komada, a i za svaki komad nije u svim slučajevima jednako, jer, između ostalog zavisi i od naleganja.

U lična sredstva zaštite od buke spadaju:

- Zaštitni čepovi za uši, koji imaju prigušenje od oko 10 dB na niskim frekvencijama, pa do više od 20 dB na visokim frekvencijama. Uglavnom su od sintetičkog materijala ili gume;
- Zaštitne ušne školjke ili naušnice, koje imaju prigušenje od 20 dB do 40 dB, na srednjim i višim frekvencijama, a prednost im je nad čepovima što ne stvaraju smetnje u ušnim kanalima;
- Zaštitni šlemovi ili kapuljače, koji prekrivaju uši i veći deo glave. Izrađuju se od platna i kože, a iznutra se oblažu vatom ili filcom. Sami po sebi nemaju veće prigušenje od naušnica, ali se mogu kombinovati sa naušnicama i čepovima;
- Zaštitna odela, koja se koriste u ekstremnim slučajevima kada nivo buke doseže vrednosti do oko 130 dBA i kada treba zaštititi sve organe ljudskog tela.

4.9.3 Odbrana od buke socijalno pravnim sredstvima (pritužbe građana i zakonska regulativa)

Značajan vid odbrane od buke su i zajedničke reakcije određenog procenta ugroženog stanovništva na ometanje bukom. Ove reakcije mogu biti pojedinačne ili u obliku peticija nadležnim državnim institucijama.

Jedan od najvažnijih zadataka zaštite od buke jeste donošenje propisa o načinima merenja buke, o dozvoljenim nivoima buke, kao i o načinu kontrole i sankcionisanja zagađivača bukom.

Sve iole razvijene zemlje su veoma davno donele nacionalne standarde i pravilnike za zaštitu od buke. Evropska unija je kao celina 1996. godine poseban plan za borbu protiv buke [7].

U našoj zemlji je još 1967. godine donešen dokument pod imenom „Pravilnik o minimalnim tehničkim uslovima za izgradnju stanova [2], što obeležava početak formalne obaveze projekatanta i graditelja da pri gradnji objekata vode računa o zaštiti od buke. Danas je ta obaveza ustanovljena serijom standarda pod zajedničkim naslovom „Akustika u građevinarstvu“. U novije vreme neki od njih formirani su prevođenjem ili preuzimanjem odgovarajućih međunarodnih (ISO) standarda.

Pitanja od značaja za zaštitu životne sredine i zdravlje ljudi, koja se odnose na buku, definisani su kod nas Zakonom o zaštiti od buke u životnoj sredini [19].

Štetno dejstvo buke u životnoj sredini je detaljnije obrađeno u odgovarajućoj Uredbi [20] gde su definisani i indikatori buke, njihove granične vrednosti i metode za ocenjivanje štetnih efekata buke. Preventivne mere koje se moraju primeniti na radnim mestima radi zaštite radnika od uticaja buke definisane su u Pravilniku [21] koji detaljnije obrađuje ovu tematiku.

Za one karakteristične veličine iz domena buke za koje ne postoje domaći propisi ili standardi uobičajeno je da se primenjuju međunarodni standardi. Oni su veoma korisni kada se radi i mernim metodama i procenjivanju buke, ali ne sadrže kriterijume niti se za tu svrhu mogu primeniti. Kriterijumi se utvrđuju u nacionalnim propisima. Za retke slučajeve, gde ne postoje međunarodni ili nacionalni standardi ili preporuke, koriste se stavovi merodavnih institucija ili autora iz literature.

4.10 Pitanja za proveru znanja

1. Šta je buka? Koje vrste buke razlikujemo?
2. Nabrojati najčešće izvore buke. Kako ih možemo podeliti?
3. Kako se definiše i čemu služi ekvivalentni nivo buke?
4. Kako se može izmeriti ekvivalentni nivo buke?
5. Koje se ponederacije, i zašto, uvode tokom merenja ekvivalentnog nivoa buke?
6. Koji se statistički parametri koriste prilikom analize buke?
7. Koje indikatore buke koristimo prilikom merenja i procenjivanja buke u životnoj sredini?
8. Kako su definisani indikatori buke u životnoj sredini?
9. Koji parametri se koriste za procenu rizika od uticaja buke na radnim mestima?
10. Šta su, i kako su definisani dnevni i nedeljni nivo izloženosti buci?

11. Koji su osnovni sklopovi instrumenata za merenje buke?
12. Koja su najčešća štetna dejstva buke na čoveka?
13. Koje su granične vrednosti parametara buke na radnim mestima?
14. Od čega zavise granične vrednosti indikatora buke u naseljenim mestima i u kojim granicama se kreću?
15. Od čega zavise granične vrednosti indikatora buke u zatvorenim prostorijama i u kojim granicama se kreću?
16. Šta su NR krive, kako je definisana njihova nazivna vrednost, i koji je odnos ove vrednosti prema odgovarajućem nivou buke izraženom u dBA?
17. Približno skicirati izgled NR krivih. Šta se može zaključiti iz njihovog oblika?
18. Kako se buka širi od izvora u okolni prostor?
19. Šta je koeficijent transmisije? Kako se izračunava izolaciona moć pregrade? Koliko ona iznosi (približno) za najčešće pregrade u praksi?
20. O čemu govori zakon mase i kako on glasi?
21. Šta je zvučna izolovanost dve prostorije i od čega ona zavisi?
22. Šta se podrazumeva pod fiziološkom odbranom od buke?
23. Šta se podrazumeva pod zaštitom od buke tehničkim sredstvima? Na kojim mestima se ova zaštita može primeniti?
24. Šta su lična zaštitna sredstva od buke?
25. Koja su to socijalna i pravna sredstva za zaštitu od buke?
26. Koji osnovni propisi definišu oblast zaštite od buke u našoj zemlji?

4.11 Literatura

- [1] L. L Beranek, Noise and Vibration Control, McGraw Hill Book Co., 1971.
- [2] Pravilnik o minimalnim tehničkim uslovima za izgradnju stanova", Sl. list SFRJ br.45/1967.
- [3] J. R. Hassall, K. Zaveri, M. Phil, *Acoustic Noise Measurement*, Bruel & Kjaer, 1979.
- [4] M. Simonović, D. Kalić, P. Pravica, *Buka – štetna dejstva, merenje i zaštita*, Institut za dokumentacije zaštite na radu, Niš, 1982.
- [5] H. Kurtović, *Osnovi tehničke akustike*, Naučna knjiga, Beograd, 1982.
- [6] SPRS U.J6.201 Akustika u zgradarstvu - Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada, Sl. list SFRJ br. 67/89.
- [7] Future Noise Policy-European Commission Green Paper, Brussels, 1996,

- <http://edz.bib.uni-mannheim.de/wwwedz/pdf/kom/gruenbuch/kom-1996-0540-en.pdf>. (preuzeto: maj 2017).
- [8] M.H. Harris, *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control*, Acoust. Soc. of Amer. 1998.
 - [9] M. Mijić, *Akustika u arhitekturi*, Nauka, 2001.
 - [10] M Mijuć, *Građevinska akustika*, <http://documents.tips/documents/gradjevska-akustika-etf-beograd.html>. (preuzeto: jun 2017).
 - [11] ISO 1996-1:2003 - Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 1: Basic quantities and assessment procedures.
 - [12] Directive 2003/10/EC, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0010&from=EN>, (preuzeto: jun 2017).
 - [13] A. D. Bies and H.H. Hansen, *Engeneering Noise Control*, Spon Press, London, 2003.
 - [14] M. Prašević i D. Cvetković, *Buka u životnoj sredini*, Univerz. u Nišu – Fakultet zaštite na radu, 2005.
 - [15] C. E. Hanson, D. A. Towers, and L. D. Meister, *Transit Noise and Vibration Impact Assessment*, Harris Miller Miller & Hanson Inc. Burlington, MA 01803, May 2006. http://www.gsweventcenter.com/GSW_RTC_References%5C2006_0501_USDOT.pdf, (preuzeto: maj 2017).
 - [16] ISO 1996-2:2007 - Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise - Part II: Determination of environmental noise levels.
 - [17] ANSI/ASA S12.2-2008-Criteria for Evaluating Room Noise.
 - [18] V. Delić, *Akustika i zaštita od buke*, prezentacija, FTN Novi Sad, januar 2009.
 - [19] Zakon o zaštiti od buke u životnoj sredini, "Sl. glasnik RS", br. 36/2009 i 88/2010.
 - [20] Uredba o indikatorima buke, graničnim vrednostima, metodama za ocenjivanje indikatora buke, uznemiravanja i štetnih efekata buke u životnoj sredini, "Sl. glasnik RS", br. 75/2010.
 - [21] Pravilnik o preventivnim merama za bezbedan i zdrav rad pri izlaganju buci, "Sl. glasnik RS", br. 96/2011 i 78/2015.
 - [22] C H Hansen, *Fundamentals of acoustics*
 - [23] Enviromental Noise, The Goverment of the Hong Kong, Special administrative eregion, http://www.epd.gov.hk/epd/noise_education/web/ENG_EPD_HTML/index/index.html (preuzeto: septembar 2017).

Analogije

5.1 Uvod

Izučavanje pojava u akustičkim i mehaničkim sklopovima i sistemima često je mnogo jednostavnije preko analogija sa električnim kolima, nego korišćenjem standardnih metoda akustike i mehanike. Uobičajeno je da se akustički i mehanički sklopovi predstavljaju električnim šemama sa grafičkim simbolima koji se koriste u elektrotehnici. Analiza tih kola se dalje obavlja primenom metoda koje su detaljno razrađene u elektrotehnici. Na ovaj način se brže i lakše dolazi do rezultata koristeći dobro poznati matematički aparat (fazorski i kompleksni račun, na primer) i razrađene principe analize.

Ovaj pristup se može uspešno primeniti u slučajevima kada su dimenzije akustičkih i mehaničkih elemenata male u odnosu na talasnu dužinu zvuka, pa se pomenuti sistemi mogu zameniti električnim kolima sa koncentrisanim parametrima.

Elektroakustički pretvarači predstavljaju sklopove na koje se veoma uspešno primenjuju analogije. Poznato je da se kod svih elektroakustičkih pretvarača akustička energija prvo pretvara u mehaničku, a zatim u električnu, ili obratno. Zbog toga kod elektroakustičkih pretvarača, kao što ćemo kasnije videti, i akustičke i mehaničke sklopove predstavljamo analognim električnim kolima. Elektroakustički pretvarači su dobri primeri složenih sistema kod kojih se električni, mehanički i akustički delovi mogu predstaviti jednom zajedničkom analognom električnom šemom.

Analogije između električnih, mehaničkih i akustičkih elemenata i sistema su samo formalne prirode i moguće su na osnovu sličnosti matematičkih izraza sa kojima su opisane pojave u ova tri sistema. Takođe, treba imati u vidu da nije moguće preslikavanje svih veličina i svih parametara u sva tri sistema.

U ovom poglavlju su prvo definisani elementi akustičkih (akustička kapacitivnost, induktivnost i otpornost) i mehaničkih (mehanička kapacitivnost, induktivnost i otpornost) sistema i objašnjena analogija između pojedinih akustičkih, mehaničkih i električnih veličina.

Drugi deo poglavlja je posvećen prikazivanju pojedinih akustičkih i mehaničkih sistema preko ekvivalentnih električnih šema. Posebna pažnja

je posvećenja prikazivanju međusobnih sprega ovih sistema preko ekvivalentnih električnih četvoropola.

5.2 Elementi akustičkih sistema

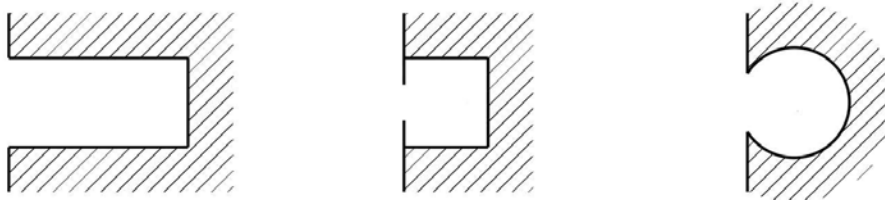
5.2.1 Akustička kapacitivnost

Akustički sklopovi i sistemi se u osnovi sastoje od vazdušnih komora međusobno povezanih cevima, otvorima ili prorezima.

Vazdušne komore se ponašaju kao opruge u mehanici, odnosno kao kondenzatori u elektrotehnici, pa ih otuda nazivamo akustičkim kapacitivnostima ili akustičkim elastičnostima i označavamo sa C_a . Ako je zapremina komore V , njena akustička kapacitivnost je:

$$C_a = \frac{V}{\rho \cdot c^2} \quad (5.1)$$

Ovde je interesantno da se na ulazu u komoru javlja protok iako je vazduh sa svih strana zatvoren krutim zidovima. Pojavu protoka omogućava elastičnost vazduha i on će biti utoliko veći ukoliko je veća elastičnost vazduha, odnosno ukoliko je veća akustička kapacitivnost komore C_a . Očigledno je da akustička kapacitivnost zavisi samo od zapremine komore, a ne i od njenog oblika, kako se vidi i iz izraza (5.1).



Slika 5.1 – Vazdušne komore različitih oblika

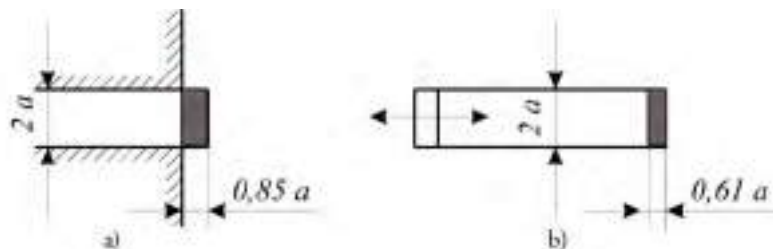
5.2.2 Akustička induktivnost

Proticanje vazduha kroz cevi praćeno je povećanjem kinetičke energije usled ubrzanja mase vazduha kada prolazi iz komore u cev i obratno. Zbog toga se cev ili otvor ponaša kao induktivnost čija vrednost m_a zavisi od dužine l i površine poprečnog preseka cevi S , na sledeći način:

$$m_a = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (5.2)$$

Prilikom proticanja vazduha kroz cev, pored mase vazduha u cevi, kreće se i deo mase u prostoru u koji cev zrači. Ovo kretanje je najintenzivnije pored samog otvora cevi, a sa udaljenošću od otvora postepeno opada. Zbog ove činjenice cev se ponaša kao da je duža od svoje

stvarne fizičke dužine l . Prividno produženje cevi zavisi od uslova njene ugradnje.



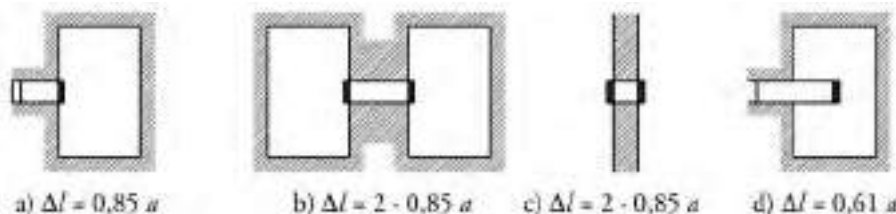
Slika 5.2 – Korekcija dužine cevi zavisno od načina ugradnje:
a) cev ugrađena u beskonačni zid, b) cev sa slobodnim krajem

Tako umesto izraza (5.2) možemo pisati da je akustička induktivnost:

$$m_a = \rho \cdot \frac{l_{ef}}{S}, \quad (5.3)$$

$$l_{ef} = l + \Delta l. \quad (5.4)$$

Iznos korekcije Δl zavisi od načina završetka cevi. Kada je završetak cevi u ravni sa zidom i kada zrači u polovinu neograničenog prostora, slika 5.2a, korekcija je $\Delta l = 0,85a$, gde je a poluprečnik cevi. Ako je kraj cevi završen slobodno i cev zrači u ceo prostor, slika 5.2b, onda je korekcija $\Delta l = 0,61a$.



Slika 5.3 – Različiti načini spajanja cevi sa komorom i odgovarajući iznosi korekcije dužine cevi

Korekcija se dodaje samo sa jedne strane kad se na ulaznoj strani cevi nalazi izvor zvuka kao što je klip, ili membrana, slika 5.3a i 5.3d. Ako se cev nalazi između dve komore, slika 5.3b, onda se korekcija uzima sa obe strane, pri čemu treba voditi računa da li su završeci cevi u ravni zida ili ne. Kada se radi o otvoru u zidu, slika 5.3c, takođe se korekcija uzima sa obe strane u iznosima koji odgovaraju slučaju cevi završene u ravni zida.

5.2.3 Akustička otpornost

Akustičku otpornost ili prigušenje imamo pri proticanju vazduha

kroz veoma uske cevi – kapilare, zatim kroz proreze ili pukotine. Kod veoma uskih cevi kružnog preseka, slika 5.4a, čiji je poluprečnik $a < \frac{1}{500\sqrt{f}}$, (f je frekvencija zvuka), akustička otpornost je data relacijom:

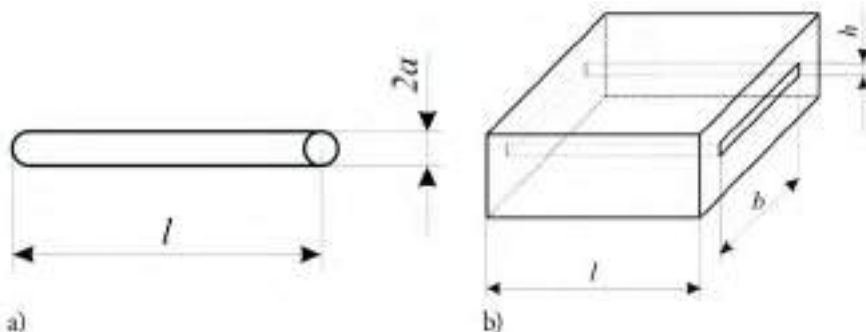
$$R_a = \frac{8 \cdot \mu \cdot l}{a^4 \cdot \pi}, \quad (5.5)$$

gde je l dužina cevi, a μ koeficijent viskoznosti za vazduh, koji ima vrednost $1,86 \cdot 10^{-5}$ kg/ms.

Akustička otpornost proreza dužine l , širine b i visine h , slika 5.4b, data je relacijom:

$$R_a = \frac{12 \cdot l \cdot \mu}{h^3 \cdot b}. \quad (5.6)$$

Akustička otpornost je posledica pojava koje dovode do gubitka akustičke energije prilikom prostiranja zvuka kroz elemente nekog akustičkog sistema. Naime, u svim onim slučajevima gde se javljaju razlike u brzini slojeva vazduha dolazi do pojave viskoznog trenja i gubitka akustičke energije. Kod cevi većeg preseka ovo se dešava samo u manjem perifernom delu, pa su gubici svedeni na ceo presek relativno mali. Zato ovakve cevi, iako imaju određenu akustičku otpornost, predstavljaju pretežno akustičku induktivnost.



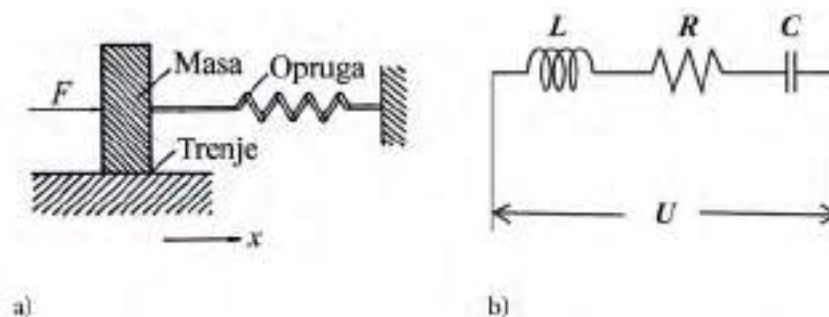
Slika 5.4 – Otporni elementi u akustici: a) uska cev kružnog preseka, b) uzani prorez

Slično u komori pored kompresije vazduha, u izvesnoj meri, dolazi i do pokretanja mase vazduha, naročito oko ulaznog otvora, pa i do trenja između čestica vazduha ako komora ima specijalan oblik. To znači, iako komora predstavlja pretežno akustičku kapacitivnost ona ima i određenu, istina malu, akustičku induktivnost i/ili akustičku otpornost. Iz prethodnog je jasno da i u akustici isto kao i u elektrotehnici nemamo elemente sa čistom akustičkom induktivnošću, kapacitivnošću i otpornošću. Kalemovi u elektrotehnici su pretežno induktivni elementi, ali uvek imaju određenu

otpornost i kapacitivnost. Slično je i sa kondenzatorima i otpornicima. Nikada ne predstavljaju čistu kapacitivnost odnosno čistu otpornost.

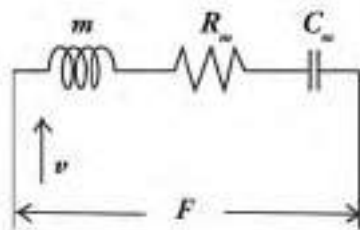
5.3 Elementi mehaničkih sistema

Analogna kola mehaničkih sklopova nešto su složenija od akustičkih. Mehaničke sile i pomeraži imaju intenzitet i pravac i predstavljaju vektorske veličine, dok su napon i struja u elektrotehnici skalari. Da bismo prevazišli ovu razliku ograničićemo se u mehanici na sklopove koji se kreću samo u pravcu jedne ose.



Slika 5.5 – a) Mehanički oscilatorni sistem sa jednim stepenom slobode,
b) Električno oscilatorno kolo.

Posmatrajmo mehanički sistem prikazan na slici 5.5a, gde je masa m izložena dejstvu spoljašnje sile F i vezana oprugom za nepomičan oslonac. Kretanje mase m moguće je samo u smeru x ose, i pri tome se javlja trenje između mase i podloge.



Slika 5.6 – Ekvivalentna električna šema mehaničkog sistema sa slike 5.5a.

Ovaj mehanički sistem se može predstaviti diferencijalnom jednačinom istog oblika kao i oscilatorno kolo prikazano na slici 5.5b. Pri tome napon U odgovara sili F , a struja I brzini kretanja mase v . Takođe postoji analogija između parametara kola: induktivnosti L i mase m , kapacitivnosti C i elastičnosti opruge C_m (recipročna vrednost koeficijenta krutosti opruge), otpornosti R i mehaničke otpornosti R_m (jednaka koeficijentu trenja između mase i podloge). Elastičnost opruge C_m se često naziva i mehanička kapacitivnost.

Ekvivalentno električno kolo mehaničkog sistema sa slike 5.5a prikazano je na slici 5.6. Sada za brzinu v u prikazanom mehaničkom sistemu važi relacija:

$$\underline{v} = \frac{F}{R_m + j \left[\omega \cdot m - \frac{1}{\omega \cdot C_m} \right]} . \quad (5.7)$$

Inače može se, za slične mehaničke sisteme uvesti opšti pojam mehaničke impedanse, dat relacijom:

$$\underline{Z_m} = \frac{F}{\underline{v}} . \quad (5.8)$$

Ova činjenica nam omogućava da u konkretnom mehaničkom sistemu možemo sile i brzine izračunati primenom već poznatih postupaka iz teorije električnih kola. Ovde se konkretno radi o klasičnom oscilatornom kolu čije je ponašanje detaljno proučeno u elektrotehnici.

5.4 Pregled analognih veličina

Na osnovu onoga što je rečeno u poglavljima 5.1 i 5.2 dat je, u tabeli 5.1, pregled odgovarajućih analognih veličina. Veličine koje odgovaraju jedne drugima u akustici, mehanici i elektrotehnici, i na čemu se zasniva ceo koncept analogija, navedene su u pojedinim redovima tabele 5.1. Uz ime svake od veličina data je i njena uobičajena oznaka.

Tabela 5.1 – Odgovarajuće veličine u akustici, mehanici i elektrotehnici

Akustička veličina	Mehanička veličina	Veličina u elektrotehnici
Pritisak, p	Sila, F	Napon, U
Akustički protok, q	Brzina, v	Struja, I
Akustička otpornost, R_a	Mehanička otpornost, R_m	Otpornost, R
Akustička induktivnost, m_a	Masa, m	Induktivnost, L
Akustička kapacitivnost, C_a	Mehanička elastičnost, C_m	Kapacitet, C
Akustička impedansa, Z_a	Mehanička impedansa, Z_m	Impedansa, Z

5.5 Ekvivalentne šeme akustičkih i mehaničkih sistema

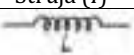
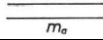
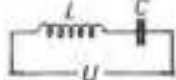
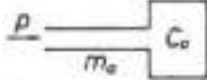
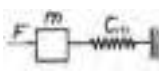
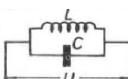
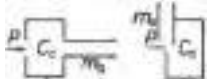
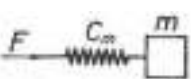
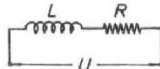
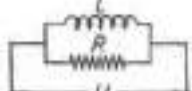
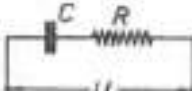
Akustički sistemi predstavljaju dva ili više međusobno povezanih akustičkih elemenata o kojima je prethodno bilo reči. Najprostiji od ovih sistema prikazani su u tabeli 5.2 zajedno sa svojim ekvivalentima u elektrotehnici [4]. Da bi se što lakše došlo do ekvivalentne šeme nekog složenijeg akustičkog sistema treba se držati nekoliko sledećih osnovnih pravila.

Svaki akustički sistem ima određeni broj komora i cevi ili otvora kojima su ove komore povezane. Svaku komoru predstavljamo akustičkom kapacitivnošću (tabela 5.2, redovi 4, 6, 7, 10, 11, 15, 18 i 19), a svaku cev ili otvor akustičkom induktivnošću (tabela 5.2, redovi 3, 6, 7, 9, 12, 13, 18 i 19) ili rednom vezom akustičke induktivnosti i otpornosti (tabela 5.2, red 8). Veoma uske otvore ili proreze predstavljamo akustičkom otpornošću (tabela 5.2 redovi 5, 8, 9, 10, 11, 16, 17, 18 i 19).

Najpre treba odrediti protoke svih akustičkih induktivnosti. Zatim je važno uočiti postojanje „rednih“ ili „paralelnih“ veza elemenata. Redno su povezani oni elementi koji imaju isti akustički protok (redovi 6, 8, 10, 12, 16 i 18 u tabeli 5.2), a paralelno oni kod kojih svaki ima samo jedan deo ukupnog protoka (redovi 7, 9, 11, 13, 15, 17 i 19 u tabeli 5.2).

Svaka akustička kapacitivnost treba da ima jedan kraj u ekvivalentnoj šemi vezan na masu. Zato se svi akustički elementi koji su povezani sa komorom – odnosno akustičkom kapacitivnošću, nalaze u ekvivalentnoj električnoj šemi na istom potencijalu, jednakom potencijalu neuzemljenog kraja akustičke kapacitivnosti.

Tabela 5.2 – Ekvivalentne veze u elektrotehnici, akustici i mehanici [4]

R. br.	Elektrotehnika	Akustika	Mehanika
1	Napon (U)	Zvučni pritisak (p)	Sila (F)
2	Struja (I)	Protok (q)	Brzina (v)
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

11			
12			
13			Nema
14		Nema	
15			
16		Kao akustičke induktivnosti	Kao opruge u mehanici
17			
18			
19			

5.6 Primeri akustičkih sistema

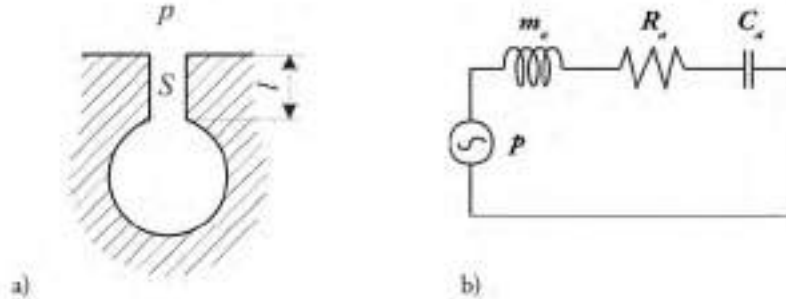
Jedan od akustičkih sistema koji se sreće u različitim oblicima je Helmholtzov (H. Helmholtz) rezonator. To je komora zapremine V sa otvorom u obliku cevi čija je dužina l i površina poprečnog preseka S (koji se obično naziva vrat rezonatora), slika 5.7. Kao što smo već rekli zapremina predstavlja akustičku kapacitivnost datu relacijom:

$$C_a = \frac{V}{\rho \cdot c^2}.$$

Na red sa ovom kapacitivnošću povezana je akustička induktivnost vrata koja iznosi:

$$m_a = \frac{\rho \cdot (l + \Delta l)}{S},$$

gde je $\Delta l = 1,7a$ korekcija dužine vrata rezonatora definisana u 5.1.2.

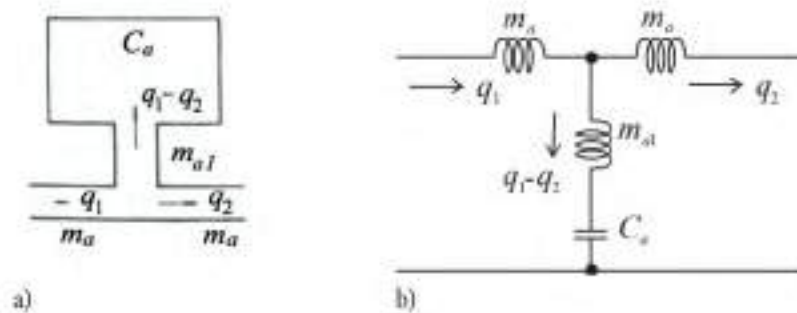


Slika 5.7 – Helmholtcov rezonator

Kao posledica trenja u vratu rezonatora, prilikom proticanja vazduha kroz njega, javlja se akustička otpornost R_a . Sva tri ova elementa imaju isti akustički protok, pa je kompletna ekvivalentna električna šema rezonatora prikazana na slici 5.7b. Ovo je rezonantno kolo čija je frekvencija rezonanse data relacijom:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{m_a \cdot C_a}}.$$

Akustička impedansa kola je minimalna na rezonansi i iznosi $Z_a = R_a$.



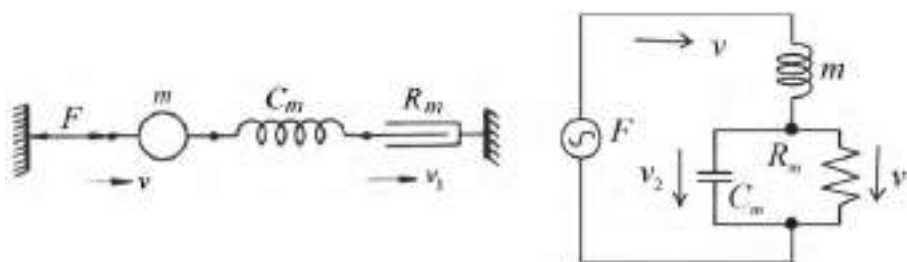
Slika 5.8. Filtar nepropusnih opsega a) izgled akustičkog sistema, b) ekvivalentna šema

Jedan uprošćen oblik filtra nepropusnika opsega frekvencija sa rezonantnim kolom u paralelnoj grani prikazan je na slici 5.8a. Protoci akustičkih masa m_{a1} i m_{a2} su q_1 i q_2 . Protok komore i ulazne cevi u komoru je isti i jednak je razlici ulaznog i izlaznog protoka, što znači da iznosi $q_1 - q_2$. Idući sleva nadesno ulazni protok se deli na protok komore sa ulaznom cevi, $q_1 - q_2$, i izlazni protok q_2 . Ako se zna da kapacitivnost komore mora jednim krajem biti uzemljena onda je lako doći do ekvivalentne električne šeme

prikazane na slici 5.8b. Ovakav filter se koristi kod ventilacionih sistema kada u kanalima treba oslabiti osnovnu frekvenciju buke ventilatora.

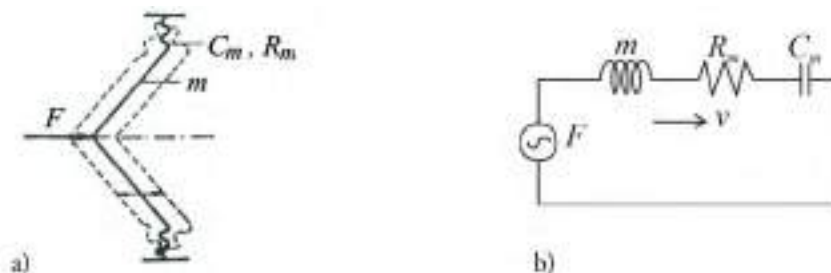
5.7 Primeri mehaničkih sistema

U tabeli 5.2 prikazani su prosti slučajevi mehaničkih sistema takve konfiguracije da svi elementi sistema imaju istu brzinu ili su izloženi dejstvu iste sile. Kod složenijih mehaničkih sistema postupak oko dobijanja ekvivalentne šeme nije uvek jednostavan. Pri tome treba voditi računa da zbir brzina u svim čvorovima kola bude jednak nuli, kao i da se kolo na kraju zatvori.



Slika 5.9. Mehanički sistem sa tri elementa:
a) šematski prikaz, b) ekvivalentna električna šema

Tako u primeru datom na slici 5.9a ulaznu brzinu, odnosno brzinu sile F označili smo sa v . To je ujedno i brzina mase m , pa su generator sile F i masa m vezani na red. Jedan kraj otpornosti R_m je vezan fiksno, a drugi vibrira brzinom v_1 . Brzina mehaničke elastičnosti C_m sada je jednaka razlici brzina $v - v_1 = v_2$. Iz prethodnog zaključujemo da su C_m i R_m u paralelnoj vezi. Ekvivalentno električno kolo prikazano je na slici 5.9b.



Slika 5.10. Pokretna membrana (u vakuumu) kao mehanički sistem: a) šematski prikaz, b) ekvivalentna električna šema

Membrana kao mehanički element ima veliku primenu u akustici jer se nalazi u sastavu svakog elektroakustičkog pretvarača. U svrhu dalje analize pretpostavimo da se radi o krutoj membrani, kružnog oblika, mase m , slika 5.10. Ona je za nepomičan oslonac vezana pomoću elastičnih

prstenova fiksiranih po obodu. Ovi elastični elementi služe i kao nosač membrane i kao vođice pri kretanju membrane u pravcu ose. Elastičnost nosećih elemenata membrane nazivamo još i „elastičnost vešanja membrane“ i označavamo je sa C_m . U elementima vešanja postoji, usled njihovog stalnog deformisanja tokom rada membrane, i trenje, koje označavamo ekvivalentnom mehaničkom otpornošću R_m .

Ako za sada izostavimo impedansu zračenja membrane (koja bi trebalo da se pojavi u kolu kao dodatno opterećenje), dobijamo ekvivalentnu šemu u vidu prostog rednog oscilatornog kola u kojem svi elementi imaju istu brzinu, slika 5.10b.

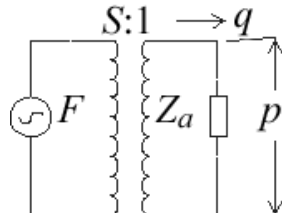
5.8 Sprega akustičkih i mehaničkih sistema

Kako smo prethodno rekli mehanička impedansa je definisana izrazom (5.7). S druge strane moguće je za klipnu membranu, slika 1.1, površine S , koja vibrira brzinom v , pod uticajem sile F i pri tome stvara akustički pritisak p , uspostaviti sledeće relacije:

$$F = p \cdot S \quad \text{i} \quad (5.9)$$

$$v = \frac{q}{S} \quad (5.10)$$

gde je q protok koji stvara membrana.



Slika 5.11 – Sprega između mehaničkog i akustičkog dela ekvivalentnog kola pomoću idealnog transformatora

Ako sada u jednačini (5.7) zamenimo vrednosti za silu F i brzinu v iz izraza (5.9) i (5.10), dobijamo:

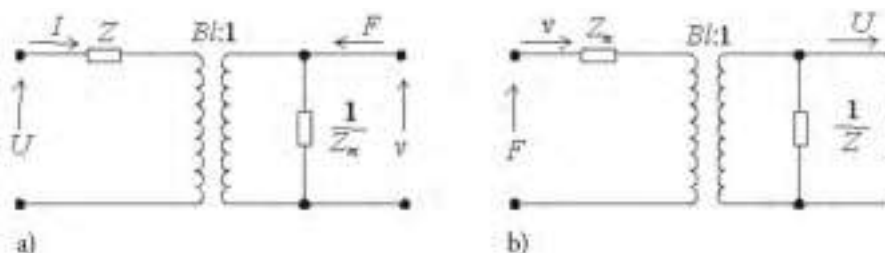
$$Z_m = \frac{F}{v} = \frac{p \cdot S}{q/S} = \frac{p}{q} \cdot S^2 = Z_a \cdot S^2, \quad (5.11)$$

gde je Z_a akustička impedansa klipne membrane.

Jednačine od 5.9 do 5.11 potpuno odgovaraju jednačinama idealnog transformatora u elektrotehnici čiji je prenosni odnos S . Na primarnoj strani transformatora, slika 5.11, su mehaničke veličine sila F i brzina v , a na sekundarnoj akustičke veličine pritisak p i protok q . Kod ovog transformatora namotaj sa S puta više „navojaka“ nalazi se u mehaničkom kolu.

5.9 Sprega električnih i mehaničkih sistema

Najbolji primer sprege akustičkih, mehaničkih i električnih sistema su elektroakustički pretvarači. Tu se električna energija pretvara u mehaničku, a mehanička u akustičku i obratno. Elektroakustičke pretvarače možemo predstaviti kao četvoropole, tj. elemente sa dva para pristupnih krajeva. Na jednom pristupu (strani) su električne veličine: napon U i struja I , a na drugom mehaničke: sila F i brzina v .



Slika 5.12 – Elektrodinamički pretvarač kao četvoropol: a) električne veličine na ulaznoj strani, b) mehaničke veličine na ulaznoj strani.

Veze između ovih veličina zavise od tipa pretvarača, što u okviru ove knjige neće biti dalje analizirano. Jedino ćemo kao primer, bez izvođenja, navesti način prikazivanja ove sprege kod elektrodinamičkog pretvarača, kako je prikazano na slici 5.12.

5.10 Pitanja za proveru znanja

1. Pod kojim uslovima se mogu primeniti elektrokustičke analogije za rešavanje problema akustike?
2. Kakva je priroda analogija između električnih, mehaničkih i akustičkih elemenata i sistema?
3. Iz čega se sastoje akustički sklopovi i sistemi?
4. Od čega zavisi akustička kapacitivnost komore?
5. Sa kojim elementima, u mehanici i elektrotehnici, se ponašaju slično vazdušne komore?
6. Koliko iznosi akustička kapacitivnost komore čija je zapremina V ?
7. Kako se ponaša cev ili otvor u akustici?
8. Koliko iznosi efektivna dužina cevi u akustici i od čega zavisi?
9. Kako se ponašaju veoma uske cevi - kapilare, pukotine i prorezi u akustičkim sklopovima?
10. Navesti veličine koje se analogno ponašaju u akustičkim, mehaničkim i električnim sistemima.

5.11 Literatura

- [1] L.L. Beranek, *Acoustics*, McGraw-Hill, 1954.
- [2] H.F. Olson, *Acoustical Engineering*, D.Van Nostrand Company, Inc., 1957.
- [3] J. Merhaut, *Theory of Electroacoustics*, McGraw-Hill, 1981.
- [4] H.Š. Kurtović, *Osnovi tehničke akustike*, Naučna knjiga, Beograd 1982.
- [5] P.Pravica, D. Drinčić, *Elektroakustika*, VIŠER, Beograd, 2008.
- [6] L.L Beranek and T.J. Mellow, *Acoustics, Sound Fields and Transducers*, Elsevier, 2012.
- [7] M. Kleiner, *Electroacoustics*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.

Mikrofoni

6.1 Uvod

Mikrofoni su elektroakustički pretvarači koji akustičku energiju pretvaraju u električnu. Drugim rečima, oni akustičke oscilacije u vazduhu pretvaraju u električne. Pri tome mikrofoni reaguju na promene zvučnog pritiska ili na promene brzine čestica u zvučnom polju koje ih okružuje.

Proces pretvaranja akustičke energije u električnu uvek prolazi kroz dve faze gde se u prvoj akustička energija pretvara u mehaničku, a zatim mehanička u električnu. Zato svaki mikrofoni ima mehanički oscilatorni sistem sa pokretnom membranom na koju deluju zvučni talasi. Membrana je u ovakvom sistemu vezana elastično tako da se u odsustvu spoljne sile vraća u svoj početni položaj.

Osnovni zadatak koji mikrofoni kao pretvarač treba da ispuni je da električne promene na njegovom izlazu budu što vernija slika akustičkih promena. Savremeni mikrofoni su usavršeni do te mere da imaju vernost reprodukcije koja se može meriti sa originalom. Najkvalitetniji među njima imaju konstantnu osetljivost na zvučni pritisak u celom čujnom području frekvencija.

Prvi pokušaji realizacije mikrofona (tzv. „kontaktni“ mikrofoni) potiču još od 1854. godine. Rajs (Reis) je 1861. godine pokazao princip rada i demonstrirao primenu prvog kontaktnog mikrofona (gde je metalna membrana pri oscilovanju, pod uticajem zvučnih talasa uspostavljala i prekidala kontakt). Međutim, prvi upotrebljiv mikrofoni, u okviru telefonskog aparata, patentirao je Bel (Bell) 1876. godine. 1890. godine uveden je u primenu mikrofoni koji je veoma sličan današnjem ugljenom mikrofoni. Dalji doprinos usavršavanju mikrofona dali su prvenstveno fizičari koji su nastojali da mere zvučne pojave. Tako se 1917. godine pojavio elektrostatički mikrofoni, a tokom 1924. godine elektrodinamički mikrofoni sa trakom, a zatim elektrodinamički mikrofoni sa kalemom. 1931. godine uvodi se u proizvodnju kristalni mikrofoni. Elektret materijali su poznati još od 1885. godine ali su prvi elektret mikrofoni, otporni na uticaj temperature i vlage, uvedeni u proizvodnju tek početkom šezdesetih godina prošlog veka.

Danas postoji veliki broj varijanti mikrofona svih vrsta, koji se razlikuju po kvalitetu, mogućnostima i ceni i od kojih svaki nalazi svoju, specifičnu, primenu.

Mikrofoni, kao elektroakustički pretvarači dele se na neposredne ili prave i posredne ili relejne. Proces pretvaranja energije kod neposrednih mikrofona odvija se bez trošenja energije nekog spoljnog izvora i reverzibilan je, odnosno, može da se odvija u oba smera. Drugim rečima, reverzibilni mikrofon može da radi i kao zvučnik. Međutim, dobar mikrofon nije i dobar zvučnik, pa se u praksi pretvarači ipak optimiziraju za jedan smer pretvaranja, što za sobom povlači njihovu različitu konstrukciju. Kod nekih neposrednih pretvarača postoje u kolu izvori stalnog napona ili stalni magneti, koji ovde samo stvaraju uslove za odvijanje procesa pretvaranja.

Kod posrednih pretvarača, međutim, u procesu pretvaranja troši se energija spoljašnjeg izvora. Tu se radi o takozvanom „relejnem” principu kod kojeg se ulazna energija koristi za regulisanje prenosa energije od pomoćnog izvora do izlaza pretvarača. Zbog toga kod ovih pretvarača izlazna snaga može biti veća od ulazne pa oni delom rade ne samo kao pretvarači već i kao pojačavači. Posredni pretvarači, očigledno, ne mogu biti reverzibilni.

Prvi deo ovog poglavlja fokusiran je na definiciju osnovnih karakteristika mikrofona. Zatim je objašnjena podela mikrofona i detaljnije prikazani principi rada presionih, gradijentnih i kombinovanih mikrofona. Dalje se govori o uticaju oblika i dimenzija mikrofona na njegove karakteristike i objašnjava ponašanje usmerenih mikrofona u difuznom zvučnom polju.

U drugom delu poglavlja izloženi su detalji konstrukcije pojedinih tipova mikrofona (ugljeni, elektrodinamički, piezoelektrični, kondenzatorski, elektret) sa tačke gledišta njihove električne podele.

6.2 Osnovne karakteristike mikrofona

Osnovne karakteristike mikrofona su: faktor pretvaranja ili osetljivost, frekventijska karakteristika, karakteristika usmerenosti ili karakteristika direktivnosti, faktor usmerenosti, dinamički opseg, impedansa i izobličenja.

6.2.1 Osetljivost mikrofona

Da bi odredili nivo signala na ulazu u audio sistem potrebno je znati nivo signala na izlazu iz mikrofona, koji je postavljen u slobodno zvučno polje (zvučno polje progresivnih talasa) poznatog nivoa L_p . Preporučuje se da to bude nivo od 94 dB (1 Pa).

Jedan od najznačajnijih podataka koji se koristi u sistemima za pojačanje zvuka, snimanje i reprodukciju, i koji često prouzrokuje veliki broj nesporazuma, je baš nivo signala na izlazu mikrofona ili osetljivost mikrofona.

Da bi dobili osetljivost mikrofona potrebno je njegov izlazni napon izraziti u funkciji zvučnog pritiska. Podatak o osetljivosti mikrofona omogućava nam da uporedimo različite mikrofone istog proizvođača ili mikrofone različitih proizvođača.

Osetljivost ili faktor pretvaranja mikrofona je veličina koja prikazuje mikrofona kao generator elektromotorne sile. Izraz osetljivost potiče otuda što se ovde radi o prijemniku, konkretno prijemniku zvuka. Osetljivost se označava sa s , a faktor pretvaranja sa $T_{E,p}$, a radi se o jednoj istoj veličini definisanoj kao:

$$T_{E,p} = s = \frac{E}{p}, \quad (6.1)$$

gde je: E - elektromotorna sila na otvorenim krajevima mikrofona, p - zvučni pritisak u slobodnom zvučnom polju (polje progresivnih ravnih talasa) na mestu gde se nalazi mikrofona.

Osetljivost mikrofona se izražava u V/Pa ali se iz praktičnih razloga često daje i u mV/Pa. Osetljivost se često izražava u dB, kada se naziva indeks pretvaranja i označava sa S_v ili sa $Ind. T_{E,p}$. Pri tome se vrši poređenje datog mikrofona sa jednim hipotetičnim standardnim mikrofonom čija je osetljivost E_0/p_0 , gde su E_0 i p_0 tačno definisane vrednosti. Dakle, indeks pretvaranja mikrofona možemo izraziti u sledećem obliku:

$$Ind. T_{E,p} = S_v = 20 \log \frac{E/p}{E_0/p_0}, \quad [dB]. \quad (6.2)$$

Različiti proizvođači uzimaju različite osetljivosti mikrofona za poređenje. Napon na otvorenim krajevima je uvek $E_0 = 1$ V, a zvučni pritisak najčešće $p_0 = 1$ Pa (94 dB).

Indeks pretvaranja može se tada napisati u obliku:

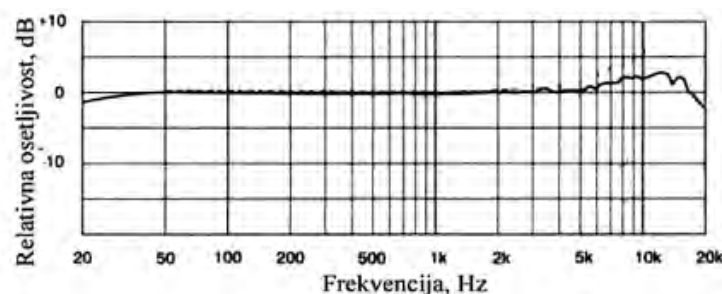
$$S_v = 20 \log E - L_p + 94, \quad [dB]. \quad (6.3)$$

gde je E napon (izražen u V) na izlazu mikrofona pri nivou zvučnog pritiska od L_p dB.

Ako nije drugačije navedeno osetljivost se uvek odnosi na napon neopterećenog mikrofona, na frekvenciju 1000 Hz i na smer s prednje strane mikrofona normalno na ravan membrane. Osetljivost mikrofona obično iznosi deo milivolta ili nekoliko milivolti, pri zvučnom pritisku od 1 Pa, pa se prema jednačini (6.3) uvek dobija veliki negativni iznos u decibelima. Taj iznos nam govori za koliko dB treba pojačati izlazni napon mikrofona, dobijen pri pritisku od 1 Pa, da bi se dostigla vrednost od 1 V, što predstavlja veličinu napona koji se razvodi po audio instalacijama.

6.2.2 Frekvencijska karakteristika

Frekvencijska karakteristika mikrofona predstavlja promenu osjetljivosti, izraženu u dB, u funkciji frekvencije, i daje se u obliku dijagrama, kako je prikazano na slici 6.1. Vrednosti na frekvencijskoj karakteristici su normalizovane na vrednost osjetljivosti mikrofona na 1000 Hz, što predstavlja referentnu osjetljivost (0 dB). Frekvencijska karakteristika se obično daje za smer dolaska zvučnih talasa spreda, po osi mikrofona. Kada se radi o usmerenim mikrofonom može se sresti frekvencijska karakteristika i za druge smerove dolaska zvučnih talasa, recimo pod uglom od 180°.



Slika 6.1 - Frekvencijska karakteristika jednog tipičnog kardioidnog mikrofona

Iz frekvencijske karakteristike se vidi kolika su kolebanja osjetljivosti mikrofona u odnosu na referentnu vrednost na 1 kHz, kao i kolika je širina radnog područja mikrofona. Kvalitetni studijski mikrofoni imaju približno ravnu karakteristiku u opsegu frekvencija od 30 Hz do 18 kHz, dok merni mikrofoni pokrivaju još šire područje sa skoro idealno ravnom frekvencijskom karakteristikom.

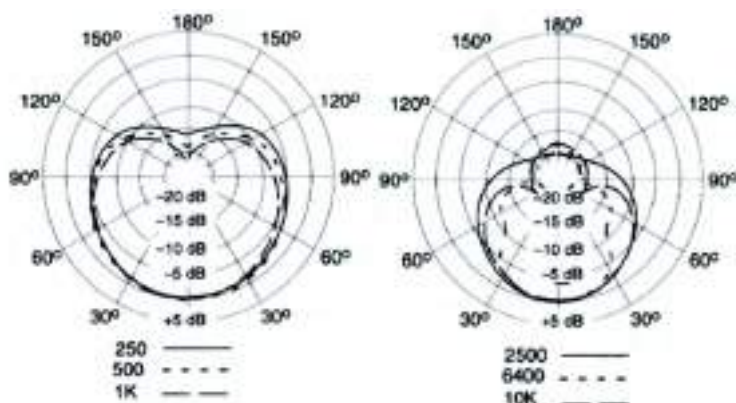
6.2.3 Karakteristika usmerenosti

Osetljivost mikrofona je u opštem slučaju različita za različite smerove dolaska zvučnih talasa. Po pravilu je najveća kada zvučni talasi dolaze iz smera normalnog na ravan membrane, odnosno iz smera ose mikrofona. Karakteristika usmerenosti mikrofona, u određenoj ravni i za određenu frekvenciju, definisana je izrazom:

$$\Gamma(\theta)_v = \frac{T_\theta}{T_0}, \quad (6.4)$$

gde je: θ -ugao koji sa osom mikrofona zaklapa pravac dolaska zvučnih talasa,
 T_θ - osjetljivost mikrofona pod uglom: θ ,
 T_0 - osjetljivost mikrofona u smeru ose.

Mikrofoni su najčešće simetrični u odnosu na osu, pa je karakteristika usmerenosti ista za sve ravni koje prolaze kroz osu mikrofona. Ako to nije slučaj, onda se daje karakteristika usmerenosti u horizontalnoj ravni koja ima najveći praktični značaj, pošto su izvori čiji zvuk mikrofoni obično raspoređeni u horizontalnoj ravni.



Slika 6.2 – Karakteristike usmerenosti osno simetričnog mikrofona na različitim frekvencijama

Karakteristika usmerenosti $\Gamma(\theta)$ za određenu frekvenciju, slika 6.2, crta se u polarnom dijagramu, u funkciji ugla θ i sa potegom datim u dB u odnosu na vrednost osetljivosti u smeru ose mikrofona. Korak za prikazivanje vrednosti potega je 5 dB ili 10 dB. Mogu se naći i dijagrami usmerenosti na kojima je vrednost potega data u linearnoj razmeri, u opsegu od 0 do 1, sa ekvidistantnim korakom.

6.2.4 Faktor usmerenosti

Usmerenost mikrofona se može, umesto dijagramom, izraziti jednim brojem preko veličine koja se naziva faktorom usmerenosti mikrofona i definisana je izrazom:

$$\gamma_m = \frac{4\pi}{\int_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_m}, \quad (6.5)$$

gde je Ω_m - „efektivni“ prostorni ugao mikrofona.

Kako se vidi iz izraza (6.5) faktor usmerenosti mikrofona predstavlja odnos akustičke energije koju u difuznom zvučnom polju prima neusmereni mikrofoni i energije koju pod istim uslovima prima usmereni mikrofoni, iste osetljivosti u smeru ose. Ova dva mikrofona bi u slobodnom zvučnom polju, okrenuta prema izvoru, dala jednake elektromotorne sile na svojim izlazima.

Efektivni prostorni ugao mikrofona Ω_m je zamišljeni prostorni ugao u kome bi mikrofoni trebalo da ima konstantnu osetljivost jednaku Γ_0 , a da mu osetljivost izvan tog ugla bude jednaka nuli.

Faktor usmerenosti mikrofona se može dati i u decibelima, kao $10 \log \gamma_m$, a tada se naziva indeks usmerenosti. Jasno je da se ovde upoređivanje vrši sa neusmerenim mikrofonom kod kojeg je $\gamma_m = 1$.

6.2.5 Dinamički opseg mikrofona

Dinamički opseg mikrofona predstavlja razliku između nivoa najjačeg i najslabijeg zvuka koji mikrofoni može preneti, uz određeni definisani iznos izobličenja.

Donja granica dinamičkog opsega određena je nivoom sopstvenog šuma mikrofona koji se javlja na njegovom izlazu. Ovaj šum predstavlja termički šum unutrašnje otpornosti mikrofona i on postoji i kada su svi spoljnji uzroci smetnji otklonjeni i kada nema zvučnog signala.

Radi se o belom šumu, sa konstantnim spektralnim nivoom, čiji je napon dat relacijom:

$$E_{TN} = \sqrt{4KTR\Delta f} = \sqrt{1,64 \cdot 10^{-20} R \Delta f}, \quad (6.6)$$

gde je: K – Bolcmanova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K),

T – temperatura u Kelvinovim stepenima,

R – unutrašnja otpornost mikrofona u omima,

Δf – širina propusnog opsega mikrofona u Hz.

Iz izraza (6.6) se dobija da je nivo termičkog šuma L_{TN} u odnosu na 1V, u opsegu od 1Hz, na otpornosti od 1 Ω jednak -198 dB [L_{TN} (1 Hz, 1 Ω) = $10 \log 4KT = -198$ dB]. U opštem slučaju, nivo šuma u odnosu na 1V je:

$$L_{TN} = -198 + 10 \log \Delta f + 10 \log R, \text{ [dB]}, \quad (6.7)$$

Nivo šuma ni kod najboljih mikrofona nije dovoljno nizak da bi mikrofoni, u opsegu srednjih frekvencija, mogli preneti tako male nivoe zvuka koje može da čuje čovečje uvo. Ipak on je daleko niži od nivoa šuma koji unose ostali uređaji u elektroakustičkom lancu.

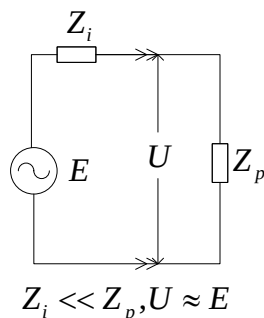
Nivo šuma na izlazu mikrofona zavisi i od reaktivnog dela unutrašnje impedanse mikrofona kao i od ulazne impedanse mikrofonskog pretpojačavača, s tim što su izvori napona šuma samo čiste otpornosti u kolu, dok reaktanse mogu da utiču na njegovu spektralnu raspodelu. Nivo šuma često se daje, preračunat u odgovarajući nivo zvuka na ulazu mikrofona, izražen u dB ili dBA.

Dinamički opseg mikrofona ograničen je sa gornje strane izobličenjima koja nastaju usled prevelikog pomeraja membrane pri visokim nivoima zvuka. Obično se daje maksimalni ulazni nivo mikrofona pri ukupnim harmonijskim izobličenjima izlaznog signala od 1 %. Kod kvalitetnih mikrofona ova granica se kreće u opsegu od 125 dB do 150 dB.

Ekvivalentni nivo šuma je između 15 dB i 35 dB, a dinamički opseg od 90 dB do 135 dB.

6.2.6 Impedansa mikrofona

Impedansa mikrofona je podatak koji nam govori kako se mikrofon ponaša kao generator i kako ga treba priključiti na ulaz pretpojačavača. Vrednost impedanse mikrofona koja se daje u njegovim podacima obično se odnosi na frekvenciju od 1 kHz. Prema vrednosti impedanse mikrofona delimo na one sa niskom impedansom (najčešće $200\ \Omega$) i one sa visokom impedansom (obično $50\ \text{k}\Omega$). Kod priključivanja mikrofona vodi se računa o prilagođenju po naponu. To znači da impedansa potrošača Z_p treba da bude znatno veća od unutrašnje impedanse mikrofona Z_i , slika 6.3. U tom slučaju je izlazni napon priključenog mikrofona U vrlo približno jednak njegovoj elektromotornoj sili E i ne zavisi od promene unutrašnje impedanse.



Slika 6.3 – Naponsko prilagođenje mikrofona na pretpojačavač

Iza mikrofona sa niskom izlaznom impedansom može se priključiti duži kabl a da to nema uticaja na gornju graničnu frekvenciju prenosnog puta. Međutim, mikrofone sa visokom izlaznom impedansom treba priključiti što kraćim provodnicima na ulaz pretpojačavača.

6.2.7 Step en iskorišćenja

Step en iskorišćenja mikrofona je veoma mali i obično se kreće između 0,1% i 1 %. Razloga za to ima više. Pre svega, deo zvučne energije koja stiže do membrane mikrofona reflektuje se i vraća u okolni prostor. Preostali deo pokreće membranu pretvarajući se pri tome u mehaničkim, akustičkim i električnim elementima u toplotu. Slabo prilagođenje akustičke impedanse zvučnih talasa na mehaničku impedansu membrane, kao i postupak dvostrukog pretvaranja energije, najpre akustičke u mehaničku, pa onda mehaničke u električnu, glavni su razlozi za ovako mali step en iskorišćenja mikrofona.

Jedino je kod ugljenog mikrofona dobijena snaga i do deset puta veća od primljene. Ali ovaj dobitak ide na račun energije izvora. Ugljeni mikrofon

je posredni pretvarač ili „rele“, koji upravlja strujom izvora pa je zato njegov izlazni signal mnogo puta veći nego kod ostalih vrsta mikrofona.

6.2.8 Izobličenja

Pomeraji membrane mikrofona su, i pri velikim vrednostima zvučnog pritiska, veoma mali tako da nelinearnost kretnog sistema nema nikakvog značaja. Kod presionog elektrodinamičkog mikrofona sa kalemom, pri zvučnom pritisku od 10 Pa (114 dB), amplituda pomeraja membrane je manja od 10 μm . Kod elektrodinamičkog mikrofona sa trakom, pri istim ovim uslovima, amplituda pomeraja je znatno veća, ali bez obzira na to ni pri najvećim vrednostima pritiska koje mikrofona treba da prenese ukupna harmonijska izobličenja ne prelaze vrednost od 1 %. Jedino ugljeni mikrofona ima velika harmonijska izobličenja, ali se on uvek koristi u slučajevima gde se ne zahteva posebna vernost prenosa i gde izobličenja nisu od primarnog značaja.

Neke vrste mikrofona imaju sposobnost da verno prenose tranzijentne signale (kao što su recimo pravougaoni signali), dok je kod drugih ta sposobnost manja. Dobre tranzijentne karakteristike imaju elektrodinamički mikrofona sa trakom. Međutim pojedine vrste mikrofona nemaju ovu osobinu i u postupku pretvaranja signala mogu govoru dati poseban karakter ili specifično obojiti neke muzičke tonove. Tako recimo mikrofona koji rade u režimu inercijalnog kočenja (radno područje je iznad rezonanse kretnog sistema) ističu tonalitet niskih frekvencija i dobro reprodukuju boju instrumenata. Mikrofona koji rade u režimu elastičnog kočenja (radno područje je ispod rezonanse kretnog sistema) imaju pretežno visok tonalitet, bogatu sonornost i dobru razumljivost govora. Mikrofona sa rezonantnom frekvencijom u sredini radnog područja imaju svetlu boju tona ali uvek u izvesnoj meri izobličavaju boju glasa i instrumenata.

6.3 Podela mikrofona

Postoji mnogo različitih vrsta mikrofona i mnogo kriterijuma prema kojima ih je moguće podeliti. Tako mikrofona delimo prema nameni, prema načinu korišćenja, prema karakteristici usmerenosti, prema fizičkoj veličini zvučnog polja (pritisak, brzina čestica) koja izaziva kretanje membrane, prema načinu generisanja elektromotorne sile itd. Zadnja dva kriterijuma (veličina zvučnog polja koja izaziva kretanje membrane i način generisanja elektromotorne sile mikrofona) su posebno značajni kod proučavanja načina rada i konstrukcije mikrofona i na njima se zasnivaju akustička i električna podela mikrofona.

6.3.1 Akustička podela mikrofona

Akustička podela mikrofona uzima u obzir način na koji promene u zvučnom polju izazivaju kretanje membrane. Prema ovoj podeli razlikujemo:

- presione mikrofone ili mikrofone koji rade na pritisak, kod kojih su brzina ili pomeraj membrane srazmerni pritisku u zvučnom polju;
- gradijentne mikrofone ili mikrofone koji rade na razliku pritiska, kod kojih su brzina ili pomeraj membrane srazmerni gradijentu pritiska u zvučnom polju,
- kombinovane mikrofone ili mikrofone kod kojih na kretanje membrane utiču, kombinovano, i pritisak i gradijent pritiska.

Svaka prethodno pomenuta klasa mikrofona ima specifične oblike karakteristike usmerenosti. Tako je kod presionih mikrofona karakteristika usmerenosti kružna, kod gradijentnih bidirekciona (dvokružna ili osmica), a kod kombinovanih imamo različite forme kardioidne karakteristike.

6.3.2 Električna podela mikrofona

Električna podela se zasniva na fizičkim principima koji su iskorišćeni kod pretvaranja oscilacija kretnog sistema u elektromotornu silu na izlazu mikrofona. Najznačajnije grupe mikrofona prema ovoj podeli su: ugljeni, elektrodinamički (sa kalemom i sa trakom), piezoelektrični ili kristalni i elektrostatički (kondenzatorski i elektret).

Ugljeni ili kontaktni mikrofoni su oni kod kojih se u električnom kolu javlja promenljiva struja zbog promene kontakata ugljenih zrnaca pri kretanju membrane.

Elektrodinamički mikrofoni sa kalemom imaju provodnik u obliku kalema koji se nalazi u magnetnom polju stalnog magneta. Kretanje kalema ima za posledicu stvaranje napona proporcionalnog brzini kalema, dužini provodnika u kalemu i gustini magnetnog fluksa u procepu.

Elektrodinamički mikrofon sa trakom ima tanku metalnu traku koja se nalazi u magnetnom polju stalnog magneta. Pomeranje trake prouzrokuje pojavu napona koji je proporcionalan brzini trake, dužini trake, gustini magnetnog fluksa u vazdušnom procepu i odnosu transformacije prilagodnog transformatora koji se nalazi u sastavu ovog mikrofona.

Piezoelektrični ili kristalni mikrofon ima tzv. „bimorf“ element od kristala ili keramike. Mehaničke deformacije ovog elementa, izazvane kretanjem membrane dovode do pojave električnog opterećenja na elektrodama koje taj element obuhvataju.

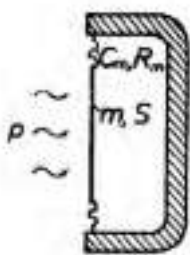
Kondenzatorski mikrofon se sastoji od pokretne membrane postavljene na određenom rastojanju od nepokretne zadnje ploče. Između membrane i zadnje ploče deluje jednosmerni polarizacioni napon. Kada je

polarizacioni napon konstantan oscilacije membrane izazivaju odgovarajuće promene izlaznog napona.

Elektret mikrofon se sastoji od pokretne samopolarizovane membrane, postavljene na odgovarajućem rastojanju od nepokretne zadnje ploče. Promena amplitude pomeranja membrane dovodi do odgovarajućih promena izlaznog napona.

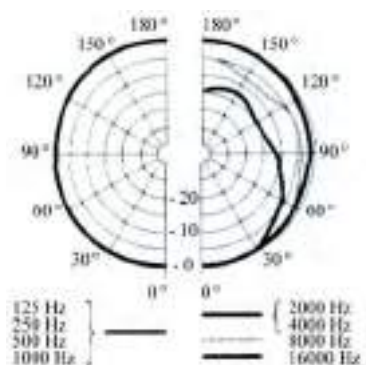
6.4 Presioni mikrofoni

Presioni mikrofoni imaju samo jednu stranu membrane izloženu dejstvu zvučnih talasa, slika 6.4. Karakteristiku usmerenosti im je kružna pa kažemo da su nedirektivni ili neusmereni.



Slika 6.4 – Skica presionog mikrofona

To je zbog toga što oni rade na pritisak koji je skalarna veličina koja nema pravac i smer delovanja. Na višim frekvencijama, gde dimenzije mikrofona postaju uporedive sa talasnom dužinom zvuka, usled difrakcije i povećanja pritiska na membranu u smeru ose mikrofona, karakteristika usmerenosti presionih mikrofona se sužava, slika 6.5. Što su dimenzije mikrofona manje to je ova karakteristika u širem frekvencijskom pojasu bliža kružnom obliku.



Slika 6.5 - Karakteristika usmerenosti presionog mikrofona na različitim frekvencijama

Presioni ili neusmereni mikrofoni najčešće se koriste za snimanje ambijenta kod višekanalnog snimanja muzike, snimanje većeg broja

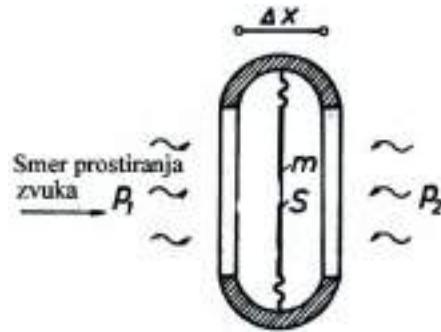
sagovornika, zatim manjih vokalnih ili instrumentalnih sastava pri kružnom rasporedu, za snimanje šumova u prirodi itd.

6.5 Gradijentni mikrofoni

Gradijentni mikrofoni su tako konstruisani da zvučni pritisak ima pristup membrani sa obe strane, slika 6.6. Zvučni talas stiže do zadnje strane membrane sa određenim vremenskim kašnjenjem usled čega između pritisaka p_1 i p_2 nastaje fazna razlika koja iznosi:

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda} = k\Delta x = \frac{\omega}{c}\Delta x \quad (6.8)$$

gde je: Δx - povećanje dužine puta zvučnih talasa od prednje do zadnje strane mikrofona, $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$ - talasni broj.



Slika 6.6 – Skica gradijentnog mikrofona

Sada se može pisati da na prednju stranu membrane deluje pritisak:

$$p_1 = \hat{p} \cos \omega t,$$

a na zadnju stranu pritisak:

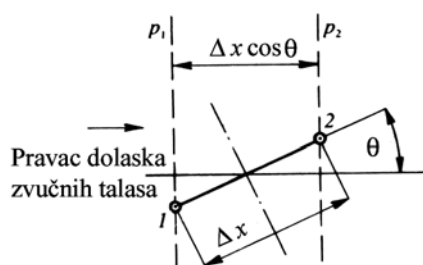
$$p_2 = \hat{p} \cos(\omega t - k\Delta x).$$

Sila koja deluje na membranu jednaka je:

$$\begin{aligned} F &= S(p_1 - p_2) = S\hat{p}[\cos \omega t - \cos(\omega t - k\Delta x)] = \\ &= 2\hat{p}S \sin \frac{k\Delta x}{2} \cos \left[\omega t + \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{2\Delta x}{\lambda} \right) \right] \end{aligned} \quad (6.9)$$

Pokazuje se da je ova sila proporcionalna gradijentu pritiska i brzini čestica a ne pritisku kao kod presionih mikrofona. Zbog toga se ovi mikrofoni i nazivaju gradijentni ili brzinski.

Kada zvučni talasi dolaze pod uglom θ u odnosu na osu mikrofona, kako je prikazano na slici 6.7, onda je razlika u dužini puta $\Delta x \cos \theta$ umesto Δx , što smo imali u dosadašnjim izrazima gde smo smatrali da se pravac dolaska zvučnih talasa poklapa sa osom mikrofona. Iz ove činjenice zaključujemo da će elektromotorna sila na izlazu gradijentnog mikrofona biti, $\cos \theta$ puta manja kada zvučni talasi dolaze pod uglom θ nego kada se njihov pravac dolaska poklapa sa osom mikrofona.

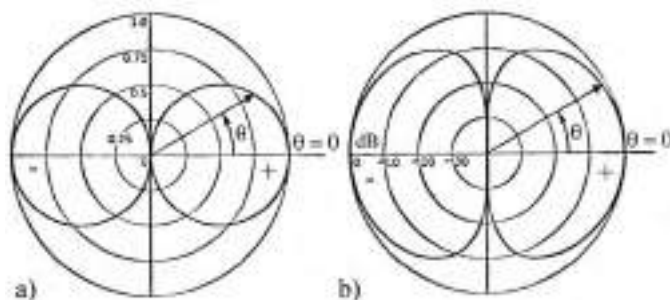


Slika 6.7 - Smanjenje razlike dužine puta zvučnih talasa (Δx) u zavisnosti od ugla θ . Prednja i zadnja strana mikrofona su na pozicijama 1 i 2, respektivno.

Očigledno, možemo pisati izraz:

$$\Gamma(\theta) = \frac{T_\theta}{T_0} = \cos \theta, \quad (6.10)$$

koji predstavlja karakteristiku usmerenosti gradijentnog mikrofona. Ovu karakteristiku čine dva kruga koja se dodiruju u jednoj tački, slika 6.8a, pa se često naziva dvokružna karakteristika ili „osmica“ pošto liči na oborenu cifru osam. Mikrofonu sa ovakvom karakteristikom usmerenosti nazivaju se dvosmerni mikrofoni.

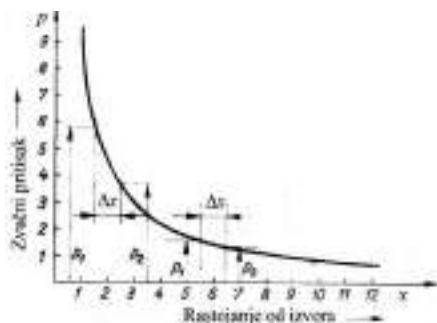


Slika 6.8 - Karakteristike usmerenosti gradijentnog mikrofona:
a) na linearnoj skali, b) na logaritamskoj skali

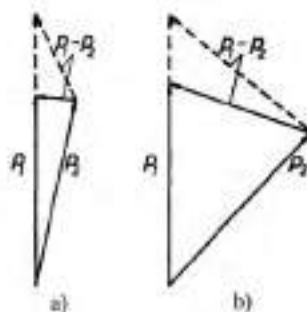
Na višim frekvencijama i kod ovih mikrofona (slično kao i kod presionih) se karakteristika usmerenosti sužava. Na slici 6.8b je karakteristika usmerenosti gradijentnog mikrofona prikazana u logaritamskoj razmeri.

6.5.1 Efekat blizine

Gradijentni mikrofoni imaju ravnu frekventijsku karakteristiku samo u polju zvučnih talasa čija se amplituda pritiska ne menja na putu od prednje do zadnje strane membrane. To je polje ravnih talasa. Ako se gradijentni mikrofona nađe u blizini „tačkastog“ izvora zvuka ovaj uslov nije ispunjen.

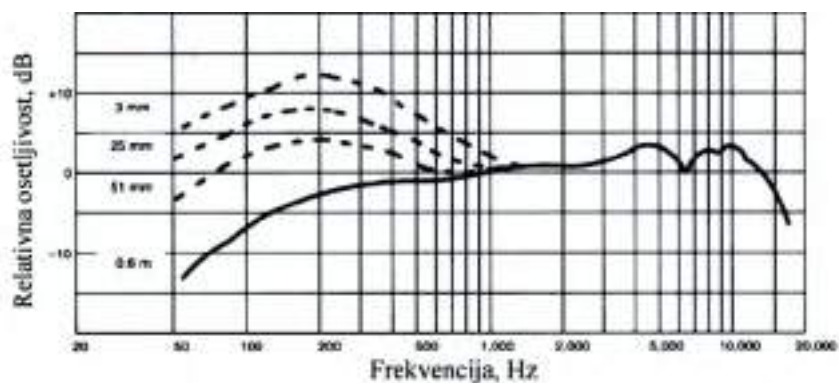


Slika 6.9 – Opadanje zvučnog pritiska p sa povećanjem rastojanja x od tačkastog izvora



Slika 6.10 - Razlika zvučnih pritiskova koji deluju na dve strane membrane gradijentnog mikrofona:
a) niže frekvencije,
b) više frekvencije; puna linija predstavlja odnose u polju ravnih, a isprekidana u polju sfernih talasa

U blizini tačkastog izvora imamo sferne talase čija amplituda opada obrnuto proporcionalno udaljenosti od izvora. U blizini samog izvora postoji velika razlika između vrednosti zvučnog pritiska ispred i iza membrane mikrofona, slika 6.9. Što je mikrofons bliže izvoru to je ova razlika veća.



Slika 6.11 - Frekventijske karakteristike tipičnog gradijentnog mikrofona na različitim rastojanjima od izvora zvuka

Kako se vidi sa slike 6.10, sa porastom frekvencije raste fazna razlika a time i razlika vektora, $\underline{p}_1$ i $\underline{p}_2$ odnosno gradijent pritiska. Na nižim frekvencijama je intenzitet razlike vektora $|\underline{p}_1 - \underline{p}_2|$ kod sfernih talasa (označeno crticama) znatno veći nego kod ravnih (označeno punom linijom). Na višim frekvencijama ova razlika je sve manja. Drugim rečima, što je frekvencija niža i što je gradijentni mikrofons bliže izvoru njegova

osetljivost je veća. Ovo se jasno vidi i sa slike 6.11, gde je prikazana fрекvencijska karakteristika jednog gradijentnog mikrofona na različitim rastojanjima od izvora.

6.6 Kombinovani mikrofoni

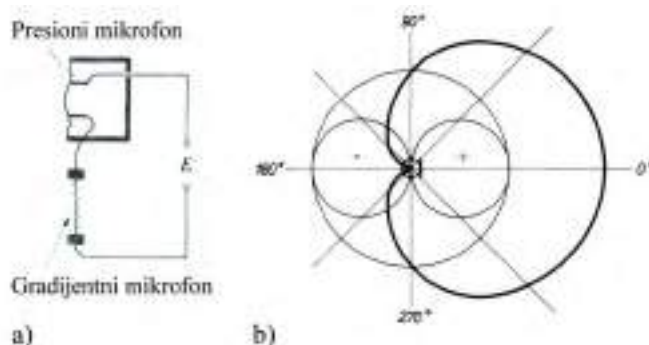
Kombinacijom presionog i gradijentnog mikrofona, slika 6.12a, dobija se mikrofonski sistem sa kardiodnom karakteristikom usmerenosti. Neka su osjetljivosti oba mikrofona u smeru ose jednake i po fazi i po intenzitetu i neka iznose T_0 . Osjetljivost kombinovanog mikrofona se dobija sabiranjem pojedinačnih osjetljivosti i iznosi:

$$T = T_0 + T_0 \cos \theta = 2T_0 \frac{1 + \cos \theta}{2} \quad (6.11)$$

Karakteristika usmerenosti ovakve kombinacije je data izrazom:

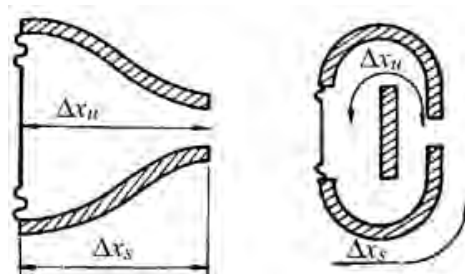
$$\Gamma(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2}, \quad (6.12)$$

koji predstavlja kardiodu, prikazanu na slici 6.12b.



Slika 6.12 - Kombinovani mikrofoni: a) principska šema međusobne veze, b) karakteristika usmerenosti – kardioda, dobijena grafičkim sabiranjem kružne i dvokružne karakteristike

Sa slike 6.12b se vidi da je grafičkim sabiranjem kružne i dvokružne karakteristike usmerenosti moguće dobiti kardiodnu karakteristiku. Pri sabiranju treba uzeti u obzir da je jedna polovina dvokružne karakteristike pozitivna (znak +), a druga negativna (znak -), jer je pomeranje membrane pri dolasku zvučnih talasa iz suprotnih smerova protivfazno. Kardiodni oblik karakteristike usmerenosti nam govori da je osjetljivost ove grupe mikrofona jako povećana u jednoj polusferi, zbog čega se oni nazivaju jednosmerni mikrofoni.

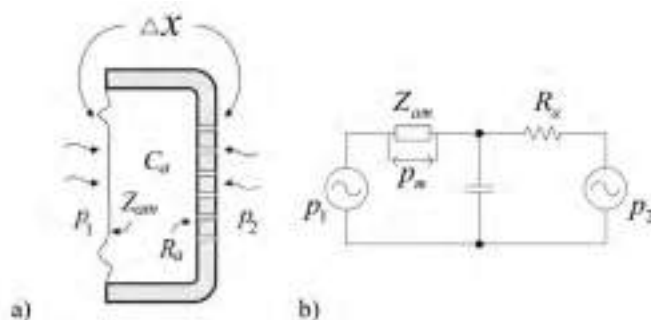


Slika 6.13 – Mogući načini realizacije kombinovanog mikrofona sa jednom membranom

Kombinovani mikrofon je moguće realizovati i sa jednom mikrofonskom kapislom (tj. sa jednom membranom), kako je prikazano na slici 6.13. Put zvučnih talasa od prednje do zadnje strane membrane ovde ćemo podeliti na dva dela: spoljašnji Δx_s koji zavisi od upadnog ugla θ i unutrašnji Δx_u koji se ne menja sa promenom upadnog ugla. Ako je pritisak sa obe strane membrane iste amplitude i ako podesimo da je $\Delta x_s = \Delta x_u = \Delta x \ll \lambda$ onda je prema izrazu (6.11) sila koja deluje na membranu:

$$F = k p S (\Delta x_u + \Delta x_s \cos \theta) = k p S \Delta x (1 + \cos \theta) \quad (6.13)$$

što predstavlja kardioidu.



Slika 6.14 – Kombinovani mikrofon: a) skica, b) analogno električno kolo

Jedan od uobičajenih načina realizacije kombinovanog mikrofona je onaj sa komorom iza membrane, povezanom sa okolnim prostorom preko otvora koji imaju akustičku otpornost, slika 6.14a. Analogno kolo ovakvog mikrofona je prikazano na slici 6.14b. Akustička kapacitivnost komore je C_a a akustička otpornost svih otvora R_a . Akustička impedansa membrane je Z_{am} a pritisak na membrani p_m . Putna razlika zvučnih talasa od prednje strane membrane do ulaza u otvore na kućištu mikrofona je Δx .

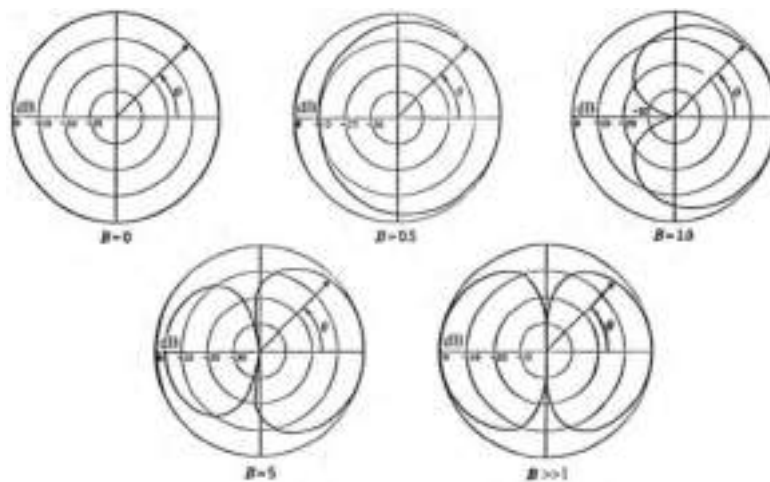
Pritisak na membrani je u ovom slučaju dat izrazom [5]:

$$p_m = |A| p (1 + B \cos \theta) \quad (6.14)$$

gde je: $B = \frac{\Delta x}{c C_a R_a}$, i $A = \frac{1}{1 - j \frac{(R_a + Z_{am})B}{k \Delta x Z_{am}}}$.

Pritisak p_1 sa prednje strane membrane u izrazu (6.14) je označen sa p.

Kod ovakvog tipa kombinovanog mikrofona koeficijent B , u izrazu (6.14), može imati različite vrednosti što znači da mikrofonski prikazan šematski na slici 6.14a može imati različite karakteristike usmerenosti, slika 6.15. Tako za $B = 0$ imamo kružnu karakteristiku, za $B = 1$ kardiodnu a za $B \gg 1$ dvokružnu. Kada je $B > 1$ dobijamo verzije mikrofona sa posebno izraženom usmerenošću. Među njima su najpoznatiji i najčešće se koriste oni sa superkardiodnom i hiperkardiodnom karakteristikom usmerenosti.



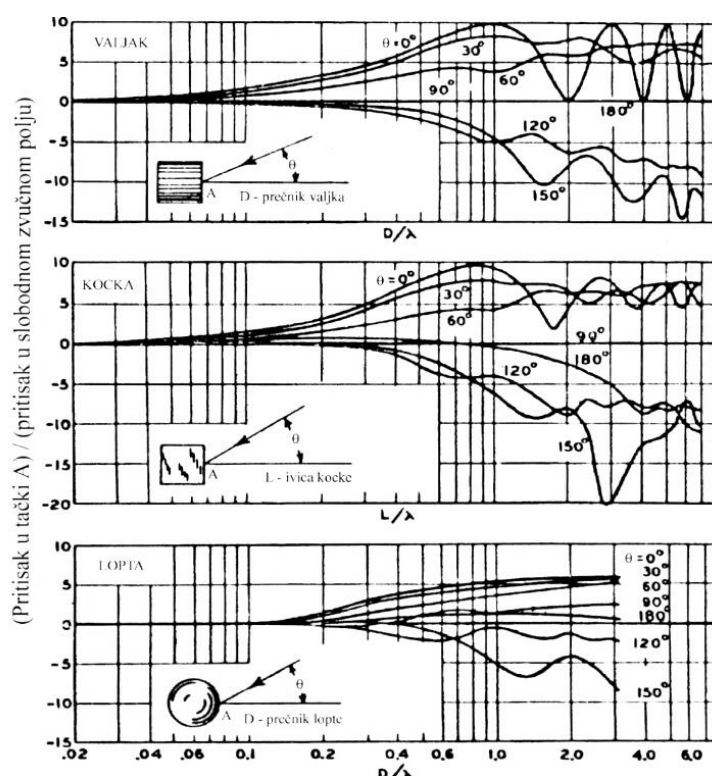
Slika 6.15 - Različiti oblici karakteristike usmerenosti kombinovanog mikrofona sa slike 6.13a, za različite vrednosti parametra B

Kombinovani mikrofoni sa jednom kapislom se nazivaju i „fazni mikrofoni“ s obzirom da se kod njih pritisci sa prednje i zadnje strane membrane razlikuju samo po fazi a približno su iste amplitude.

6.7 Uticaj oblika i dimenzija mikrofona na njegove karakteristike

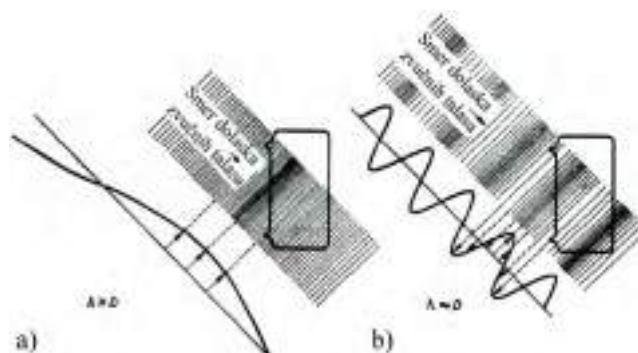
Na višim frekvencijama, gde su dimenzije mikrofona uporedive sa talasnom dužinom zvuka, zvučni pritisak na membrani razlikuje se od vrednosti koju bi imao u slobodnom zvučnom polju da mikrofona nema. Ove promene pritiska ispred membrane utiču na frekvencijsku karakteristiku i na karakteristiku usmerenosti mikrofona. Osnovni razlozi ovih promena su difrakcija na kućištu mikrofona, fazne razlike pritiska na membrani i rezonancije udubljenja ispred membrane.

Uticaj prepreka oblika valjka, kocke i lopte na vrednost pritiska u njihovoj neposrednoj blizini u polju ravnih talasa, prikazan je na slici 6.16 [3]. Kao što vidimo, u slučaju lopte, pri malim upadnim uglovima sa porastom frekvencije raste zvučni pritisak ispred prepreke, dostižući dvostruko veću vrednost od one koju bi imao u slobodnom prostoru. Pri velikim upadnim uglovima zvučni pritisak je manji od onog u slobodnom prostoru. Dijagrami zvučnog pritiska kod valjka i kocke imaju mnogo veće nepravilnosti od onih kod lopte. Razlog ovome su oštre ivice valjka i kocke koje deluju kao sekundarni izvori zvuka, tako da maksimalne vrednosti pritiska na pojedinim frekvencijama dostižu iznos i za 10 dB viši nego u slobodnom zvučnom polju. Takođe se iz prikazanih dijagrama može zaključiti da je praktično svejedno da li je kućište mikrofona u obliku valjka ili kocke.



Slika 6.16 – Karakteristike zvučnog polja u tački ispred prepreka (tačka A) različitog oblika (valjak, kocka i lopta), koje se nalaze u polju ravnih talasa, u funkciji odnosa dimenzija prepreka i talasne dužine zvuka [3]

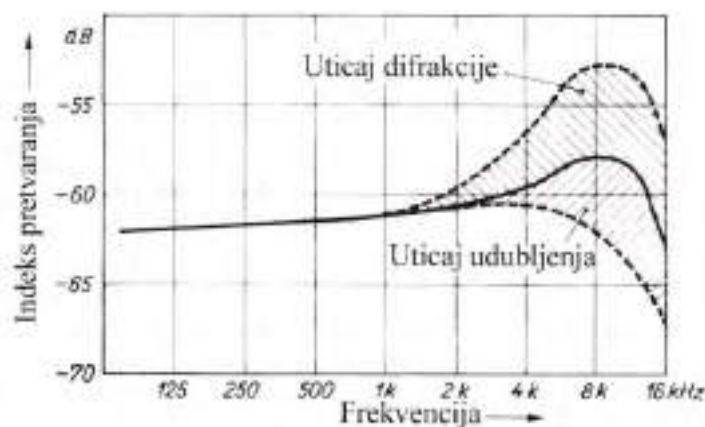
Treba imati u vidu da se prikazani dijagrami odnose na centralnu tačku prednje strane mikrofona odnosno membrane. U ostalim tačkama pritisak je drugačiji zavisno od odnosa dimenzija membrane i talasne dužine zvuka, kako je prikazano na slici 6.17 [3].



Slika 6.17 - Pritisak na membrani mikrofona:
a) na nižim frekvencijama, b) na višim frekvencijama [3]

Iz prethodne analize se može zaključiti da bi uticaj difrakcije bio što manji najbolje je da kućište mikrofona ima loptasti oblik i da mu je prečnik što manji, najviše 5 cm. Isto tako, fazne razlike na membrani će biti zanemarljive ako je njen prečnik manji od 2,5 cm.

Kod velikog broja mikrofona na prednjoj strani, ispred membrane, postoji cilindrično udubljenje u kojem na određenim višim frekvencijama dolazi do rezonantnih pojava. Usled ovog efekta dolazi do povećanja ili smanjenja efektivnog pritiska na membrani u odnosu na njegovu vrednost u slobodnom zvučnom polju. Područje frekvencija u kojem će se ovo desiti kao i relativne vrednosti promene pritiska zavise od odnosa dimenzija udubljenja prema talasnoj dužini zvuka.



Slika 6.18 - Uticaj difrakcije i rezonansi udubljenja na
frekvencijsku karakteristiku mikrofona [3]

Stepen i frekvencijsko područje uticaja difrakcije i rezonansi udubljenja ispred membrane, na frekvencijsku karakteristiku mikrofona, prikazani su na primeru na slici 6.18 [3].

6.8 Usmerenost mikrofona i difuzno zvučno polje

Faktor usmerenosti, definisan jednačinom (6.5), je mera ponašanja mikrofona u difuznom zvučnom polju. Drugim rečima, potiskivanje reverberacije, šuma i neželjenih zvukova kod mikrofona raste sa porastom njegove direktivnosti. Kao mera osetljivosti mikrofona na difuzno zvučno polje i šum često se koristi parametar koji se naziva „efikasnost u difuznom polju” (*REE* - Random Energy Efficiency) i izražava se u decibelima.

Tabela 6.1 – Pregled karakteristika usmerenosti mikrofona

Karakteristika	Kružna	Dvokružna	Kardioidna	Super kardioidna	Hiper kardioidna
Karakteristika usmerenosti $\Gamma(\theta)$, grafički izgled					
$\Gamma(\theta)$, analitički izraz	1	$\cos \theta$	$\frac{1}{2}(1 + \cos \theta)$	$0,37 + 0,63 \cos \theta$	$\frac{1}{4}(1 + 3 \cos \theta)$
Prijemni ugao (-3 dB)	360°	90°	131°	115°	105°
$\Gamma(90^\circ)$, dB	0	$-\infty$	-6	-8,6	-12
$\Gamma(180^\circ)$, dB	0	0	$-\infty$	-6	-11,7
Ugao θ za $\Gamma(\theta) = 0$	-	90 °	180 °	126 °	110 °
Faktor usmerenosti γ_m	1	3	3	3,73	4
<i>REE</i>	1	0,333	0,333	0,268	0,250
	0 dB	-4,8 dB	-4,8 dB	-5,7 dB	-6 dB
<i>DF</i>	1	1,7	1,7	1,9	2

REE pokazuje za koliko se decibela relativno smanjuje nivo signala zvuka čija energija iz prostora uniformno nailazi na mikrofona, poput buke i reflektovanog zvuka, u odnosu na signal koji bi registrovao neusmereni mikrofona iste osetljivosti. Iz tabele 6.1 jasno je da veća usmerenost povlači za sobom veću negativnu vrednost *REE* ili veće potiskivanje neželjenih zvukova.

Drugi način da se označi isto svojstvo usmerenih mikrofona je veličina koja se u literaturi naziva faktor rastojanja ili faktor distance (*DF*). On pokazuje koliko puta se može povećati rastojanje usmerenog mikrofona od izvora, u odnosu na rastojanje neusmerenog mikrofona iste osetljivosti, pa da odnos direktnog i reflektovanog zvuka u zbirnom signalu na njihovim izlazima bude isti.

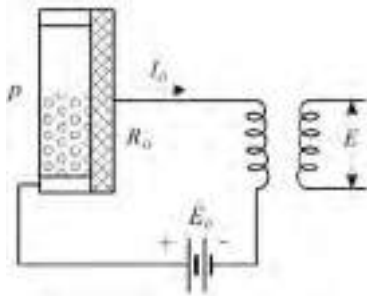
Oba ova parametra izražavaju stepen razlike usmerenog mikrofona u odnosu na neusmereni. *REE* nam govori koliko je usmereni mikrofona otporniji (manje osetljiv) na reverberantno zvučno polje nego neusmereni.

Recimo, ako umesto neusmerenog koristimo hiperkardiodni mikrofonski uticaj šuma i reverberantnog zvuka će opasti na četvrtinu (-6 dB). Ova razlika se, na primer, može iskoristiti za dodatno pojačanje zvuka pre nastanka povratne sprege.

DF nam govori na koliko puta većem rastojanju od izvora možemo koristiti usmereni mikrofonski u odnosu na neusmereni, pri istom stepenu imunosti na šum i reverberantni zvuk. Kao što vidimo iz tabele 6.1 hiperkardiodni mikrofonski možemo koristiti na duplo ($DF = 2$) većem rastojanju nego neusmereni, pri istom stepenu izolacije od reflektovanog zvuka i buke.

6.9 Ugljeni mikrofonski

Princip rada ugljenog mikrofonski prikazan je na slici 6.19. Mikrofonska kapisa se sastoji od dve električno-provodne elektrode od kojih je jedna (membrana) pomična. Prostor između elektroda delimično je ispunjen ugljenim zrnima. U kolu mikrofonski se nalazi izvor jednosmernog napona E_0 a otpornost ugljenih zrnaca kada membrana miruje je R_0 . Tada je struja u kolu mikrofonski I_0 .



Slika 6.19 - Princip rada ugljenog mikrofonski

Kretanje membrane pod dejstvom zvučnih talasa izaziva promene pritiska između ugljenih zrnaca. Ovo ima za posledicu promenu električne otpornosti zrnaca i promenu ukupne struje u kolu mikrofonski. Dakle, pored stalne jednosmerne struje I_0 imamo i primenljivu komponentu struje ΔI .

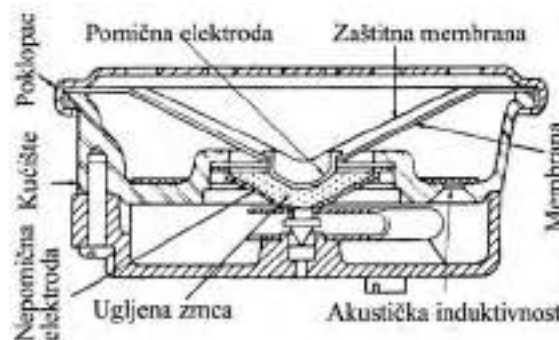
Ako se otpornost ugljenih zrnaca promeni za iznos ΔR struja će se promeniti za iznos ΔI , odnosno:

$$I_0 + \Delta I = \frac{E_0}{R_0 + \Delta R}. \quad (6.15)$$

Ovde se dobija da je promenljiva komponenta struje:

$$\Delta I = \frac{E_0}{R_0} \left[-\frac{\Delta R}{R_0} + \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^3 + \dots \right]. \quad (6.16)$$

Kao što se vidi, promenljiva struja u kolu ugljenog mikrofona nije linearna funkcija promene otpornosti. To je i razlog što su harmonijska izobličenja kod ovog tipa mikrofona velika.



Slika 6.20 – Poprečni presek ugljenog mikrofona

U slučaju kada su relativne promene otpornosti mikrofona male ($\Delta R/R_0 \ll 1$) onda su promene struje u kolu mikrofona proporcionalne promeni otpornosti ΔR . S druge strane, promena otpornosti ΔR srazmerna je pomeraju membrane, pa se može pisati da je struja, odnosno napon E na otvorenim krajevima izlaznog transformatora mikrofonskog kola na slici 6.19 srazmeran pomeraju, tj.

$$E = \text{const} \cdot \xi \quad (6.17)$$

Poprečni presek jednog ugljenog mikrofona prikazan je na slici 6.20. Ugljena zrnca, dobijena posebnim tehnološkim postupkom od antracita, nalaze se u izdubljenoj metalnoj posudi koja predstavlja jednu od elektroda. Zrnca imaju kontakt sa električno-provodnom membranom preko kontaktnog diska (button-a) na membrani. Membrana je obično izrađena od aluminijumske folije.

Otpornost ugljenog mikrofona je čisto omska, smanjuje se sa povećanjem jednosmerne struje, a njena srednja vrednost iznosi oko 100 oma. Osetljivost ugljenog mikrofona je velika i često je veća od 100 mV/Pa. Pri ovoj osetljivosti uz glasan govor iz neposredne blizine, kakav je slučaj kod telefona, izlazni napon je veći od 500 mV.

U uslovima prilagođenja po snazi ovaj mikrofona daje prijemnom kolu mnogo veću snagu (reda 1 mW) od akustičke snage koja se koristi na pokretanje membrane. Ovo povećanje snage ide na račun energije koju daje izvor napajanja. Stoga je ovaj tip mikrofona jedini posredni pretvarač koji u izlaznom kolu daje veću energiju nego što prima iz zvučnog polja. Takođe, kod njega nema recipročnog efekta, odnosno ne može se kao kod nekih drugih tipova mikrofona, dovođenjem na njegove priključne krajeve električne energije, dobiti akustička energija.

Kao što smo videli, struja ugljenog mikrofona nije linearna funkcija promene njegove otpornosti. Ova nelinearnost posebno dolazi do izražaja pri većim nivoima zvučnog signala, kada faktor harmonijskih izobličenja može biti i do 30%.

Frekvencijska karakteristika ugljenog mikrofona je relativno uska i prilagođena prenosu govornog signala.

Na nižim i srednjim frekvencijama ugljeni mikrofon ima kružnu karakteristiku usmerenosti, dok na višim frekvencijama (2 kHz i 4 kHz) postaje sve usmereniji. Pošto se uglavnom koristi u telefonskoj slušalici, gde se tokom govora usta drže u neposrednoj blizini mikrofona, a u smeru normalnom na membranu, sužavanje karakteristike usmerenosti na višim frekvencijama nema praktičnog značaja.

Otpor ugljenih zrnaca na kontaktnim mestima menja se spontano, usled čega dolazi do pojave relativno visokog nivoa šuma ugljenog mikrofona.

Ugljeni mikrofon se skoro isključivo koristi u telefonskim komunikacijama. Razlog je njegova velika osetljivost, zbog čega nisu potrebni pretpojačivači u telefonskoj slušalici, gde su ovi mikrofoni ugrađeni. S druge strane, njihov uzak frekvencijski opseg, velika izobličenja i značajan šum ugljenih zrnaca ograničavaju njihovu promenu samo na prenos govornog signala.

Ugljeni mikrofon se tako dugo zadržao u telefoniji i pored nabrojanih značajnih nedostataka, samo zbog svoje velike osetljivosti, jednostavne konstrukcije i robusnosti.

6.10 Elektrodinamički mikrofoni sa kalemom

6.10.1 Presioni elektrodinamički mikrofon s kalemom

Elektrodinamički mikrofon s kalemom je najrasprostranjeniji tip mikrofona koji se koristi kako za jeftine uređaje široke potrošnje tako i za visokokvalitetna studijska snimanja.

Kretni element ovog mikrofona je membrana na koju je nalepljen kalem. Membrana je za kućište mikrofona vezana svojim obodom, tako da je obezbeđeno centriranje kalema i omogućeno njegovo kretanje u pravcu aksijalne ose, slika 6.21.

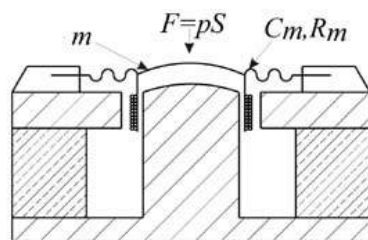
Kalem se nalazi u međugvožđu magnetnog sistema, pa se pri pomeranju u njemu indukuje elektromotorna sila:

$$E = Blv \quad (6.18)$$

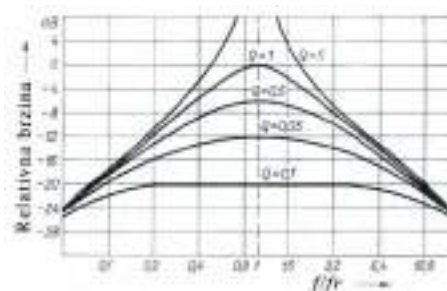
gde je: B - magnetna indukcija u procepu,
 l - dužina žice kalema,

v - brzina kretanja kalema.

Kako je proizvod Bl konstantan za dati mikrofon, to se iz jednačine (6.18) vidi da je indukovana elektromotorna sila E upravo proporcionalna brzini kretanja v (oscilovanja) kalema.

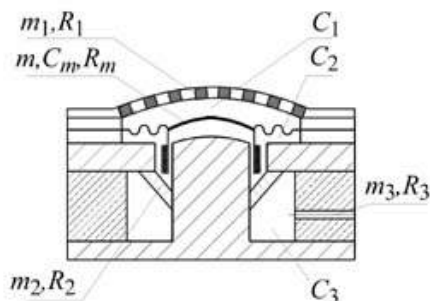


Slika 6.21 – Kretni sistem elektrodinamičkog mikrofona sa magnetnim sklopom



Slika 6.22 – Brzina kretanja kalema u funkciji frekvencije

Kretni sistem mikrofona sa magnetnim sklopom u osnovi predstavlja mehanički oscilatorni sistem (masa m , mehanička kapacitivnost C_m i mehanička otpornost R_m) sa jednim stepenom slobode kod kojeg se brzina oscilovanja nalazi na isti način kao i struja u električnom rezonantnom kolu.



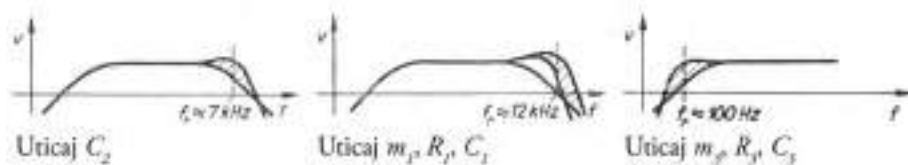
Slika 6.23 – Presek kompletnog elektrodinamičkog mikrofona

Oblik frekvencijske karakteristike brzine kretanja kalema, a time i izlaznog napona mikrofona, zavisi od faktora dobrote Q kretnog sistema, slika 6.22. Da bismo uz konstantan zvučni pritisak na membrani mikrofona dobili konstantnu elektromotornu silu na izlazu mikrofona treba da je brzina oscilovanja kretnog sistema konstantna u funkciji frekvencije. To se postiže uz dovoljno veliku mehaničku otpornost R_m , pri čemu se dobija manja brzina oscilovanja, a time i elektromotorna sila na izlazu mikrofona.

Dinamički mikrofon pored osnovnih elemenata prikazanih na slici 6.21, ima i druge akustičke elemente u obliku komora i cevi (sa prednje i zadnje strane membrane) koji doprinose proširenju frekvencijske

karakteristike na nižim i višim frekvencijama. Ovde nećemo ulaziti u detaljniju analizu ekvivalentnog mehaničkog kola mikrofona, ali ćemo samo navesti koji su to elementi i grafički naznačiti kakav je njihov uticaj na frekvencijsku karakteristiku mikrofona.

To su, prema slici 6.23, zaštitna mrežica ispred membrane sa sitnim otvorima (predstavljena sa m_1 i R_1), komora između mrežice i membrane (C_1), komora između membrane i elemenata magnetnog kola (C_2) i komora u kućištu mikrofona (C_3). Između komora C_2 i C_3 nalazi se pregradni zid sa uskim otvorima (predstavljen sa R_2 i m_2) i otvor na kućištu mikrofona (predstavljen sa m_3 i R_3). Uticaj pojedinih elemenata na proširenje frekvencijskog opsega mikrofona naznačen je na slici 6.24.

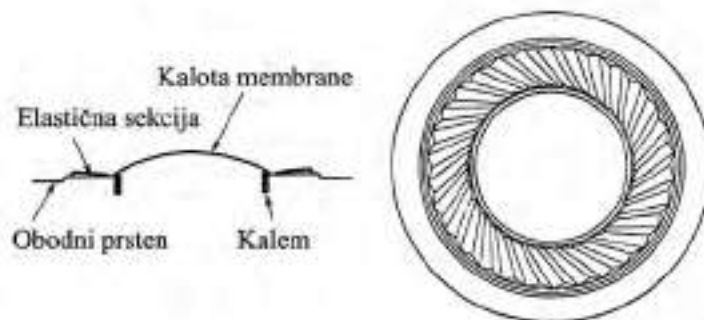


6.24 – Uticaj pojedinih elemenata iz sklopa mikrofona na njegovu frekvencijsku karakteristiku

Membrana

Membrana elektrodinamičkog mikrofona je u obliku kalote ili kupole, čime se postiže potrebna krutost da bi u celom čujnom području frekvencija oscilovala kao klip. Parcijalno oscilovanje pojedinih delova ovakve membrane javlja se tek iznad 15 kHz.

Na perifernom delu membrane nalaze se koncentrični ili tangencijalni nabori, slika 6.25, koji obezbeđuju odgovarajuću elastičnost i približno isto pomeranje svih delova kupole kao kod klipa.



Slika 6.25 – Membrana i kalem elektrodinamičkog mikrofona

Kod mikrofona starije proizvodnje membrane su uglavnom izrađivane od aluminijuma. Aluminijum ima malu težinu, lako se obrađuje,

zadržava dimenzije i formu nakon izrade, otporan je na vlagu i promenu temperature. Dodirom, ili prevelikim pritiskom aluminijumska membrana se može deformisati posle čega je neupotrebljiva.

Kod mikrofona novije izrade membrana je od poliester (mylar) folije. Membrana od ovog materijala ima sve dobre osobine aluminijumske membrane, a pored toga zadržava oblik i dimenzije i nakon drastičnih trenutnih deformacija.

Kalem

Kalem se pravi od bakarne žice, prečnika oko 50 μm , izolovane lakom. Žica se mota na cilindrični nosač kalema ili se formira kao samonoseći cilindar u kom slučaju su navoji međusobno slepljeni. Otpornost kalema je reda 10 do 100 Ω , a induktivnost reda 100 μH .

Magnetni sistem

Magnetni sistem se sastoji od magneta i polnih nastavaka. Magnet je izrađen od visokokvalitetnih magnetnih čelika (Ticonal, Alniconux, Neodimium). Polni nastavci su od mekog gvožđa. Procep u kojem se kreće kalem je dimenzija manjih od milimetra, a magnetna indukcija u njemu je reda 1,2 T.

Osnovne karakteristike

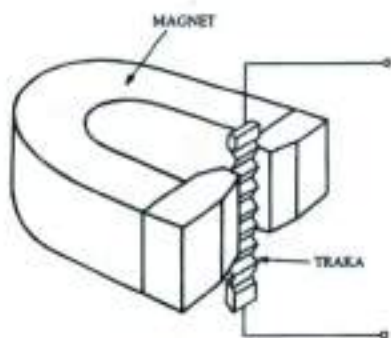
Kvalitetni elektrodinamički mikrofoni sa kalemom imaju ravnu frekvencijsku karakteristiku u opsegu od 30 Hz do 15 kHz. Osetljivost im se kreće od 1 do 4 mV/Pa, pri izlaznoj impedansi od 200 Ω . Ekvivalentni nivo šuma je oko 20 dB, dok je gornja granica zvučnog pritiska kojoj se mikrofon sme izložiti oko 140 dB, što daje dinamički opseg od 120 dB. Na sasvim niskim frekvencijama ne treba ove mikrofone izlagati zvučnom pritisku iznad 125 dB jer može doći do njihovog oštećenja usled prevelikih pomeraja kretnog sistema. Harmonijska izobličenja su praktično zanemarljiva ako se ne radi o izuzetno visokim nivoima zvučnog pritiska. Promena atmosferskih uslova nema većeg utisaja na rad ovih mikrofona. Međutim, osetljivi su na uticaj promenljivih magnetnih polja.

Stabilnost karakteristika kao i otpornost na potrese i vibracije kod ovih mikrofona je velika zbog čega se mnogo koriste za snimanja na otvorenom prostoru. Male su težine i dimenzija što sve skupa doprinosi da su najrasprostranjeniji mikrofoni u tehničkoj praksi.

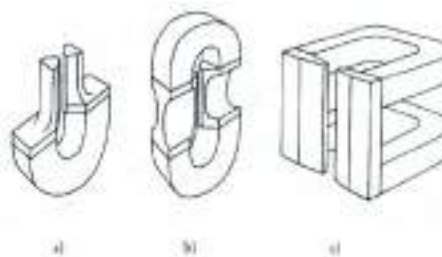
Elektrodinamički mikrofoni sa kalemom često se prave i kao kombinovani, odnosno fazni mikrofoni sa jednosmernom karakteristikom usmerenosti.

6.11 Elektrodinamički mikrofoni sa trakom

Mikrofoni sa trakom su posebna vrsta dinamičkih mikrofona gde traka deluje i kao membrana i kao provodnik, u kojem se indukuje elektromotorna sila. Metalna traka (obično od aluminijuma) nalazi se u magnetnom polju stalnog magneta, slika 6.26. Pri pomeranju trake, usled dejstva zvučnih talasa, u njoj se indukuje elektromotorna sila. Dužina trake je nekoliko centimetara, širina nekoliko milimetara, a debljina nekoliko μm . Veoma je laka i ima električnu otpornost reda $0,1\ \Omega$ do $0,2\ \Omega$.



Slika 6.26 – Traka kao membrana i provodnik u magnetnom sklopu mikrofona



Slika 6.27 – Različiti oblici magnetnog sklopa elektrodinamičkog mikrofona sa trakom [3]

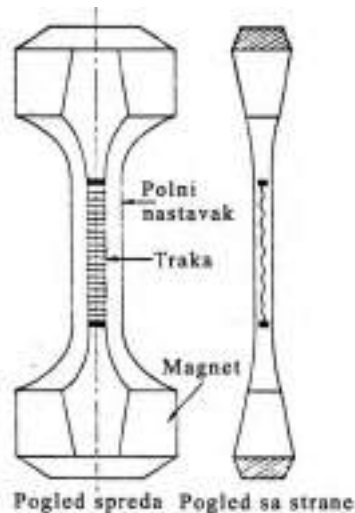
Magnetni sklop mikrofona sa trakom izrađuje se u različitim oblicima, od kojih su neki prikazani na slici 6.27 [3]. U upotrebi su gradijentni, presioni i kombinovani mikrofoni sa trakom.

6.11.1 Gradijentni mikrofoni sa trakom

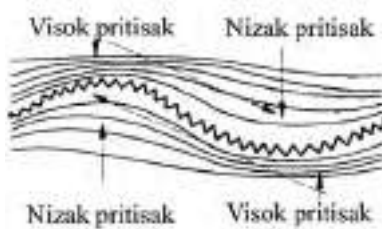
Šematski izgled ovog mikrofona prikazan je na slici 6.28. Frekvencija rezonance kretnog sistema mora biti na donjem kraju radnog opsega, negde između 15 Hz i 25 Hz. Zbog male mase i labavog vešanja traka je veoma osetljiva na vazdušne udare i vibracije. Zbog toga se sa obe strane traka zaklanja metalnim mrežicama i finim prozirnim platnom.

Traka se pod uticajem zvučnih talasa ne pomera samo napred – nazad kao celina, već na određenim frekvencijama pojedini delovi trake vibriraju međusobno u protivfazi, slika 6.29 [3]. Posledica ovoga je prilično neravna frekvencijska karakteristika mikrofona prikazana na slici 6.30 [3]. Da bi se ovaj efekat umanjio postavljaju se u neposrednoj blizini trake, sa obe njene strane, na rastojanju manjem od milimetra, metalne mrežice. Usled viskoznog strujanja vazduha kroz okca mrežica, koje su u neposrednoj blizini trake, dolazi do smanjenja osetljivosti mikrofona u širem području

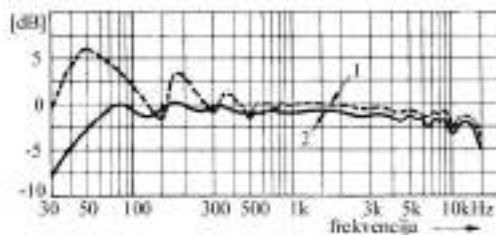
oko rezonanse kretnog sistema kao i do izravnivanja pomenutih neravnina u frekvencijskoj karakteristici, slika 6.30 [3].



Slika 6.28 – Izgled gradijentnog elektrodinamičkog mikrofona sa trakom

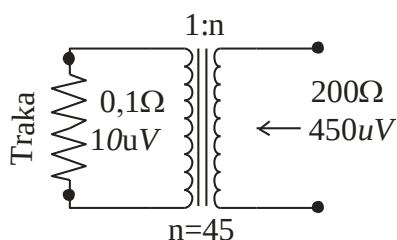


Slika 6.29 – Vibriranje pojedinih delova trake u protivfazi na visokim frekvencijama [3]

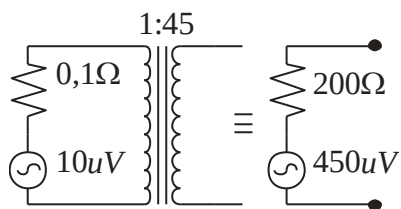


Slika 6.30 – Uticaj mrežice na frekvencijsku karakteristiku mikrofona, 1 – bez mrežice, 2 – sa mrežicom [3]

Veoma mala otpornosti trake (treća $0,1 \Omega$) se pomoću prilagodnog transformatora (koji se nalazi u sklopu ovog mikrofona) podiže na veću, u praksi pogodniju vrednost, slika 6.31. Ujedno se podiže i izlazni napon mikrofona koji se tako svodi na ekvivalentni generator elektromotorne sile, slika 6.32, od nekoliko stotina μV pri zvučnom pritisku od 1 Pa , čija je unutrašnja otpornost nekoliko stotina oma.

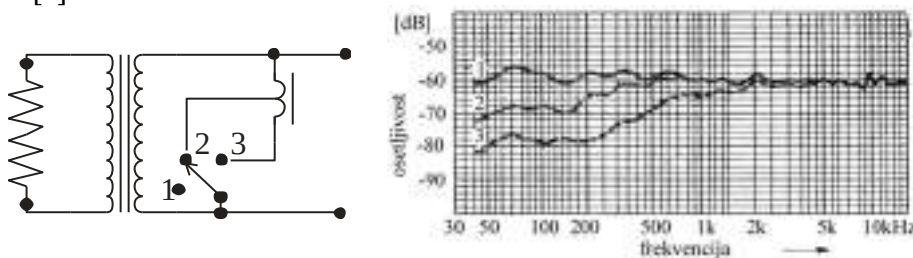


Slika 6.31 – Prilagodni transformator mikrofona sa trakom: vrednosti napona se odnose na zvučni pritisak od 1 Pa



Slika 6.32 – Ekvivalentna električna šema mikrofona sa trakom kao generatora elektromotorne sile

Smanjenje blizinskog efekta kod ovog mikrofona postiže se elektronskim putem, ugradnjom preklopnika sa različitim vrednostima induktivnosti koje se priključuju paralelno sekundaru transformatora, slika 6.33 [3].



Slika 6.33 – Način regulacije blizinskog efekta kod mikrofona sa trakom [3]

Osetljivost

Osetljivost mikrofona sa trakom, pri izlaznoj impedansi od 200 Ω do 250 Ω , iznosi nekoliko stotina mV/Pa do par mV/Pa. Mikrofon sa trakom je jako osetljiv na udare vetra i vibracije, pa je njegova primena ograničena na zatvoreni prostor i lagano pokretanje, ili potpuno mirovanje.

Šum

Nivo šuma kod ovog mikrofona je veoma mali. Meren preko psfometrijskog filtra, iznosi oko 20 dB. Najveći nivo zvučnog pritiska koji se može dovesti ovom mikrofonom je oko 120 dB, pa je njegov dinamički opseg reda 100 dB.

Izobličenja

Harmonijska izobličenja kod mikrofona sa trakom mogu biti značajna samo na niskim frekvencijama usled velikih pomeraja trake.

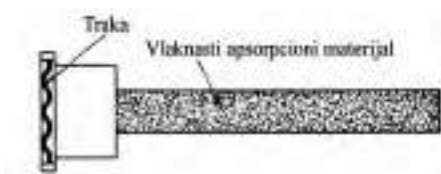
Međutim, i pri najnižim frekvencijama i pri nivou pritiska od preko 100 dB faktor ukupnih harmonijskih izobličenja nije veći od 1%.

Frekvencijska karakteristika

Frekvencijska karakteristika gradijentnog mikrofona sa trakom je ravna u frekvencijskom opsegu od 30 Hz do 15 kHz.

Karakteristika usmerenosti

Karakteristika usmerenosti ovog mikrofona je dvokružna (osmica) i u horizontalnoj ravni je ista za sve frekvencije. U vertikalnoj ravni karakteristika usmerenosti je nešto uža što se ide prema frekvencijama kod kojih talasna dužina zvuka postaje uporediva sa dužinom trake. Efektivni prostorni ugao prijema zvuka je $4\pi/3$ steradiana, odnosno trećina prostornog ugla neusmerenog mikrofona. To ujedno znači da je potiskivanje reverberantnog zvuka i neželjenih smetnji kod ovog mikrofona za 5 dB bolje nego kod neusmerenog.



Slika 6.34 – Presioni mikrofonski element sa trakom i „labirintom“ iza trake [3]

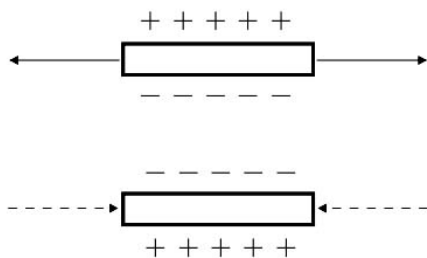
Mikrofon sa trakom se izvodi i kao presioni. U tom slučaju traka je izložena zvučnim talasima samo sa jedne strane, dok se sa druge strane trake nalazi cev ispunjena apsorpcijskim materijalom, takozvani akustički labirint, slika 6.34 [3]. Ova cev je savijena u kućištu mikrofona da bi imala dovoljnu dužinu i zauzela što manji prostor.

Mikrofon sa trakom se pravi i kao kombinovani sa jednosmernim prijemom zvuka. Traka je sa zadnje strane zatvorena labirintom, ali tako da se naspram gornjeg dela trake nalazi, u zidu labirinta, otvor čija se veličina može menjati. Tako je za gornji deo trake moguć pristup zvučnih talasa sa obe strane, a za donji deo samo spreda. Menjanjem veličine otvora, od potpuno zatvorenog do maksimalnog, mikrofon prelazi iz presionog u gradijentni, kroz veliki broj međuvarijanti sa jednosmernom karakteristikom usmerenosti.

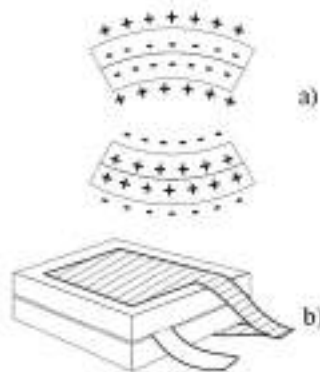
6.12 Piezoelektrični mikrofonski element

Piezoelektrični mikrofonski elementi se nazivaju i kristalni ili keramički. To su mikrofonski elementi kod kojih elektromotorna sila nastaje deformacijom pretvaračkog elementa koji ima piezoelektrična svojstva. Naime, radi se o osobini pločica napravljenih od piezoelektričnih materijala da se prilikom deformacije

njihovog oblika na dve naspramne površine javlja električno opterećenje suprotnog znaka i obratno (inverzni efekat), ako se na površine pločice dovede spolja električni napon pločica će se mehanički deformisati.



Slika 6.35 – Pojava električnog naelektrisanja na piezo pločicama usled deformacije



Slika 6.36 – „Bimorf”, element za izradu mikrofona

Piezoelektrična svojstva pokazuju neki kristalni i keramički materijali. Najpoznatiji među kristalima su kvarc i Sinjetova (Signette) so. Za proizvodnju mikrofona uglavnom se koristi Sinjetova so jer je jeftinija od kvarca i kod nje je piezoelektrični efekat jače izražen. Od keramičkih materijala u ovu svrhu koristi se uglavnom barijum-titanat kod kojeg je piezoelektrični efekat slabije izražen nego kod Sinjetove soli, ali on ima bolje osobine što se tiče otpornosti na klimatske uticaje okoline.

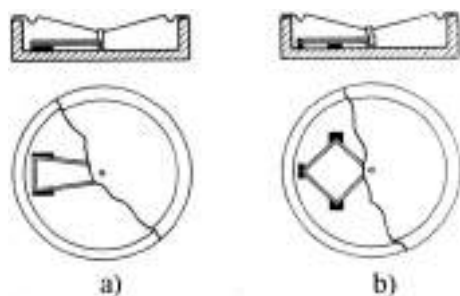
Ako pločicu od piezoelektričnog materijala izložimo istezanju, slika 6.35, gornja površina dobiće pozitivno električno naelektrisanje, a donja negativno i obratno, ako pločicu izložimo sabijanju javiće se suprotno električno naelektrisanje. Kada se takve dve pločice slepe i podvrgnu savijanju, slika 6.36a, onda je jedna pločica sabijena a druga istegnuta, pa obe spoljnje površine imaju istoimeno naelektrisanje, a srednja dodirna površina ima suprotno. Da bi se ova naelektrisanja mogla iskoristiti nalepe se na spoljašnje i unutrašnje površine provodni listići sa izvodima, a zatim se izvodi sa spoljnjih ploča međusobno spoje, slika 6.36b. Ovako formiran element naziva se „bimorf” i koristi se kao jedinica za izradu mikrofona.

Bimorf se učvršćuje za kućište mikrofona, preko jedne ili više podloški, tako da mu jedan kraj ostane slobodan, slika 6.37 [3]. Slobodni kraj se spaja sa membranom direktno ili preko štapića izrađenog od lakog metala ili plastike. Membrana je konusnog oblika radi veće čvrstoće. Izrađuje se od metalne folije ili plastike. Pri delovanju zvučnog pritiska na membranu slobodni kraj bimorfa se savija na jednu ili drugu stranu a na njegovim

izvodima se pojavljuje elektromotorna sila mikrofona E . Ova sila data je relacijom:

$$E = \frac{h \cdot S}{C_0} \cdot \xi, \quad (6.19)$$

gde je: h - konstanta, ξ - pomeraj membrane, S - površina membrane, C_0 - kapacitivnost kondenzatora koji obrazuju elektrode sa kristalom kao dielektrikom.



Slika 6.37 - Princip konstrukcije piezoelektričnog mikrofona [3]

Unutrašnja impedansa kristalnog mikrofona je kapacitivna, i iznosi oko 1000 pF, što je kako ćemo kasnije videti, skoro za red veličine više nego kod kondenzatorskog. Stoga otpornost opterećenja kristalnog mikrofona može biti manja (reda 1 MΩ) a pojačavač ne mora biti u kućištu mikrofona, ako kabl za vezu mikrofona sa odgovarajućim uređajem nije previše dugačak.

Prosta konstrukcija (nema baterije, magneta, pojačavača, transformatora) i velika osetljivost daju ovom mikrofону prednost nad ostalim tipovima mikrofona. Međutim, piezoelektrični mikrofón je osetljiv na temperaturu i vlagu, a sa druge strane teško je kod njega postići ravnu frekventijsku karakteristiku zbog uticaja složenih pojava rezonanse u mehaničkom sistemu i kod samih pločica kristala.

Osetljivost piezoelektričnih mikrofona zavisi od tipa piezoelektričnog materijala. Kod kristalnih materijala je nekoliko desetina mV/Pa a kod keramičkih za 12 do 16 dB niža.

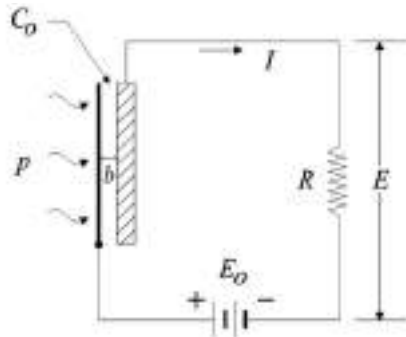
Piezoelektrični mikrofoni su uglavnom presionog tipa pa imaju kružnu karakteristiku usmerenosti. Na najvišim frekvencijama, na kojima talasne dužine zvuka postaju jednake ili manje od dimenzija mikrofona, karakteristika usmerenosti se sužava.

Harmonijska izobličenja kod piezoelektričnog mikrofona su veoma mala ako zvučni pritisak ne prelazi nivo od 130 dB.

Šum ovog mikrofona potiče od jednosmerne otpornosti kristala. Paralelno ovoj otpornosti deluje kapacitet kristalnog elementa, pa idući prema višim frekvencijama karakteristika spektra šuma opada 6 dB/okt. Vrednosti šuma na pojedinim frekvencijama su različite od mikrofona do mikrofona, ali je oblik karakteristike isti.

6.13 Kondenzatorski mikrofoni

Kondenzatorski mikrofoni su mikrofoni najvišeg kvaliteta. Primenuju se u studijskoj tehnici za snimanje zvuka kao i u akustičkim merenjima. Imaju ravnu frekvencijsku karakteristiku, osetljivi su, otporni su na udare i vibracije, dobro reprodukuju prelazne pojave a izrađuju se kao neusmereni (presioni), dvosmerni (gradijentni) i usmereni (kombinovani) mikrofoni. Njihov glavni nedostatak je nemogućnost rada bez izvora napajanja. Naime potrebno je obezbediti kako napajanje (polarizaciju jednosmernim naponom) same kapsele, tako i pretpojačavača ugrađenog u kućištu mikrofona. Ovaj zahtev ih čini nepodesnim za prenosne uređaje kao i za široku upotrebu.



Slika 6.38 – Princip rada kondenzatorskog mikrofona

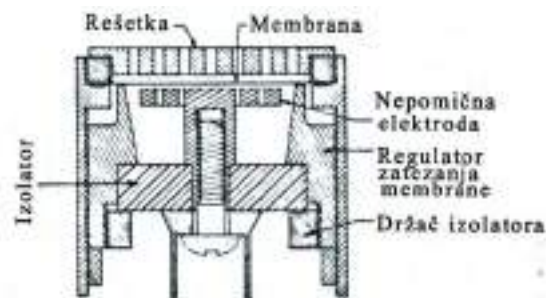
Princip rada ovog mikrofona je prikazan na slici 6.38. Sastoji se od kondenzatora sa dve obloge, vezane na izvor jednosmernog napona, između kojih je dielektrik vazduh. Jedna obloga je punija i nepokretna, dok drugu oblogu čini tanka, laka i kruta membrana mikrofona koja vibrira pod uticajem zvučnog pritiska. Na slici 6.39 prikazan je presek presionog kondenzatorskog mikrofona.

Kada membrana miruje kapacitet mikrofona je C_0 . Ako na membranu deluje zvučni pritisak ona vibrira u ritmu pritiska menjajući rastojanje od nepokretne obloge. Pomeraj membrane Δx izaziva promenu kapaciteta mikrofona za ΔC , a ova promena dovodi do pojave struje u izlaznom kolu mikrofona, odnosno do pojave izlaznog napona E na otpornosti opterećenja R . Dobijeni napon E odnosi se prema jednosmernom naponu u kolu E_0 kao promena kapaciteta ΔC prema kapacitetu mikrofona C_0 , tj:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta x}{b} \quad (6.20)$$

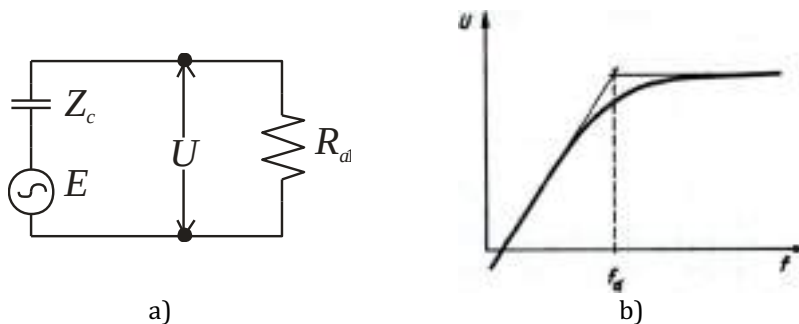
odakle se dobija da je:

$$E = E_0 = \frac{\Delta x}{b} \quad (6.21)$$



Slika 6.39. Presek presionog kondenzatorskog mikrofona

Membrana kondenzatorskog mikrofona je metalna ili metalizirana folija debljine oko 10 do 15 μm . Rastojanje između membrane i nepomične elektrode je oko 10 do 20 μm a kapacitet mikrofona oko 40 do 50 pF.



Slika 6.40 – Kondenzatorski mikrofonski generator unutrašnje impedanse Z_c

Kondenzatorski mikrofonski generator, posmatran kao naponski generator, ima kapacitivnu unutrašnju impedansu koja sa otpornošću opterećenja predstavlja visokopropusni filter prvog reda, slika 6.40. Donja granična frekvencija (-3 dB) ovoga filtera dobija se izjednačavanjem unutrašnje impedanse generatora sa otpornošću opterećenja, odnosno:

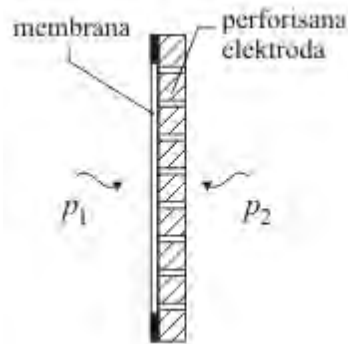
$$Z_c = \frac{1}{2\pi f_a C} = R_{al}, \text{ odakle je}$$

$$f_a = \frac{1}{2\pi R_{al} C} \quad (6.22)$$

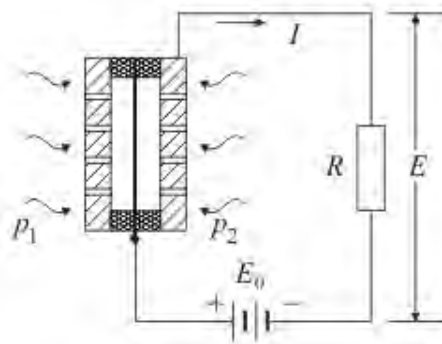
Ako je kapacitet mikrofona 45 pF, za donju graničnu frekvenciju od 20 Hz otpornost opterećenja mora biti najmanje 180 M Ω .

Kao što smo prethodno rekli kondenzatorski mikrofonski generator se izarađuje ne samo kao presioni već i kao gradijentni i kombinovani. Princip rada presionog kondenzatorskog mikrofona prikazan je na slici 6.41. Ovde je membrana izložena zvučnom pritisku sa obe strane, tako što je druga, nepomična elektroda izbušena. Da bi se ostvarila simetrija obično se i ispred

membrane postavlja slična elektroda koja nije vezana u električno kolo, slika 6.42.

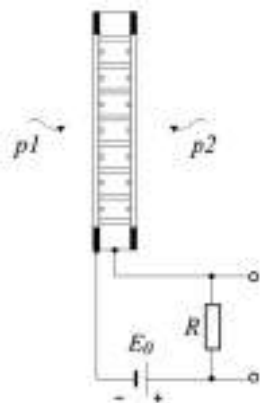


Slika 6.41 – Kondenzatorski mikrofona na gradijentu pritiska-princip rada

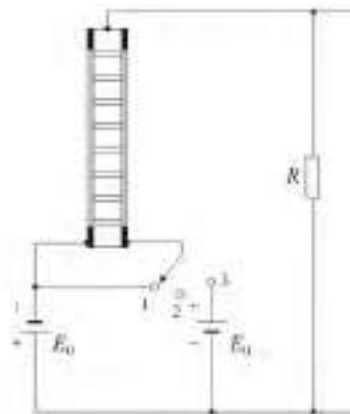


Slika 6.42 – Kondenzatorski mikrofona na gradijentu pritiska u simetričnoj vezi

Kombinovani kondenzatorski mikrofona ima takođe simetričnu konfiguraciju ali sa dve membrane, od kojih je samo jedna električki aktivna, slika 6.43, ali su kroz otvore nepomične elektrode akustički povezane.



Slika 6.43 – Kombinovani kondenzatorski mikrofona



Slika 6.44 – Kombinovani kondenzatorski mikrofona sa preklopnikom

Kapisa sa dve membrane može se izvesti tako da se pomoću preklopnika biraju sve tri karakteristike usmerenosti – kružna, dvokružna i kardiodna, slika 6.44. U položaju 1 obe membrane su pod istim jednosmernim naponom i imamo kružnu karakteristiku usmerenosti. U položaju 2 samo je jedna membrana električki aktivna pa se dobija

kardiodna karakteristika. U položaju 3 na membrane se dovode naponi suprotnog polariteta i dobija se dvosmerna karakteristika usmerenosti.

Osetljivost

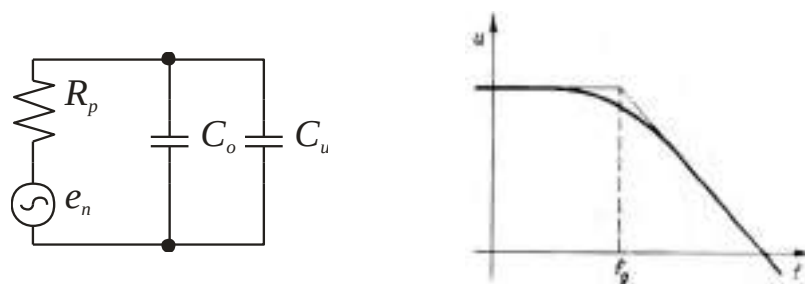
Osetljivost kondenzatorskih mikrofona je skoro za red veličine veća nego kod dinamičkih mikrofona sa kalemom. Vrednosti osetljivosti su u granicama od 8 mV/Pa pa do 32 mV/Pa.

Izobličenja

Pomeraji membrane i promene kapaciteta kondenzatorskog mikrofona su veoma mali pa su i harmonijska izobličenja kod ovog mikrofona mala. Tek za nivoe zvučnog pritiska veće od 130 dB ova izobličenja postaju reda 1%. U normalnim radnim uslovima njihova vrednost je zanemarljivo mala.

Šum

Ovaj mikrofoni je u osnovi kondenzator i ne stvara sopstveni šum. Međutim, u radnim uslovima paralelno elektrodama mikrofona deluje izolaciona otpornost između elektroda (reda $10^{12}\Omega$) i otpornost opterećenja mikrofona (reda $10^7 - 10^9\Omega$). Stoga je ovde dominantan uticaj otpornosti opterećenja koja praktično kratko spaja izolacionu otpornost.



Slika 6.45 – Ekvivalentni izvor šuma kondenzatorskog mikrofona

Dakle, ekvivalentni izvor šuma, slika 6.45, ima unutrašnju otpornost jednaku otpornosti opterećenja R_p mikrofona i sam je opterećen paralelnom vezom kapacitivnosti mikrofona C_0 i ulazne kapacitivnosti mikrofonskog pretpojačavača C_u .

Zbog uticaja ukupne kapacitivnosti ($C_0 + C_u$) spektar šuma opada prema višim frekvencijama, kako se vidi na slici 6.45 (desno).

Kod kvalitetnih kondenzatorskih mikrofona šum je ekvivalentan naponu na njegovom izlazu koji bi imali pri ulaznom nivou zvuka od 15 do 20 dB.

6.14 Elektret mikrofoni

6.14.1 Elektreti

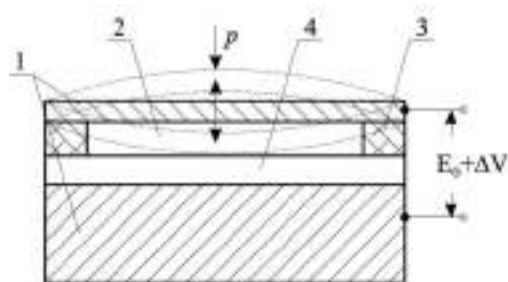
Elektreti su dielektrični materijali koji, posle određenog tehnološkog postupka, zadržavaju stalnu električnu polarizaciju bez prisustva spoljašnjeg napona (ponašaju se slično kao stalni magneti koji imaju konstantno magnetno polje). Savremeni elektreti zadržavaju konstantno naelektrisanje i pri velikim promenama temperature i vlažnosti.

Elektreti se mogu definisati i kao naelektrisani ili polarizovani izolatori. Naelektrisan elektret je elektrostatički ekvivalentan izolatoru koji ima površinski raspoređeno naelektrisanje. U praksi naelektrisanje elektreta se nalazi na, ili sasvim blizu, jedne površine i fiksno je. Kompenzaciono naelektrisanje suprotnog znaka je na suprotnoj strani. Ova površina je obično prekrivena provodnim slojem.

Kao elektreti koriste se halokarbonski materijali (teflon i aklar) i organski polimeri (polipropilen, poliestar – tereftalat koji se naziva i mylar, polikarbonat, fluorokarbonat itd.). Halokarbonski materijali se, kako ćemo dalje videti, nanose na zadnju elektrodu mikrofonske kapisle, dok se organski polimeri izrađuju u obliku tankih savitljivih filmova i kao takvi se koriste za izradu membrana elektret mikrofona i slušalica.

6.14.2 Koncept elektret mikrofona

Elektret mikrofona se sastoji od dve ravne paralelne elektrode od kojih je jedna savitljiva, slika 6.46. Sloj elektret materijala koji se nalazi na jednoj od elektroda obezbeđuje električno polje u vazdušnom procepu između elektroda. Promene pritiska spoljašnjeg zvučnog polja izazivaju pomeranje savitljive elektrode što dovodi do promena napona između elektroda.



Slika 6.46 – Princip konstrukcije elektret mikrofona: 1 – metalne elektrode, 2 – vazdušni procep, 3 – odstojnik, 4 – elektret

U praksi, s obzirom na položaj elektret elementa u odnosu na elektrodu, postoji više načina za izradu kapisle elektret mikrofona. Svi se oni mogu podeliti u dve osnovne grupe: mikrofoni sa fleksibilnim elektretom

odnosno sa elektret membranom, slika 6.47 i mikrofoni sa fiksnim ili zadnjim elektretom, slika 6.48.

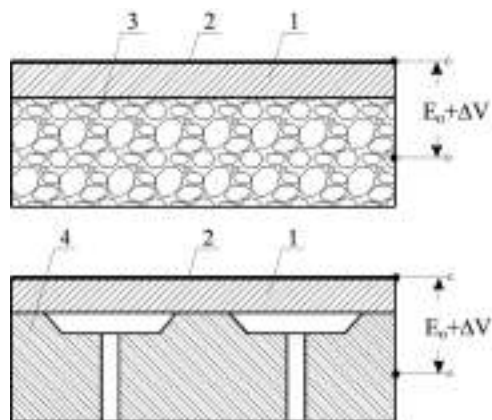
Kod prve grupe membrana je izrađena od elektret materijala sa jednom metalizovanom površinom. Kod mikrofona sa fiksnim ili zadnjim elektretom sloj elektret materijala je nanesen na zadnju elektrodu.

Primenom elektreta u konstrukciji mikrofona eliminiše se visoki polarizacioni napon koji je neophodan kod kondenzatorskih mikrofona, čime se uprošćava, kako izrada tako i primena ovih mikrofona.

Napajanje elektret mikrofona ne može se sasvim izbeći zbog pojačavača postavljenog odmah uz kapislu u isto kućište. Međutim, to danas nije nikakav problem, s obzirom na minijaturizaciju komponenti koje ulaze u sastav pretpojačivača, kao i male vrednosti struje i napona potrebnih za njegovo napajanje. Napajanje može biti obezbeđeno spolja, ili putem minijaturne baterije smeštene u kućištu mikrofona.

6.14.3 Mikrofon sa fleksibilnim elektretom

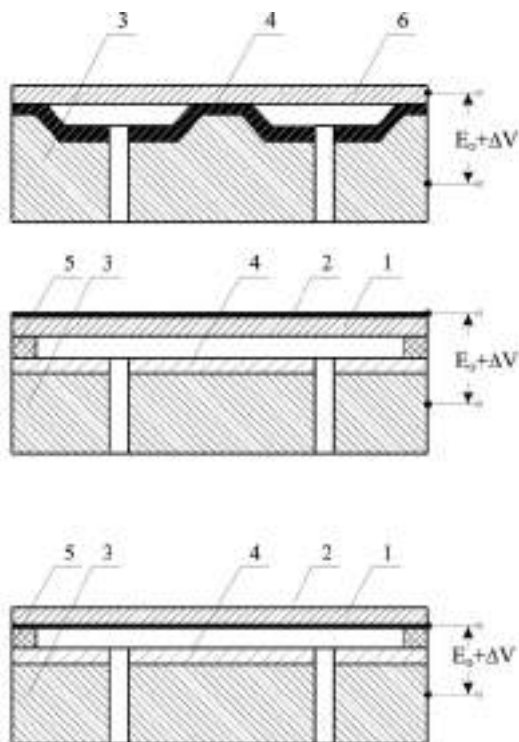
Koncept mikrofona sa fleksibilnim elektretom ima mnogo praktičnih prednosti. Metalizovana elektret folija je laka i ima dobre akustičke karakteristike. Elektret služi kao izolator između dve elektrode a jednovremeno generiše polarizaciono električno polje u vazдушnom procepu. Pored toga, moguće je zadnju ploču izraditi u različitim oblicima. Međutim, membrane od polimer elektreta imaju jedan veliki nedostatak. One imaju relativno loše mehaničke karakteristike i podložne su kontinualnom istezanju kada su pod konstantnim mehaničkim naponom.



*Slika 6.47 – Princip konstrukcije elektret mikrofona sa membranom od elektret materijala;
1 – elektret membrana,
2 – metalizovani sloj,
3 – sinterovana zadnja elektroda,
4 – perforisana zadnja elektroda sa osloncima za membranu*

Zbog toga je neophodno obezbediti konstantnu zategnutost i postojanu geometriju membrane. Izvesna poboljšanja se dobijaju izradom zadnje elektrode od sinterovanog materijala, slika 6.47a, ili sa kružnim osloncima i otvorima, slika 6.47b. U oba slučaja je krutost membrane povećana i stabilnija, ali posledice istezanja materijala membrane nisu

sasvim otklonjene. Ipak, ovakav tip mikrofona može se proizvoditi veoma jeftino, potpuno automatizovanim postupkom, što i jeste njegova osnovna prednost.



Slika 6.48 – Elektret mikrofona sa zadnjim (fiksni) elektretom:

- 1 - membrana,*
- 2 - metalizovani sloj,*
- 3 - zadnja elektroda,*
- 4 - elektret,*
- 5 - odstoynik,*
- 6 - metalna membrana*

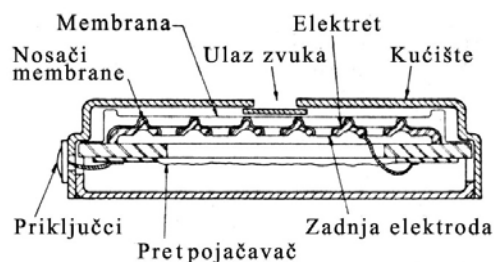
6.14.4 Mikrofona sa zadnjim elektretom

Poboljšana verzija elektret kapisle je ona sa takozvanim „zadnjim elektretom“. Elektret materijal se nanosi na zadnju elektrodu i ovde nema ulogu membrane. Zato je moguće odabrati i tip i debljinu materijala da bi se dobila što veća osetljivost i stabilnost kapisle. Takođe se u ovom slučaju i membrana pravi od materijala koji najviše odgovara datoj nameni mikrofona. Pored membrane od plastičnih materijala grade se i metalne membrane. Mikrofon sa zadnjim elektretom su komplikovaniji za proizvodnju, ali su to veoma kvalitetni audio pretvarači i po mnogim karakteristikama ne zaostaju za kondenzatorskim, slika 6.48.

6.14.5 Neusmereni elektret mikrofona

Primer elektret mikrofona sa zadnjim (fiksni) elektretom prikazan je na slici 6.49. Zadnja elektroda je napravljena od metala i sa gornje strane

presvučena elektret materijalom na bazi polimera. Pored toga na površini zadnje elektrode, okrenutoj prema membrani, nalaze se nabori na koje se membrana naslanja. U ovom slučaju membrana nije nategnuta već se svojim ravnim, središnjim delom naslanja na nabore zadnje elektrode koji služe kao nosači membrane. Protivtežu elektrostatičkoj sili, koja u mirnom stanju deluje na membranu, obezbeđuje elastični obod membrane. Mehaničke karakteristike ovako naslonjene membrane, u odnosu na slučaj kada je ona nategnuta, su mnogo stabilnije na uticaje temperature i vlažnosti.



Slika 6.49 – Poprečni presek neusmerenog elektret mikrofona

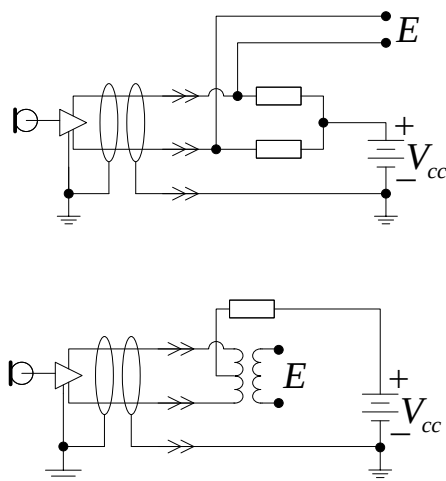
Takođe je, u ovom slučaju, moguće odabrati membranu male mase čime se proširuje frekvencijski opseg mikrofona i smanjuje njegova osetljivost na vibracije. Radni opseg ovakvog mikrofona pokriva skoro sve čujne audio frekvencije, karakteristika usmerenosti mu je kružna a maksimalni pritisak na membrani pri kojem je mikrofonski signal još uvek linearan približava se vrednosti od 140 dB. Nivo šuma mikrofona je ekvivalentan nivou pritiska na njegovom ulazu od 26 dBA, tako da je dinamički opseg oko 114 dB. U kućištu mikrofona je smešten i pretpojačavač. Elektret mikrofoni se izrađuju i kao usmereni. Slično kao i kod kardioidnih mikrofona izrađenih u drugoj tehnologiji (elektrodinamički, kondenzatorski) i ovde imamo dva zvučna ulaza. Jedan se nalazi sa prednje a drugi sa zadnje strane membrane. Ovaj drugi ulaz se sastoji od više otvora na bočnoj strani kućišta mikrofona.

6.15 Pretpojačavači za kondenzatorske i elektret mikrofone

Pretpojačavač kod kondenzatorskih i elektret mikrofona treba da obezbedi spregu između mikrofonske kapsele i audio uređaja sa kojim će se mikrofonski signal koristiti. Audio uređaji imaju mikrofonske ulaze uglavnom prilagođene za elektrokinamičke mikrofone čija je izlazna impedansa oko 200 Ω . Međutim, kapsele kondenzatorskih i elektret mikrofona se ponašaju u električnom smislu kao veoma male kapacitivnosti čija impedansa iznosi i preko 100 M Ω . Stoga pretpojačavač za ove mikrofone mora da ima jako veliku ulaznu impedansu da ne bi dodatno obarao ionako mali mikrofonski signal. On treba impedansu od preko 100 M Ω na svom ulazu da konvertuje

u impedansu od $200\ \Omega$ na svom izlazu. Na taj način kondenzatorski i elektret mikrofoni u pogledu priključenja na audio uređaje postaju kompatibilni sa elektrodinamičkim mikrofonomima.

Ulazna kapacitivnost ovog prepojačavača kao i međusobna kapacitivnost veze kapisle i prepojačavača moraju biti što manje da ne bi pogoršavale donju graničnu frekvenciju mikrofona, kako je ranije objašnjeno. Iz tog razloga prepojačavači za kondenzatorske i elektret mikrofone se postavljaju uz samu mikrofonsku kapislu čime se eliminiše uticaj spojnih kablova. To dalje znači da kondenzatorski i elektret mikrofoni moraju imati odgovarajući jednosmerni napon napajanja da bi mogli funkcionisati.



Slika 6.50 – Daljinsko napajanje mikrofona pomoću uzemljenog izvora jednosmernog napona

Kod kondenzatorskih mikrofona pored napona za napajanje prepojačavača mora postojati i napon za polarizaciju mikrofonske kapisle. U novije vreme je uobičajeno da se do mikrofona dovodi jedan jednosmerni napon nominalne vrednosti između 9 V i 52 V. Najčešće vrednosti su 12 V, 24 V i 48 V. Od ovog napona se u kućištu samog mikrofona (pomoću stabilizatora napona ili DC – DC konvertora) obezbeđuju odgovarajući naponi za rad prepojačavača i polarizaciju mikrofonske kapisle.

Kada su u pitanju elektret mikrofoni nema potrebe da se mikrofonskoj kapisli dovodi napon polarizacije kao kod kondenzatorskih mikrofona ali je neophodno dovesti jednosmerni napon za napajanje prepojačavača.

Spoljašnji napon napajanja kondenzatorskih i elektret mikrofona najčešće se dovodi iz audio uređaja na koje se mikrofoni priključuju. Koristi se pozitivni jednosmerni napon (u odnosu na masu) doveden na oba

provodnika mikrofonskog kabla pomoću uparenih otpornika ili transformatora sa srednjim izvodom, slika 6.50. Izlazni signal od mikrofona se prenosi preko ista dva provodnika na uobičajen način. Struja napajanja pretpojačavača teče kroz signalne provodnike do mikrofona, zatim kroz pretpojačavač i vraća se u izvor kroz kablovski zaštitni oklop (širm). Ovakav oblik napojnog kola mikrofona obično se naziva „fantom napajanje“.

6.16 Pitanja za proveru znanja

1. Šta su mikrofoni?
2. Kroz koje faze kod mikrofona prolazi proces pretvaranja akustičke energije u električnu?
3. Na koje promene zvučnog polja reaguju mikrofoni
4. Šta čini osnovni sklop svakog mikrofona?
5. Koje su dve osnovne podele mikrofona i šta se podrazumeva pod njima?
6. Kako je akustička podela mikrofona povezana sa njihovim karakteristikama usmerenosti?
7. Navesti osnovne karakteristike mikrofona.
8. Šta je osetljivost mikrofona?
9. Šta je indeks pretvaranja mikrofona i šta nam, na prvi pogled, govori njegova vrednost?
10. Koliki je indeks pretvaranja mikrofona koji pri pritisku od 1Pa ima na otvorenim krajevima napon od 2 mV?
11. Šta je frekvencijska karakteristika mikrofona i šta se iz nje može videti?
12. Šta je karakteristika usmerenosti mikrofona, kako se prikazuje i koji su njeni najčešći oblici?
13. Kako se definiše faktor usmerenosti mikrofona i kako se brojno izražava?
14. Šta je dinamički opseg mikrofona?
15. Kako se menjaju ukupna harmonijska izobličenja mikrofona pri povećanju nivoa zvučnog pritiska na membrani?
16. Od čega zavisi sopstveni termički šum mikrofona?
17. Šta se podrazumeva pod „ekvivalentnim nivoom šuma“ mikrofona?
18. Koliki je dinamički opseg mikrofona koji pri zvučnom pritisku od 132 dB ima ukupna harmonijska izobličenja 1% i čiji je ekvivalentni nivo šuma 17 dBA?
19. Šta se podrazumeva pod izrazom „headroom“ ili „rezerva“ mikrofona?
20. Kako se izražava odnos signal/šum (S/N) mikrofona?

21. O čemu nam govori podatak o vrednosti impedanse mikrofona i šta je prilagođenje po naponu kod priključivanja mikrofona na audio miksera ili predpojačavače?
22. Šta je, i koliko iznosi stepen iskorišćenja mikrofona?
23. Kakav je pristup zvučnih talasa do membrane presionog mikrofona? Objasniti princip njegovog rada.
24. Objasniti princip rada gradijentnih mikrofona.
25. Šta je efekat »blizine« ili »blizinski« efekat kod mikrofona i kod koje vrste mikrofona je najizraženiji?
26. Šta je kombinovani mikrofoni i kako se kombinovani mikrofoni može realizovati sa jednom mikrofonskom kapislom?
27. Objasniti princip rada elektrodinamičkog mikrofona sa kalemom.
28. Objasniti princip rada elektrodinamičkog mikrofona sa trakom.
29. Objasniti princip rada kondenzatorskog mikrofona.
30. Objasniti princip rada elektret mikrofona.
31. Objasniti princip daljinskog napajanja kod kondenzatorskih i elektret mikrofona.

6.17 Literatura

- [1] L.L. Beranek, *Acoustics*, McGraw-Hill, 1954.
- [2] H.F. Olson, *Acoustical Engineering*, D.Van Nostrand Company, Inc., 1957.
- [3] T. Jelaković, *Mikrofoni*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1969.
- [4] J. Merhaut, *Theory of Electroacoustics*, McGraw-Hill, 1981.
- [5] H.Š. Kurtović, *Osnovi tehničke akustike*, Naučna knjiga, Beograd 1982.
- [6] J. Borwik, *Microphones, Technology and Technique*, Focal Press, 1990.
- [7] N. Pawera, *Microphone Practice*, PPWMedien, 2003.
- [8] J. Eargle, *The Microphone Book*, Second Ed., Elsevier, 2004.
- [9] P.Pravica, D. Drinčić, *Elektroakustika*, VIŠER, Beograd, 2008.
- [10] M. Mijić, *Audio sistemi*, Akademska misao, 2011.
- [11] M. Kleiner, *Electroacoustics*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
- [12] L.L. Beranek and T.J. Mellow, *Acoustics, Sound Fields and Transducers*, Elsevier, 2012.

Zvučnici

7.1 Uvod

Zvučnik je elektroakustički pretvarač kod koga se električna energija pretvara prvo u mehaničku a zatim u akustičku. Ovde proces pretvaranja ide obrnutim redom od onog kod mikrofona, i kako smo već rekli, reverzibilni pretvarači o kojima je bilo reči u poglavlju 6, mogu da rade i kao mikrofoni i kao zvučnici. Međutim, s obzirom da zvučnik u pogledu snage zračenja treba da zameni prirodne izvore zvuka, gde se nekada radi o jako velikim iznosima akustičke snage, njegova membrana i pomeraj moraju po pravilu biti mnogo veći nego kod mikrofona. Zbog toga postoje određene razlike u konstruktivnim rešenjima ovih pretvarača iako je suštinski princip ostao isti. I kod zvučnika postoji jedan mehanički oscilatorni sistem čiji je sastavni deo membrana koja stvara zvučne talase.

U praksi postoje različite vrste zvučnika, ali će, s obzirom na njihovu pretežnu zastupljenost, ovde dalje biti reči o elektrodinamičkim zvučnicima. Takođe će u daljem delu teksta biti govora o osnovnim karakteristikama zvučnika, njihovoj konstrukciji i karakteristikama pojedinih sastavnih delova. Posebna pažnja je posvećena ugrađivanju zvučnika u akustičke zastore. U drugom delu ovog poglavlja biće govora o akustičkim levkovima, akustičkim talasovodima i zvučničkim grupama.

7.2 Podela zvučnika

Električna podela zvučnika se zasniva na načinu pretvaranja električnih oscilacija u vibracije membrane. Reverzibilni principi pretvaranja koji su iskorišćeni kod mikrofona primenjeni su i kod zvučnika. Tako imamo elektromagnetne, elektrodinamičke, elektrostatičke ili kondenzatorske i piezoelektrične ili kristalne zvučnike. Međutim, u praksi se elektrodinamički zvučnik, po mnogim osobinama, pokazao kao sasvim superioran i danas je skoro u potpunosti potisnuo iz upotrebe sve ostale vrste zvučnika. S obzirom na ove činjenice u narednim odeljcima poglavlja 7 svu pažnju posvetićemo proučavanju karakteristika i načina rada elektrodinamičkog zvučnika.

Akustička podela zvučnika zasniva se na načinu sprege membrane sa sredinom u koju zvučnik zrači. Ova sprega ne zavisi samo od karakteristika zvučnika već i od načina njegovog ugrađivanja u kućište.

Zvučnik zajedno sa kućištem u koje je ugrađen nazivamo zvučnički sistem ili zvučnička kombinacija. Tako razlikujemo veliku familiju zvučničkih sistema sa direktnim zračenjem kao i zvučničke sisteme sa levkom za niske i srednje, odnosno visoke frekvencije kao i zvučničke sisteme sa talasovodom. Posebnu grupaciju u ovoj podeli predstavljaju zvučničke grupe.

Kod zvučničkih sistema sa direktnim zračenjem zvučnik je ugrađen u kućište tako da je prednja strana membrane direktno spregnuta sa sredinom u koju zvučnik zrači. Zračenje zadnje strane membrane potpuno je izolovano od ove sredine (zatvorena kutija) ili je iskorišćeno, uz dodatne akustičke elemente (bas refleks kanal ili pasivni radijator), za proširenje radnog opsega na niskim frekvencijama. Ovaj princip je primenjen kod zvučničkih sistema sa bas – refleks kutijom i zvučničkih sistema sa pasivnim radijatorom. Modifikacijom zadnja dva tipa zvučničkih sistema tako da u okolni prostor zrači samo bas – refleks kanal ili pasivni radijator dobijamo zvučničke sisteme sa spregnutim komorama.

Posebna familija zvučničkih sistema koristi levak za ugrađivanje zvučnika. Na ovaj način se povećava akustička otpornost kojom je opterećena membrana zvučnika kad zrači preko levka, što ima za posledicu značajno poboljšanje stepena iskorišćenja. Ovde treba napomenuti da se u niskotonskim zvučničkim sistemima sa levkom koriste elektrodinamički zvučnici uobičajene konstrukcije sa nešto višom frekvencijom rezonanse i malim električnim gubicima, o šemu će detaljno biti govora u odeljku 7.9. Za rad sa levkovima na srednjim i visokim frekvencijama koriste se elektrodinamički zvučnici specifične konstrukcije, takozvani „kompresioni pobuđivači“.

Zvučničke grupe se sastoje od većeg broja identičnih zvučničkih jedinica, raspoređenih na međusobno malim rastojanjima tako da formiraju zvučne izvore specifičnog oblika i karakteristika. Kao zvučničke jedinice koriste se pojedinačni zvučnici, kakav je slučaj kod klasičnih zvučnih stubova, ili kompletni zvučnički sistemi što je karakteristično kod novijih verzija takozvanih „linijskih radijatora“, odeljak 7.11.

7.3 Osnovne karakteristike zvučnika

Osnovne karakteristike zvučnika koje proizvođači danas uglavnom daju u pratećoj dokumentaciji treba da omoguće projektantima i korisnicima da zvučnike lako međusobno uporede te da za odgovarajuću primenu odaberu pravi zvučnik.

Pod osnovnim karakteristikama zvučnika podrazumevaju se: faktor pretvaranja, frekvencijska karakteristika, efikasnost, karakteristika usmerenosti, faktor usmerenosti, stepen iskorišćenja, impedansa, nazivna ili nominalna snaga i faktor izobličenja. Radi pravilne ugradnje zvučnika

potrebno je poznavati i njihove tzv. „Thiele-Small parametre” za male i velike signale. Parametri zvučnika za male signale su: frekvencija rezonanse f_s , zapreminski ekvivalent elastičnosti membrane V_{as} , i Q faktori koji uzimaju u obzir električne i akustičke gubitke neugrađenog zvučnika, Q_{es} i Q_{as} , respektivno. Parametri za velike signale su: vršni zapreminski pomeraj membrane V_d i maksimalna termički ograničena električna snaga zvučnika $P_{e(max)}$. Detaljni podaci o Thiele-Small parametrima zvučnika dati su u odeljku 7.4

Proizvođači rado koriste sasvim različite načine za specifikaciju navedenih karakteristika zvučnika, a sve sa ciljem da svoj proizvod predstave u što boljem svetlu. Međutim, standard [42] koji je predložila grupa eksperata međunarodnog Udruženja audio inženjera (AES-Audio Engineering Society) definiše kako da se karakteristike zvučnika, potrebne u profesionalnoj praksi, prezentuju na uniforman i precizan način. Danas skoro svi eminentniji proizvođači zvučnika daju ove podatke u prospektima i odgovarajućoj tehničkoj dokumentaciji.

Faktor pretvaranja, koji se još naziva reprodukcija ili odziv, predstavlja odnos pritiska koji stvara zvučnik prema naponu napajanja, odnosno:

$$T_{p,U} = \frac{p}{U}, \quad (7.1)$$

gde je p pritisak u slobodnom polju na rastojanju 1 m u smeru ose zvučnika a U napon na krajevima zvučnika. Faktor pretvaranja izražava se i u dB, u kom slučaju se naziva indeks pretvaranja i dat je relacijom:

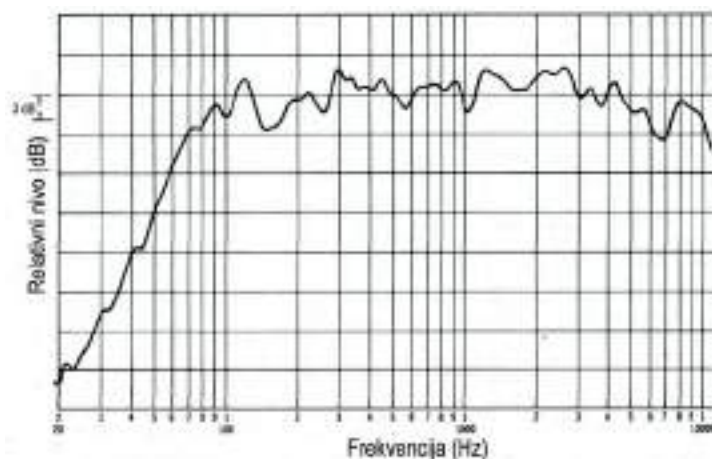
$$G_{p,U} = 20 \log \frac{p}{U}, \quad (7.2)$$

gde se kao referentni zvučnik uzima onaj koji bi pri naponu od $U = 1$ V dao pritisak $p = 1$ Pa.

Frekvencijska karakteristika je promena odziva, data u decibelima, u zavisnosti od frekvencije, slika 7.1 Referentna tačka (0 dB) se obično uzima na 1000 Hz. Zvučnici nemaju tako ravnu frekvencijsku karakteristiku, kao recimo pojačavači snage ili mikrofoni, ali ona može da posluži za utvrđivanje širine frekvencijskog opsega zvučnika i uvid u opšti tok faktora pretvaranja. Smatra se da su granice frekvencijskog opsega na onom mestu gde odziv opadne za 3 dB u odnosu na njegovu vrednost na srednjim frekvencijama. Frekvencijska karakteristika se daje u smeru ose zvučnika, i u detaljnim prospektima za svakih narednih 15° u obe normalne ravni. Pri ovom je zvučnik ugrađen u standardnu ploču (snagu zrači u polovinu prostora koja odgovara prostornom uglu od 2π steradiana). Električna snaga i rastojanja na kojima se vrše ova merenja definisani su isto kao i u slučaju merenja efikasnosti. Merni signal je sinusnog oblika.

Efikasnost. Iako AES standard ne zahteva da se daje efikasnost u obliku jednog broja proizvođači uvek daju ovu informaciju. Efikasnost zvučnika se obično izražava u dB i predstavlja nivo zvučnog pritiska koji

zvučnik stvara na rastojanju 1m u smeru ose pri pobudi električnom snagom od 1W. Električna snaga se pri ovom merenju vezuje za minimalnu vrednost impedanse Z_{min} pa napon na priključcima zvučnika treba da bude numerički jednak vrednosti $\sqrt{Z_{min}}$.



Slika 7. 1 – Frekventijska karakteristika zvučnika

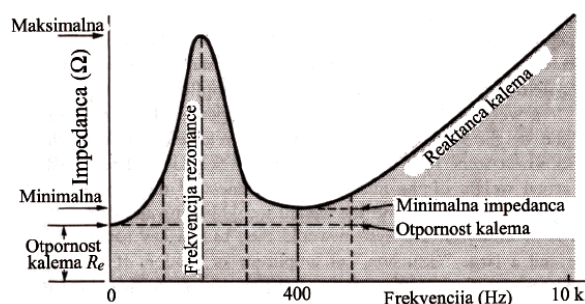
Ovo merenje se može izvesti i pri drugoj vrednosti snage i rastojanja ali se dobijeni rezultat mora preračunati na snagu od 1W i rastojanje od 1m. Merno rastojanje mora biti bar četiri puta veće od najveće dimenzije efektivne površine zračenja zvučnika. Efikasnost je veoma koristan podatak jer se iz njega i poznate nominalne snage zvučnika može naći najveći nivo zvučnog pritiska koji zvučnik može da da na rastojanju 1m a preko njega i nivo zvučnog pritiska na bilo kojem rastojanju.

Karakteristika usmerenosti i faktor usmerenosti zvučnika definisani su na isti način kao i kod mikrofona. Obično se daju u horizontalnoj i vertikalnoj ravni i na standardnim frekvencijama oktava ili trećina oktava. Ovo je naročito važno za zvučnike ili zvučničke sisteme koji se koriste u sistemima ozvučenja i gde je potrebno što tačnije poznavati uglove pokrivanja u obe ravni i na različitim frekvencijama. Inače pod uglovima pokrivanja se podrazumevaju uglovi u horizontalnoj i vertikalnoj ravni pod kojima je nivo zvučnog pritiska za 6 dB manji nego u smeru ose zvučnika ili zvučničkog sistema.

Stepen iskorišćenja zvučnika η predstavlja odnos akustičke snage zračenja i električne snage napajanja zvučnika, i kao što ćemo kasnije videti, zavisi od načina ugradnje zvučnika pa ćemo ga posebno analizirati za svaki tip ugradnje.

Impedansa je neophodan podatak za pravilno priključivanje zvučnika na izlaz pojačavača snage. Njenu nazivnu ili nominalnu vrednost

daje proizvođač. Ova vrednost, kao što je navedeno u poglavlju 7.4 nema neposrednu vezu ni sa jednom realnom vrednošću impedanse. Iz tog razloga neophodno je poznavati modul impedanse, zvučnika u funkciji frekvencije, kako je dato na slici 7.2. Obično je ordinata u logaritamskoj podeli i označena u omima (Ω). Tako se za impedansu može koristiti ista skala kao i za frekvencijsku karakteristiku, što čini veliki broj proizvođača dajući na istom dijagramu frekvencijsku karakteristiku i impedansu zvučnika. Kao poseban podatak daje se minimalna vrednost modula impedanse Z_{min} koju zvučnik dostiže u svom radnom frekvencijskom opsegu. Takođe je potrebno da se u podacima nalazi i vrednost otpornosti kalema zvučnika $-R_e$.



Slika 7.2 – Modul impedanse elektrodinamičkog zvučnika u slobodnom prostoru

Izobličenja. Ovde se radi o harmonijskim izobličenjima. Mere se drugi i treći harmonik i najčešće se prikazuju u funkciji frekvencije na dijagramu sa frekvencijskom karakteristikom gde je ordinata u logaritamskoj podeli. Veličina drugog k_2 i trećeg k_3 harmonika u odnosu na na ukupnu vrednost signala izračunava se po obrascu:

$$k_2(k_3) = 100 \cdot 10^{-\frac{\Delta L}{20}}, [\%], \quad (7.3)$$

gde je ΔL razlika nivoa između osnovnog i pojedinačnih harmonika na datoj frekvenciji. Dakle, nije važna apsolutna vrednost pojedinih harmonika već razlika u nivou između osnovnog i pojedinih viših harmonika. Tako razlika od 20 dB odgovara izobličenjima od 10% a razlika od 40 dB odgovara izobličenjima od 1%. Ovi podaci se obično daju za više raznih vrednosti električne snage a obavezno za nazivnu snagu.

Snaga se najčešće definiše i daje kao nominalna (nazivna) snaga zvučnika (Power handling capacity-rated power). To je ona snaga koju zvučnik može da izdrži dva sata a da pri tom trajno ne promeni akustičke, mehaničke ili električne karakteristike za više od 10%. Ova snaga se izračunava kao količnik iz kvadrata efektivne vrednosti napona na priključcima zvučnika i minimalne vrednosti impedanse Z_{min} . Merni signal je ružičasti šum, sa vršnim faktorom od 6 dB filtriran Batervort-ovim filtrom drugog reda (nagib 12 db/okt) u opsegu jedne dekade, počev od donje granične frekvencije zvučnika. Prilikom merenja zvučnik je u slobodnom

prostoru montiran tako da je pravac kretanja membrane u horizontalnoj ravni.

Često se u prospektima daje snaga kontinualnog programa (Continuous Program Power) koja predstavlja sposobnost zvučnika da sigurno reprodukuje normalni muzički ili govorni signal. Ova snaga se definiše kao dva puta (3dB) veća od nominalne snage zvučnika određene po prethodnom postupku. Vršna snaga je četiri puta (6 dB) veća od nominalne snage.

Pri prekomerno velikim vrednostima ulazne električne snage zvučnik se može oštetiti mehanički ili termički. Mehaničko oštećenje nastaje pri veoma velikim pomerajima membrane kada dolazi do pucanja same membrane, elastičnog prstena ili nekog drugog dela kretnog sistema. Do termičkih oštećenja dolazi kada se usled toplote, koju ne može da izrači u okolinu, kratko spoji ili prekine kalem. Električne snage zvučnika ograničene mehaničkim, odnosno termičkim oštećenjem nisu iste. Proizvođač može dati posebno jednu a posebno drugu i to za odgovarajuće frekvencijske opsege.

Ovi podaci su korisni projektantu, pre svega, da bi imao predstavu o graničnim uslovima kojima zvučnik ne bi smeo biti podvrgnut. Pored podatka o snazi proizvođač treba da pruži i podatak o maksimalnom pomeraju membrane čije prekoračenje dovodi do trajnog oštećenja zvučnika. Proizvođač takođe treba da obezbedi podatak o veličini porasta temperature kalema i magneta na kraju perioda testiranja na izdržljivost na snagu (2 sata).

Radi pravilne upotrebe zvučnika i postizanja optimalnih rezultata u primeni, projektantima i korisnicima su potrebni i podaci o fizičkim karakteristikama (dimenzije, masa, itd.) zvučnika. Takođe su neophodni i detalji u vezi sa montažom i ugrađivanjem zvučnika.

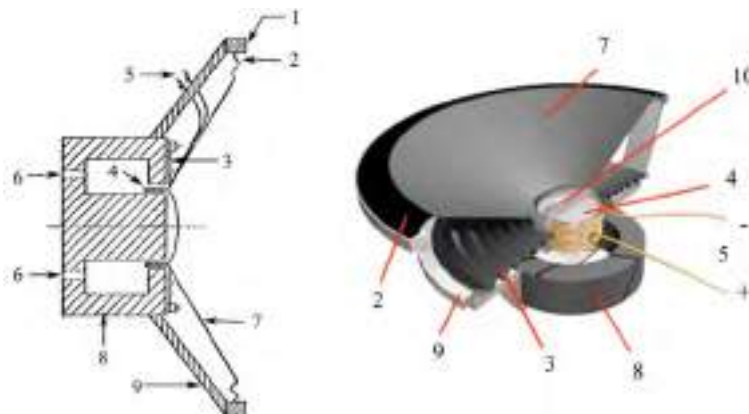
7.4 Konstrukcija elektrodinamičkog zvučnika

Elektrodinamički zvučnik, slika 7.3, se sastoji iz tri osnovne celine: kretnog sistema, magnetnog sklopa i korpe.

Kretni sistem čine membrana, kalem, elementi za centriranje i vođenje i provodnici. Membrana (7) treba da bude laka i kruta. Izrađuje se od različitih materijala (papir, plastika, metali, kompozitni materijali) i najčešće je konusnog oblika mada se prave i levkaste, kalotne i ravne membrane, o čemu će više govora biti u poglavlju 7.2. Kalem (4) je izrađen od većeg broja navojaka lak žice, namotanih na kalemskom telu, i međusobno slepljenih temperaturno otpornim vezivnim materijalom.

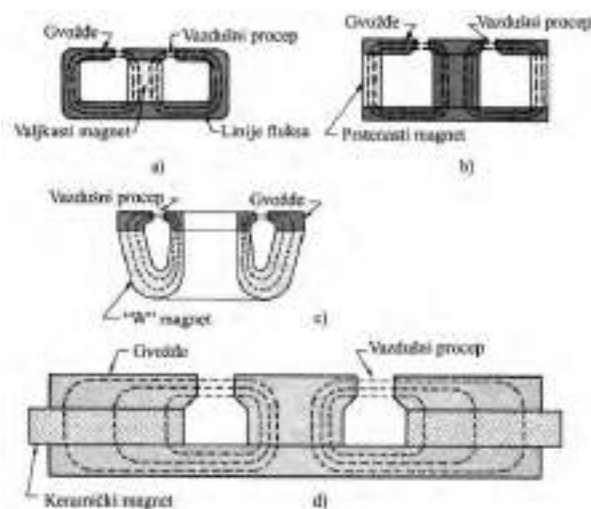
Kretni sistem je spojen za korpu zvučnika pomoću dve elastične veze: jedne postavljene po rubu membrane i druge fiksirane za membranu u neposrednoj blizini spoja sa kalemom. Rubna elastična veza (2) izrađena je

kao nastavak membrane sa upresovanim kružnim naborima ili kao poseban materijal nalepljen na membranu. Druga elastična veza (3) koja se naziva centrator obezbeđuje precizno centriranje kalema u prstenasto međugvožđe magneta dozvoljavajući mu kretanje samo u pravcu ose zvučnika. Na kretnom sistemu se nalaze i provodnici (5) kojima su krajevi kalema povezani sa priključcima montiranim na korpi zvučnika.



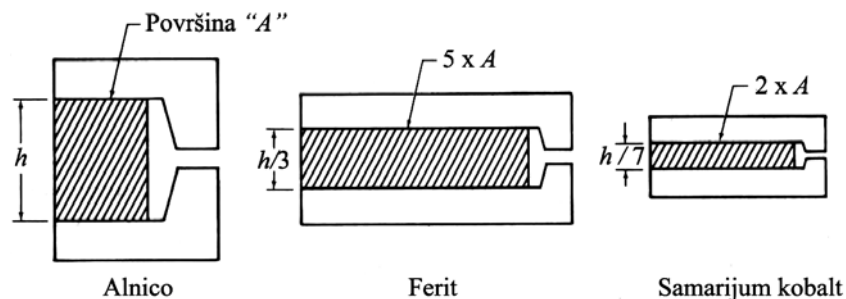
Slika 7.3 – Presek elektrodinamičkog zvučnika: 1-elastični podmetač po obodu korpe, 2-elastični rub membrane, 3-centrator, 4-kalem, 5-provodnici, 6-otvor za izjednačavanje pritiska, 7-membrana, 8-magnetni sklop, 9-korpa, 10-kalota

Korpa (9) povezuje sve elemente zvučnika u jednu celinu; izrađuje se od metala i na svom obodu ima otvore i elastične podmetače za ugradnju zvučnika. Na korpi se nalaze i priključci za povezivanje zvučnika sa izvorom audio signala.



Slika 7.4 – Različiti oblici magnetnog kola zvučnika

Magnetni sklop (8) zvučnika se sastoji od magneta i polnih nastavaka izrađenih od mekog čelika ili livenog gvožđa, slika 7.4. Osnovni zadatak magnetnog sklopa je da magnetnu energiju fokusira u prostor gde se nalazi kalem, odnosno u vazdušni procep. Gustina magnetnog fluksa, u vazdušnom procepu, kod niskotonskih zvučnika je između 1,1 i 1,3 T dok je kod kompresionih pobuđivača u granicama od 1,8 do 1,9 T. Magnetni sklop zajedno sa kalemom često se u literaturi naziva „motor zvučnika“.



Slika 7.5 – Tri ekvivalentna magnetna kola sa magnetima od Alnico materijala, ferita i samarijuma kobalta. Na slikama su označene relativne vrednosti površina i visina magneta.

Slika 7.5. Tri ekvivalentna magnetna kola sa magnetima od Alnico materijala, ferita i samarijuma kobalta. Na slikama su označene relativne vrednosti površina i visina magneta.

Za izradu stalnih magneta u zvučnicima danas se koriste tri vrste materijala; Alnico V, keramika i retke zemlje. Alnico je legura koja se dobija livenjem i njegov glavni sastojak kobalt je danas veoma skup i teško se dobija. Feriti predstavljaju prave keramičke materijale, dobijene presovanjem i pečenjem barijum ferita, i najveći broj magneta za zvučnike napravljen je od ovih materijala. Od materijala koji pripadaju grupi retke zemlje za magnete uglavnom se koristi samarijum kobalt, koji je takođe jedna vrsta pečene keramike. Magneti od samarijuma kobalta su jako skupi ali im je prednost što imaju male dimenzije i masu. Uglavnom se koriste za visokotonske zvučnike.

Ne ulazeći u razmatranje detaljnih karakteristika ovih materijala interesantno je napomenuti, da za iste uslove u vazdušnom procepu magnetnog sklopa, zapremine magneta napravljenih od samarijuma kobalta, Alnico V materijala i ferita se odnose približno kao 1:3,5:9, slika 7.5.

Detaljnije karakteristike magnetnog kola zvučnika, kao i načini koji se primenjuju za poboljšanje njegovih karakteristika izloženi su u odeljku 7.6.

Elektrodinamički zvučnik sličan današnjem prvi put je prikazan još 1924. godine. Od tog vremena on je pretrpeo mnoge izmene i poboljšanja

(pronađeni su novi materijali za izradu membrane, magnetnog sklopa i kalema, povećani su preciznost i kvalitet izrade većine sastavnih delova itd.) ali je osnovni način funkcionisanja ostao neizmenjen. Danas se on izrađuje u svim veličinama (od malih jedinica prečnika nekoliko centimetara i snage manje od 1 W do veoma snažnih pretvarača prečnika reda pola metra i snage nekoliko stotina vati) i za sve opsege frekvencija.

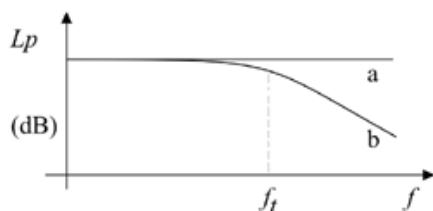
Konstruktivno rešenje elektrodinamičkog zvučnika omogućava vrlo velike pomeraje kretnog sistema, pri čemu se postižu velike snage zračenja. Kod ostalih tipova pretvarača (kod elektromagnetnog ili elektrostatičkog na primer) ovo nije slučaj jer kod njih veliki pomeraji dovode do neprihvatljivih vrednosti izobličenja. To je glavna prednost elektrodinamičkog zvučnika i razlog što njegova primena u praksi višestruko prevazilazi sve ostale tipove zvučnika zajedno.

7.5 Membrane zvučnika

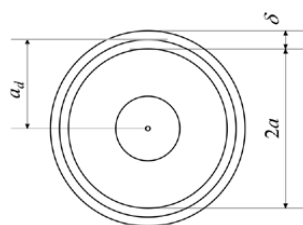
7.5.1 Aproksimacija membrane krutim klipom

Membranu zvučnika u prvoj aproksimaciji predstavljamo krutim ravnim klipom.

Frekvencijska karakteristika pritiska koji stvara kruti klip u smeru svoje ose, vibrirajući konstantnom brzinom, potpuno je ravna, slika 7.6a. Karakteristika snage zračenja međutim opada na višim frekvencijama, jer zračenje klipa postaje usmereno.



Slika 7.6 – Frekvencijska karakteristika (a) i karakteristika snage (b) krutog klipa.



Slika 7.7 – Efektivni poluprečnik membrane

Prelomnu frekvenciju na kojoj frekvencijska karakteristika snage zračenja počinje da pada označićemo sa f_t i ona je data relacijom:

$$f_t = \frac{c}{2\pi r} \quad (7.4)$$

gde je: c - brzina zvuka, a r - poluprečnik klipa.

Ako u izraz (7.4) umesto r unesemo efektivni poluprečnik membrane a_d dobijamo frekvenciju:

$$f_k = \frac{c}{2\pi a_d} = \frac{54,9}{a_d} \quad (7.5)$$

koju nazivamo gornjom granicom „opsega klipa“ za datu membranu. Može se smatrati da je efektivni poluprečnik membrane jednak poluprečniku krutog dela a , uvećanom za polovinu širine spoljašnjeg elastičnog prstena, $\delta/2$, slika 7.7, odnosno:

$$a_d = a + \frac{\delta}{2} \quad (7.6)$$

Ispod frekvencije f_k svi delovi membrane se, u datom trenutku, pomeraju u istom smeru i membrana stvarno deluje kao kruti klip. Iznad ove frekvencije kretanje membrane je mnogo složenije, usled čega njene akustičke karakteristike znatno odstupaju od karakteristika krutog ravnog klipa.

Pre svega treba imati u vidu da membrana zvučnika nije idealno kruta. To je u osnovi savitljiva ljuska odgovarajućeg osno-simetričnog oblika, na koju je na pogodan način pričvršćen kalem. Zbog svoje savitljivosti membrana ne može u potpunosti da prati kretanje kalema na višim frekvencijama. Ona se deli na površine koje se, u datom trenutku, pomeraju različitim brzinama i u različitim smerovima. Stoga su karakteristike zračenja membrane na višim frekvencijama veoma složene.

Pored toga, i sam oblik membrane, koja je obično neka kriva površina, nameće dodatna ograničenja na karakteristike zračenja. Sve ove pojave dovode do izobličenja akustičkog signala i naročito pogoršavaju impulsnu karakteristiku zvučnika.

7.5.2 Membrana kao mehanički sistem

Mehanički sistem koji vibrira u svakom trenutku ima određenu kinetičku (usled mase) i potencijalnu (usled krutosti) energiju. Ako pri tome dolazi i do deformacije određeni deo mehaničke energije pretvara se u toplotu, disipira se. Količina energije pretvorena u toplotu prvenstveno zavisi od unutrašnjeg prigušenja materijala.

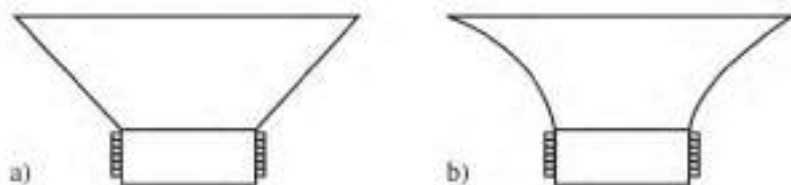
Tako u dinamičkim uslovima i membranu zvučnika karakteriše njenom masom, krutošću i unutrašnjim (strukturnim) prigušenjem. Iz praktičnih razloga potrebno je da membrana ima što manju masu, a što veću krutost i unutrašnje prigušenje. Mala masa membrane daje mogućnost za veću efikasnost zvučnika. Veća krutost obezbeđuje ravnomerniju karakteristiku reprodukcije na višim frekvencijama, odnosno širi radni opseg membrane. Naime, pri većoj krutosti svi elementi membrane se u datom trenutku u širem frekvencijskom opsegu, pomeraju u istom smeru i membrana se ponaša kao jedna celina. Ako je pak krutost mala, membrana, na relativno niskim frekvencijama, počinje vibrirati deo po deo - lomi se. Svi

njeni delovi više ne zrače u fazi. Dolazi do pojava rezonanci sa pojačanim i antirezonanci sa smanjenim zračenjem.

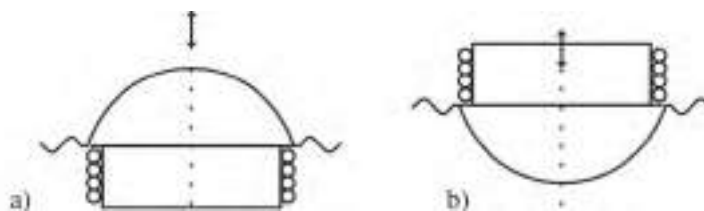
Ako je materijal membrane sa većim unutrašnjim prigušenjem manje su amplitude vibracija na rezonancama i brže je njihovo opadanje. Ovo ima za posledicu ravniju karakteristiku reprodukcije i bolju impulsnu karakteristiku na višim frekvencijama.

7.5.3 Oblici membrana

Idealna membrana zvučnika trebalo bi da ima oblik ravnog diska. Međutim, kod ravne membrane veoma je teško, pri datoj debljini, postići odgovarajuću krutost. Stoga se u praksi koriste membrane različitih geometrijskih oblika sa ciljem da se poveća njihova krutost pri aksijalnom vibriranju.



Slika 7.8 – Konusna (a) i levkasta (eksponecijalna) membrana (b)



Slika 7.9 – Kalotne membrane: (a) konveksna, (b) konkavna

Najčešće se sreću konusne membrane, ili tačnije membrane oblika zarubljene kupe, slika 7.8a. Modifikacijom ovog oblika dobijaju se levkaste membrane, sa zakrivljenim izvodnicama, obično eksponencijalnim, slika 7.8b. Konusne i levkaste membrane po pravilu se koriste kod niskotonskih i srednjetonkih zvučnika. Kod visokotonskih zvučnika i pobuđivača za srednjetonke i visokotonske levkove koriste se kalotne membrane. Zavisno od toga koja strana zrači razlikujemo konveksne (slika 7.9a) i konkavne (slika 7.9b) kalotne membrane.

U novije vreme mogu se čak sresti i zvučnici sa potpuno ravnim membranama. To su višeslojne (sendvič) strukture specifične izrade, sa izuzetno velikom krutošću na savijanje.

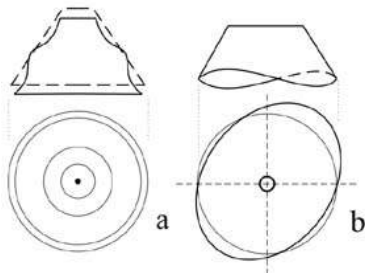
7.5.4 Akustičke karakteristike membrana

Membrane različitih oblika različito se ponašaju pri aksijalnoj pobudi na vibracije. Njihove akustičke karakteristike su stoga, u velikoj meri, zavisne ne samo od karakteristika materijala od kojeg su izrađene nego i od njihovog oblika.

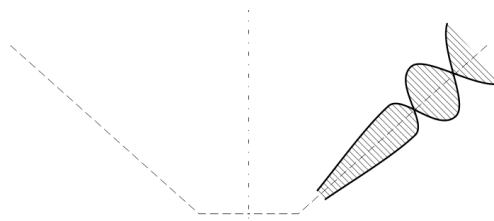
Konusne membrane

Konusna membrana, slika 7.8a, pobuđuje se na vibracije u aksijalnom smeru ravnomerno raspodeljenom silom po svojoj unutrašnjoj ivici. Tačan zakon kretanja membrane može se opisati sistemom diferencijalnih jednačina prvog reda koji se rešava numerički.

U novije vreme zakon kretanja konusne membrane rešen je i metodom konačnih elemenata. Ovde nećemo ulaziti u detalje pomenutih postupaka već ćemo izložiti suštinu dobijenih rezultata.



Slika 7.10 – Simetrične (a) i nesimetrične (b) rezonance konusne membrane



Slika 7.11 – Jedan od načina deformacije konusne membrane pri vibriranju u aksijalnom pravcu

Kako je već rečeno, na najnižim frekvencijama membrana se ponaša kao kruti klip. Zatim, iznad određene frekvencije u membrani nastaju longitudinalni i transverzalni (fleksioni) talasi. Ovi talasi se u konusnoj membrani uvek pojavljuju zajedno i od njihove međusobne interakcije zavise oblici vibriranja membrane. Oba tipa talasa prostiru se od centra membrane prema njenoj spoljašnjoj ivici, gde se reflektuju, menjaju smer kretanja i stižu ponovo na mesto pobude. Kada su reflektovani talasi na mestu pobude u fazi sa direktnim, kažemo da je nastala rezonansa. Amplituda pomeraja unutrašnje ivice membrane tada je znatno povećana. Takođe, postoje frekvencije na kojima su reflektovani talasi u protivfazi sa direktnim. To su frekvencije antirezonansi gde je amplituda pomeraja unutrašnje ivice smanjena. Ovo važi kako za longitudinalne tako i za transverzalne talase.

Na membrani se formiraju dva tipa rezonanci: osno-simetrične sa koncentričnim čvornim linijama i nesimetrične sa dijametralnim čvornim

linijama, slika 7.10. Doprinos nesimetričnih rezonansi ukupnom zračenju membrane neznatan je, ali ove rezonanse pogoršavaju impulsnu karakteristiku membrane.

Simetrične rezonanse značajno utiču na frekvencijsku karakteristiku membrane o čemu ćemo dalje nešto više reći. Treba imati u vidu da su rezonanse najznačajniji uzrok „koloriteta“ kod zvučnika sa konusnim membranama.

Usled interakcije između longitudinalnih i transverzalnih talasa na membrani se formira granični krug - čvorna linija sa nultim longitudinalnim pomerajem. Ovaj krug deli membranu na dva dela sa potpuno različitim oblicima vibriranja. Kažemo da se membrana „lomi“.

Deo membrane unutar graničnog kruga ponaša se i dalje kao klip smanjenog poluprečnika, gde se prostiru pretežno longitudinalni talasi. Na delu membrane izvan graničnog kruga prostiru se pretežno transverzalni (fleksioni) talasi, slika 7.11.

Levkaste membrane

Često se umesto konusnih membrana koriste tzv. levkaste membrane ili membrane sa zakrivljenim izvodnicama, slika 7.8b. Ovakav oblik povećava krutost na dijametralno savijanje, tako da su frekvencije dijametralnih rezonanci više nego kod konusnih membrana. S druge strane krivina smanjuje krutost membrane na koncentrično savijanje pa su frekvencije opsega lomljenja membrane niže nego kod odgovarajuće konusne membrane.

Kalotne membrane

Kalotne membrane su ljske u obliku odsečka sfere. Razlikujemo meke i tvrde kalotne membrane.

Meke kalotne membrane su po pravilu konveksne. Imaju zonu »lomljenja« dosta nisku. Iako je prigušenje materijala dovoljno da obezbedi ravnu frekvencijsku karakteristiku nedostatak ovih membrana je pojava histerezisa. Meke membrane imaju relativno visoku i neprigušenu osnovnu rezonancu.

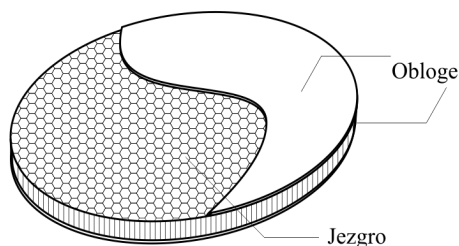
Krute kalotne membrane imaju veliku krutost i malu težinu. Izrađuju se kao konveksne ili konkavne, mada su ove prve češće. Kod njih je zona lomljenja veoma visoka, a usled lošijeg prigušenja posledice »lomljenja« mnogo su jače izražene nego kod mekih membrana.

Profil i veličina kalotnih membrana veoma zavisi od izabranog materijala. Krute kalotne membrane su obično pliće (manje visine) dok su meke kalotne membrane strmijeg - više konusnog oblika, radi povećanja krutosti i proširenja radnog opsega.

Ravne membrane

Videli smo da membrane koje smo prethodno prikazali, čak i kada bi bile idealno krute, ne mogu imati ravnu frekvencijsku karakteristiku na višim frekvencijama usled interferencije zvučnih talasa od pojedinih njihovih delova.

Savremena tehnologija dozvoljava da se izrade ravne - sendvič membrane čiji je radni opseg na višim frekvencijama širi nego kod membrana drugih oblika.



Slika 7.12 – Sendvič struktura

Tu se radi o specijalnim višeslojnim konstrukcijama kakve se sreću u izradi elemenata aviona. Membrana je realizovana kao sendvič sa jezgrom od heksagonalnih ćelija u obliku saća, slika 7.12. Sa obe strane jezgra su ravne obloge od lakog materijala. Krutost na savijanje ovakve membrane je veoma velika.

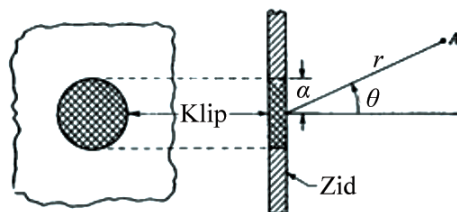
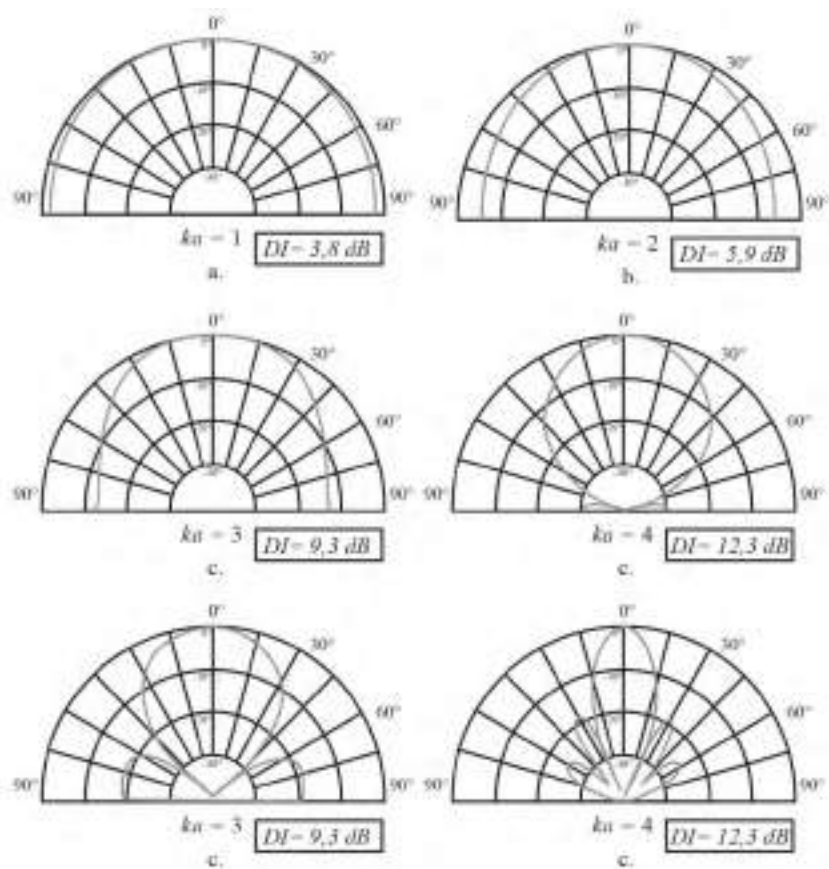
Heksagonalne ćelije se izrađuju od aluminijumske folije, te je ispunjen i zahtev da ukupna masa sendviča bude mala.

Materijali za membrane

Zvučničke membrane se danas proizvode od različitih materijala. To su najčešće: papir, metalne folije, plastika, impregnirano platno, kompozitni materijali, porozni metali i sendvič strukture. Koji će materijal biti upotrebljen zavisi od više faktora. Pre svega to su cena izrade, tehnološki nivo proizvođača, tip i kvalitet zvučnika, oblik membrane itd.

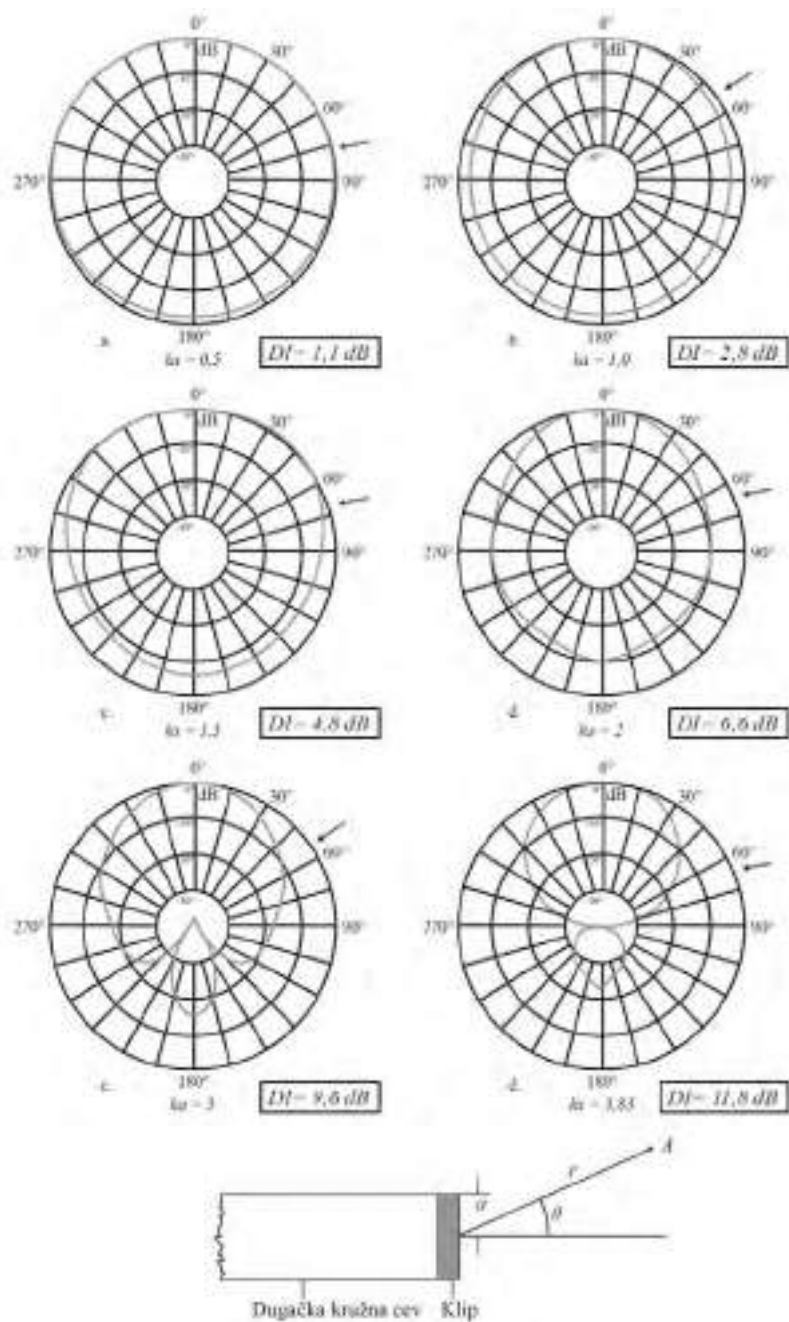
Zračenje klipne membrane

Karakteristike usmerenosti membrane zvučnika, koju u frekvencijskom opsegu njenog rada možemo smatrati krutim klipom, zavise od načina ugradnje i odnosa njenih dimenzija prema talasnoj dužini zvuka. Na slici 7.13 su prikazane karakteristike usmerenosti krutog kružnog klipa poluprečnika a ugrađenog u beskonačnu ravan[1]. Sa slike se vidi da sa porastom frekvencije (odnosno odnosa poluprečnika klipa i talasne dužine zvuka) zračenje postaje sve usmerenije. Pored toga, na višim frekvencijama se pojavljuju, pored osnovne, i sekundarne petlje zračenja.

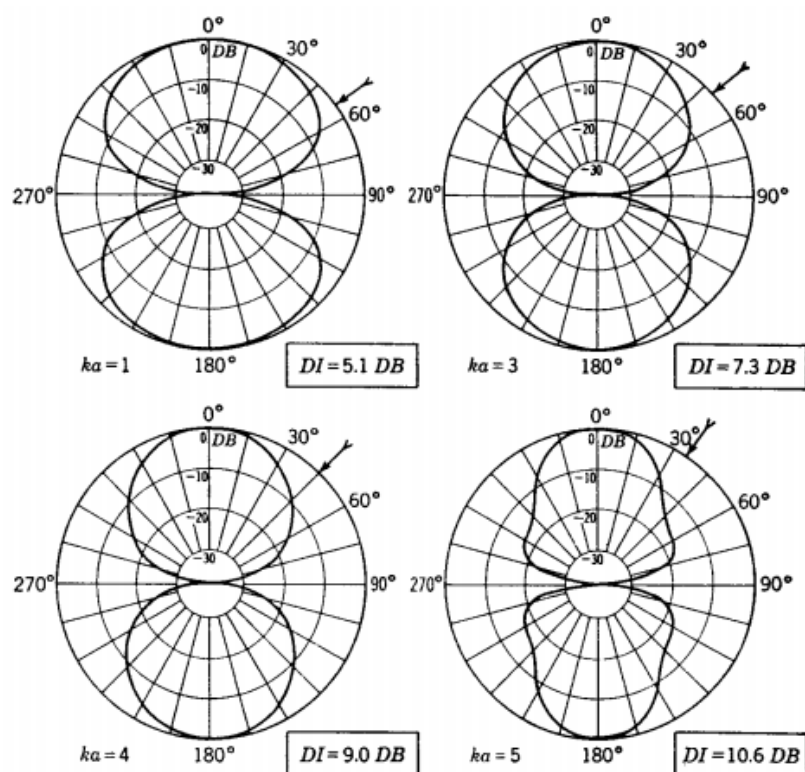


Slika 7.13 – Karakteristike umerenosti krutog kružnog klipa poluprečnika a u beskonačnoj ravni (DI predstavlja vrednost indeksa direktivnosti)[1]

Karakteristike usmerenosti su unekoliko drugačije ako se klip ugradi na kraj dugačke cevi, slika 7.14[1]. I u ovom slučaju se primećuje sužavanje karakteristike zračenja sa porastom frekvencije. Pored toga, na višim frekvencijama se pojavljuje i zadnja petlja zračenja.



Slika 7.14 – Karakteristike usmerenosti krutog kružnog klipa poluprečnika a na kraju dugačke cevi (DI predstavlja vrednost indeksa direktivnosti)[1]



Slika 7.15 – Karakteristike usmerenosti krutog kružnog klipa poluprečnika a u slobodnom prostoru (DI predstavlja vrednost indeksa direktivnosti)[1]

Kada neugrađen klip zrači u slobodnom prostoru karakteristike usmerenosti sa njegove prednje i zadnje strane su identične, slika 7.15 [1]. Naravno, i ovde je zračenje usmerenije što se radi o višim frekvencijama.

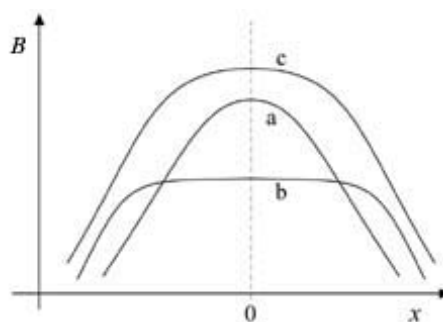
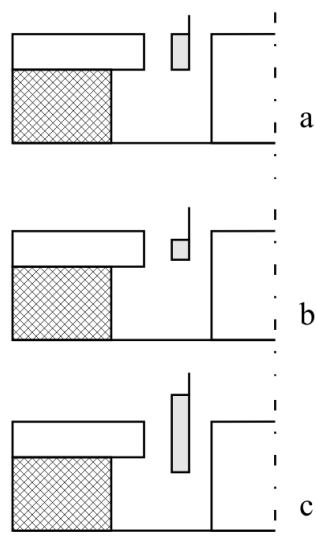
7.6 Izobličenja u magnetnom sklopu zvučnika

Magnetni sklop zvučnika je zbog svoje geometrije, fizičkih karakteristika i načina rada izvor različitih vidova izobličenja. Izobličenja u najvećem stepenu nastaju zbog kretanja kalema u nelinearnom magnetnom polju i porasta njegove temperature.

7.6.1 Magnetno polje u procepu

Kalem zvučnika se pri kretanju ne nalazi sve vreme u magnetnom polju konstantne jačine. Sa udaljavanjem kalema od svog centralnog položaja jačina polja je sve manja. Usled toga se smanjuje vrednost proizvoda $B \cdot l$ što dovodi do linearnih izobličenja reprodukovanog signala. U praksi se koriste tri različita oblika sklopa kalem – vazdušni procep prikazana na slici 7.16. Koji od ovih sklopova će biti primenjen uvek se

rešava kroz kompromis između njegove cene, linearnosti i efikasnosti. Kada je visina kalema približno jednaka visini procepa, slika 7.16a, tada stepen iskorišćenja zvučnika, najveći (najveći deo kalema je u jakom magnetnom polju). Međutim, linearnost magnetnog polja u procepu je loša, slika 7.17a, što je potencijalni uzrok velikih izobličenja. Ovakav sklop se obično koristi kod kompresionih pobuđivača gde je potreban veliki koeficijent korisnog dejstva i gde su pomeraji membrane relativno mali. Ako je visina kalema znatno manja od visine procepa, slika 7.16b, tada zvučnik ima malu masu kretnog sistema, mali proizvod $B \cdot l$, ali veoma dobru linearnost magnetnog polja u kojem se kalem kreće. Prelazak iz linearnog u nelinearno područje je veoma oštar, slika 7.17b.



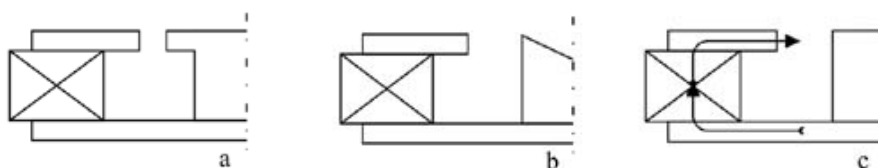
Slika 7.17 – Magnetna indukcija B u procepu u funkciji položaja kalema x za različite oblike sklopa kalem-procep prikazane na slici 7.16

Slika 7.16 – Različiti oblici sklopa kalem-vazdušni procep

Međutim, ako želimo da zadržimo dimenzije kalema kao u prethodnom slučaju, tada visina procepa mora biti veća. To dalje zahteva, u istom odnosu, veću površinu magneta, odnosno skuplji magnet, uz dobitak u većem pomeraju, odnosno većoj akustičkoj snazi.

Kalem znatno veće visine od visine procepa, slika 7.16c, najčešće se koristi kod zvučnika za niske frekvencije predviđenih za direktno zračenje, gde se traži veliki pomeraj membrane. Nedostaci ovoga sklopa su veća masa i veća otpornost kalema, što utiče na smanjenje efikasnosti zvučnika i povećanje njegovog Q faktora. Odvođenje toplote kalema je takođe otežano, ali se može uspešno rešiti.

U ovom sklopu je takođe važno obezbediti da magnetno polje u procepu, u odnosu na centralni položaj kalema, bude simetrično. Tada će u reprodukovanom signalu postojati samo neparni harmonici. Simetrija magnetnog polja može se postići na neki od načina prikazanih na slici 7.18. U slučaju 7.18a smanjuje se unutrašnje rasipno polje, dok se u slučaju 7.18b smanjuje spoljašnje rasipno polje. Kada je otvor magneta približno jednak spoljašnjem prečniku procepa, slika 7.18c, magnet zbog svoje anizotropne strukture ne dozvoljava linijama fluksa da ga napuštaju sa strane već samo kroz gornju ploču magnetnog sklopa, čime se takođe dolazi do poboljšane simetrije polja u procepu.



Slika 7.18 – Načini za postizanje simetrije magnetnog polja u vazдушnom procepu zvučnika

7.6.2 Porast temperature u kalemu

Što je veća električna snaga kojom se napaja zvučnik to se njegov kalem više zagreva i raste mu otpornost. Nije redak slučaj da temperatura kalema zvučnika, pri normalnom radu, pređe vrednost od 200°C , kada je otpornost kalema veća za oko dva puta u odnosu na vrednost koju ima na normalnoj temperaturi. Usled ovoga se smanjuje stepen iskorišćenja, odnosno izlazna akustička snaga. Zbog povećane otpornosti kalema smanjuje se i električna snaga kojom se zvučnik napaja iz pojačavača snage (izvor konstantnog napona), pa je i iz tog razloga manja akustička snaga zvučnika. Ova pojava se naziva kompresija snage. Razlikujemo dva njena oblika: stacionarnu i trenutnu kompresiju snage.

Stacionarna kompresija snage odnosi se na duže vremenske intervale i njen uticaj se manifestuje u smanjenju akustičke snage zvučnika i promeni nekih njegovih baznih parametara (Q_{es} , recimo). Ovo se dalje odražava na promenu niskofrekventnog dela frekvencijske karakteristike kompletnog zvučničkog sistema. Takođe, ovo može dovesti do izobličenja u frekvencijskoj karakteristici višepojasnih sistema, gde kalem jednog zvučnika može imati temperaturu koja se znatno razlikuje od temperature kalemova drugih zvučnika.

Trenutna kompresija snage smanjuje sposobnost zvučnika da reaguje na trenutne promene ulazne snage koje su mnogo veće od srednje snage koju zvučnik prima. U ovim slučajevima kalem se brzo zagreje (za $30\text{-}40^{\circ}\text{C}$ za jednu sekundu, ili čak za oko 150°C za 3-4 sekunde) usled čega

dolazi do kratkotrajnog pada izlazne snage zvučnika poznatog pod nazivom „termičko klipovanje“.

Jedini način da se smanji termička kompresija kod zvučnika je da se toplota što efikasnije odvede sa kalema u okolni prostor ili da se napravi efikasniji zvučnik.

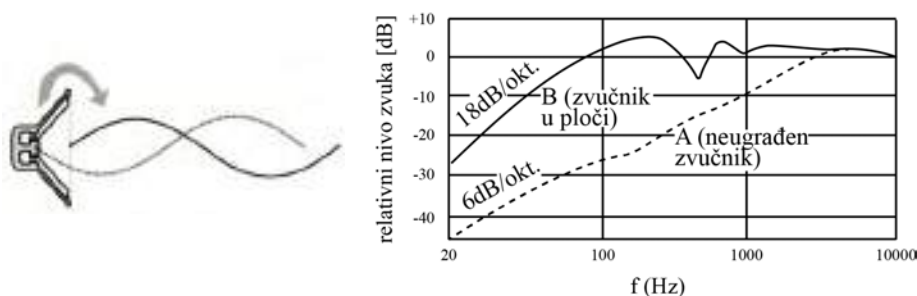
7.7 Ugrađivanje zvučnika

7.7.1 Neugrađen zvučnik

Membrana zvučnika zrači zvučne talase sa svoje obe strane, prednje i zadnje. To zračenje je u protivfazi, kako je šematski prikazano na slici 7.19a. Zvučni talasi koji nastaju na jednoj strani membrane stižu, oko zvučnika, do druge strane membrane gde se poništavaju sa protivfaznim zvučnim talasima koji tamo nastaju. U tom slučaju kažemo da je došlo do *akustičkog kratkog spoja* i zračenje zvučnika je oslabljeno, tim više što se radi o nižim frekvencijama, kriva A na slici 7.19b.

a)

b)



Slika 7.19 – Zračenje zvučnika na niskim frekvencijama: a) akustički kratak spoj, b) frekvencijske karakteristike neugrađenog (A) i zvučnika u ploči (B).

Da bi se popravila reprodukcija niskih frekvencija zvučnici se ugrađuju u tzv. akustičke zastore - ploče ili kutije. Na taj način se razdvaja zračenje prednje i zadnje strane membrane, eliminiše se akustički kratak spoj, i proširuje se radni opseg zvučnika prema niskim frekvencijama, kriva B na slici 7.19b.

Zvučnik zajedno sa elementom u koji je ugrađen (ploča, kutija) radi poboljšanja svojih karakteristika zračenja, čini zvučnički sistem ili zvučničku kombinaciju. Složeniji zvučnički sistemi u svome sastavu imaju više zvučnika i određene elektronske sklopove kao što su: skretnice, oslabljivači, korektori, zaštitna kola itd. Oni zvučnički sistemi kod kojih membrana i drugi zračeći elementi (bas-refleks kanal, pasivni radijator itd.) prenose akustičku energiju direktno u prostor (bez bilo kakvih prilagođivača akustičke impedanse) nazivaju se zvučničkim sistemima sa direktnim

zračenjem. Među njima su najpoznatiji: zvučnički sistemi sa zvučnikom u ploči, zvučnički sistemi sa zatvorenom kutijom, zvučnički sistemi sa bas-refleks kutijom, zvučnički sistemi sa pasivnim radijatorom, zvučnički sistemi sa spregnutim komorama i zvučnički sistemi sa labirint-kutijom.

Radi povećanja stepena iskorišćenja često se zvučnicima dodaju i elementi za prilagođenje impedanse zračenja - levkovi. Levak u stvari igra ulogu akustičkog transformatora, tako što malu impedansu zračenja na svom slobodnom kraju, preslikava u znatno veću na mestu spoja sa zvučnikom. Tako se povećava snaga zračenja a usled toga i stepen iskorišćenja zvučnika.

Gradnja zvučničkih sistema uopšte, u ranijim periodima njihove primene, svodila se na postupak „probe i greške“ potpomognut iskustvom. Odabiran je pogodan zvučnik i ugrađivan u kutije različitih konstrukcija, dok se probanjem nije došlo do sistema čije karakteristike zadovoljavaju. Kao proba u većini slučajeva korišćeni su „slušalački testovi“, jer su akustički merni metodi, naročito na niskim frekvencijama, bili ograničeni i nepouzdati. Slušalački test je, svakako, važan konačni kriterijum za potvrdu karakteristika nekog zvučničkog sistema, međutim, kao metod za njegovo optimalno podešavanje tokom izrade, on je loše rešenje.

Vremenom je ovakav način konstrukcije prevazilažen, uz uporedno uvođenje metoda sinteze, slično sintezi električnih kola. Da bi se moglo govoriti o bilo kakvoj sintezi u ovoj oblasti, pre svega je valjalo shvatiti da se zvučnik i kutija (ili drugi element u koji se zvučnik ugrađuje) ne mogu razvijati i proizvoditi potpuno nezavisno jedno od drugog, već se moraju tretirati kao jedinstven sistem. Posredstvom elektroakustičkih analogija sinteza ovakvog sistema (na niskim frekvencijama) svodi se na dobro poznate metode sinteze filtera propusnika visokih frekvencija.

U zavisnosti od željene prenosne funkcije sistema, nalaze se međusobne relacije koje moraju zadovoljiti parametri zvučnika i kutije. To praktično znači potrebu gradnje zvučnika i kutije unapred zadatih karakteristika. Ovakav način konstrukcije zvučničkih sistema danas je široko prihvaćen i daje veoma dobre rezultate. Nove merne metode za merenja na niskim frekvencijama dale su svoj značajan doprinos u razvoju ove oblasti.

7.7.2 Bazni parametri zvučnika

Fizički elektromehanički parametri zvučnika koji ga definišu kao elektroakustički pretvarač su:

R_e - otpornost kalema zvučnika za jednosmernu struju,

B - magnetna indukcija u vazdušnom procepu,

l - dužina namotaja u magnetnom polju,

L_e - induktivnost kalema zvučnika,

C_{ms} - mehanička elastičnost vešanja kretnog sistema zvučnika,
 m_s - masa kretnog sistema zvučnika,
 R_{ms} - mehanička otpornost vešanja kretnog sistema zvučnika,
 S_d - površina membrane zvučnika.

Ako se mehanički parametri kretnog sistema zvučnika m_s , C_{ms} i R_{ms} prebace u ekvivalentno akustičko kolo (vidi poglavlje Analogije) dobićemo njihove akustičke ekvivalente definisane kao:

$$m_{as} = \frac{m_{ms}}{S_d^2} - \text{akustička induktivnost zvučnika,}$$

$$C_{as} = S_d^2 C_{ms} - \text{akustička kapacitivnost zvučnika i}$$

$$R_{as} = \frac{R_{ms}}{S_d^2} - \text{akustička otpornost zvučnika.}$$

Međutim, u analizi i konstrukciji zvučničkih sistema, mnogo je podesnije zvučnik predstavljati sa tri bazna, tzv. „Thiele-Small“ parametra [3], [6]. Bazni parametri zvučnika povezani su sa pomenutim fizičkim parametrima, ali se lakše od njih mere i omogućavaju prostiji rad pri analizi i sintezi zvučničkih sistema. To su:

- frekvencija rezonanse zvučnika:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{as}m_{as}}} \quad (7.7)$$

koja se obično daje za zvučnik u vazduhu ili za zvučnik ugrađen u standardnu ploču;

- zapreminski ekvivalent akustičke kapacitivnosti zvučnika (zapremina vazduha koji ima istu akustičku kapacitivnost kao i kretni sistem zvučnika):

$$V_{as} = \rho c^2 C_{as} \quad (7.8)$$

- ukupni Q faktor zvučnika na frekvenciji f_s koji uzima u obzir sve gubitke u njemu (mehaničke i električne):

$$Q_{ts} = \frac{m_{as}\omega_s}{R_{at}} \quad (7.9)$$

Ovde je:

$$R_{at} = R_{as} + \frac{B^2 l^2}{(R_g + R_e)S_d^2} \quad (7.10)$$

Ukupni Q faktor zvučnika Q_{ts} može se izraziti preko dva Q faktora od kojih jedan predstavlja samo električne (Q_{es}) a drugi samo mehaničke gubitke (Q_{ms}), odnosno:

$$Q_{es} = \frac{m_{as}\omega_s}{B^2 l^2 / (R_g + R_e) S_d^2} \quad (7.11)$$

$$Q_{ms} = \frac{m_{as}\omega_s}{R_{as}} \text{ ili} \quad (7.12)$$

$$Q_{ts} = \frac{Q_{es}Q_{ms}}{(Q_{es} + Q_{ms})}. \quad (7.13)$$

7.7.3 Površina membrane zvučnika

Proizvođači nekada daju u prospektnoj dokumentaciji podatak o efektivnom proluprečniku ili površini membrane zvučnika. Ukoliko nije dat, ovaj podatak se uvek može lako odrediti prema izrazu (7.6), gde je definisan efektivni poluprečnik membrane a_d , pa je njena površina:

$$S_d = \pi a_d^2 \quad (7.14)$$

7.7.4 Parametri zvučničke kutije

Najvažnija karakteristika kutije je njena fizička zapremina V_b . Efektivna zapremina kutije V_{ab} može biti veća ili jednaka fizičkoj zapremini V_b zavisno od uslova kompresije vazduha u kutiji. To se obično izražava sledećom relacijom:

$$V_{ab} = \gamma V_b \quad (7.15)$$

gde je u praksi $1 \leq \gamma \leq 1,2$. Kada je kutija prazna tada je $\gamma = 1$, a kada je kutija ispunjena apsorpcionim materijalom onda se uzima da je vrednost konstante $\gamma = 1,2$.

Akustička kapacitivnost kutije sada se može izraziti relacijom:

$$C_{ab} = \frac{V_{ab}}{\rho c^2} \quad (7.16)$$

Kod zvučničkih sistema sa bas-refleks kanalom i pasivnim radijatorom, kao što ćemo kasnije videti, akustička kapacitivnost kutije i akustička induktivnost kanala (ili pasivne membrane) stupaju u rezonansu na niskim frekvencijama. Na taj način se u okolini rezonanse pojačava zračenje ovih zvučničkih sistema i proširuje se njihov radni opseg. Frekvencija na kojoj nastaje ova rezonansa određena je relacijom:

$$f_b = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{ab}m_{ap}}} \quad (7.17)$$

gde su C_{ab} akustička kapacitivnost kutije a m_{ap} akustička induktivnost bas - refleks kanala ili membrane pasivnog radijatora.

7.7.5 Parametri zvučničkog sistema

Izrazi koji predstavljaju karakteristične veličine zvučničkog sistema sa direktnim zračenjem su relativno komplikovani, pa je u analizi ovih sistema uobičajeno da se koriste odnosi prethodno definisanih parametara

zvučnika i kutije. To su tzv. "parametri sistema", definisani na sledeći način [6], [7], [10], [11]:

$$\alpha = \frac{C_{as}}{V_{ab}} = \frac{V_{as}}{V_{ab}} \quad (7.18)$$

$$\delta = \frac{C_{ap}}{C_{ab}} = \frac{V_{ap}}{V_{ab}} \quad (7.19)$$

$$h = \frac{f_b}{f_s} \quad (7.20)$$

$$y = \frac{f_p}{f_s} \quad (7.21)$$

Uz ova četiri parametra (α , δ , h , i y) koji su dati kao odnosi istorodnih veličina, sistem karakteriše još njegov ukupni Q faktor Q_t za koji se uzima da je:

$$Q_t \approx Q_{ts} \quad (7.22)$$

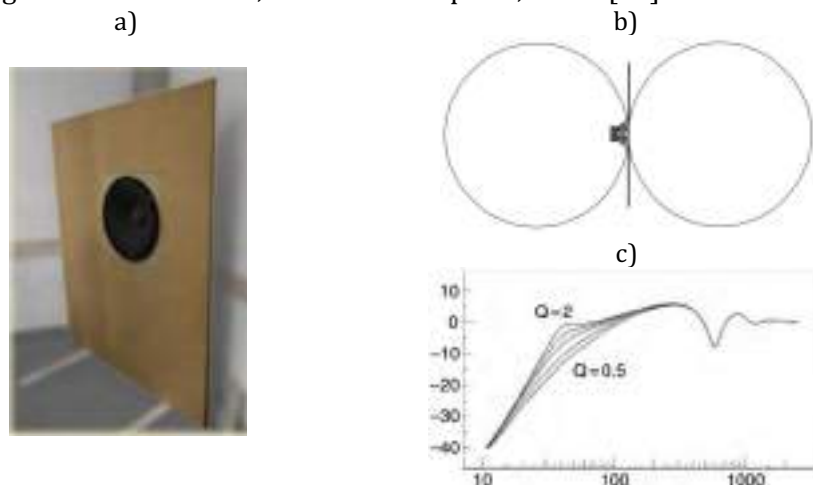
Rezultate analize pojedinih zvučničkih sistema u narednim poglavljima prikazaćemo uz zanemarivanje gubitaka u kutiji (curenje i apsorpcija akustičke energije) čiji uticaj je veoma mali i u praksi nije od značaja. Tako se broj promenljivih, preko kojih se mogu izraziti sve važne veličine zvučničkog sistema sa direktnim zračenjem, u najopštijem slučaju, svodi na ukupno pet: α , δ , h , y i Q_t .

7.8 Zvučnički sistemi sa zvučnikom u ploči

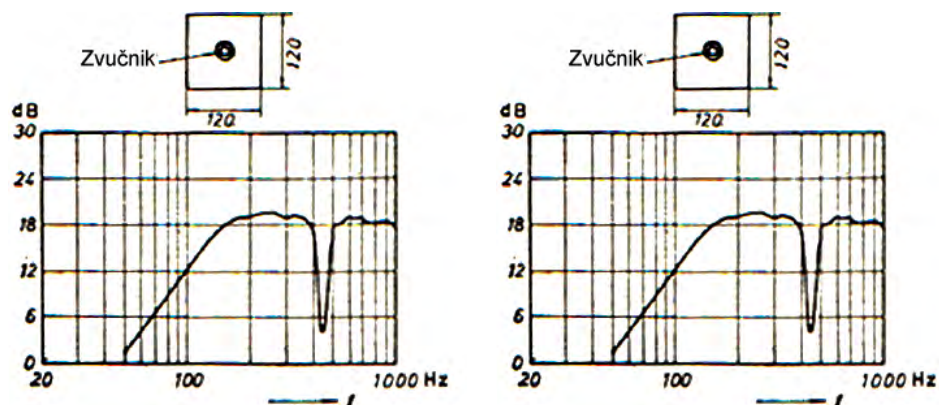
Najprostiji akustički zastor za ugradnju zvučnika je ravna ploča, slika 7.20a. Da bi se efikasno eliminisalo međusobno poništavanje zračenja sa prednje i zadnje strane membrane zvučnika, slika 7.20b, potrebno je da ploča ima što veće dimenzije. Potpuno razdvajanje protivfaznih zvučnih talasa postiglo bi se pločom beskonačno velikih dimenzija. Međutim, u praksi je dovoljno da dimenzije ploče budu veće od $\lambda/2$, gde je λ talasna dužina zvuka na najnižoj frekvenciji od interesa. Za više frekvencije ova ploča će delovati kao da je beskonačno velika, dok na najvišim frekvencijama, slika 7.19b, nema razlike da li je zvučnik ugrađen u ploču ili je „go“, jer su dimenzije korpe zvučnika dovoljne da razdvoje protivfazno zračenje sa dve strane membrane.

Na niskim frekvencijama oblik frekvencijskog odziva zvučnika će zavisiti od vrednosti njegovog Q faktora, slika 7.20c, dok se na najnižim frekvencijama nagib krive odziva približava vrednosti od 18 dB/oktavi [43]. Ploča ne treba da ima pravilan simetrični oblik, kao što su krug ili kvadrat, jer tada dolazi do nepoželjnih interferencija talasa sa prednje i zadnje strane zvučnika pa se u frekvencijskoj karakteristici pojavljuje naglašen usek, slika

7.21a. Frekvencijsku karakteristiku je moguće popraviti i tako, što će se zvučnik ugraditi nesimetrično, izvan središta ploče, 7.21b [31].



Slika 7.20 – Zvučnik u ploči: a) izgled zvučnika ugrađenog u ploču, b) arakteristika usmerenosti, c) frekvencijske karakteristike za različite vrednosti njegovog Q faktora [43].



Slika 7.21 – Uticaj položaja zvučnika na ploči na ukupnu frekvencijsku karakteristiku [31].

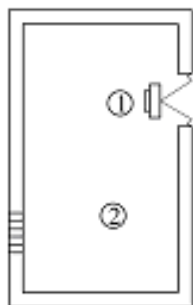
Ploče kao akustički zastori za ugradnju zvučnika su nepraktično velikih dimenzija ako je potrebna reprodukcija iole nižih frekvencija. Usled toga ih nećemo sresti u praktičnoj primeni, izuzev u mernim laboratorijama, slika 7.22, gde se koriste pri merenju pojedinih karakteristika zvučnika.



Slika 7.22 – Standardizovana ploča za merenje karakteristika zvučnika sa nesimetričnim mestom za ugradnju mernog uzorka

7.9 Zvučnički sistemi sa zatvorenom kutijom

Zvučnički sistem sa zatvorenom kutijom, slika 7.23, najprostiji je od svih sistema sa direktnim zračenjem (ne računajući zvučnički sistem sa pločom koji nema praktični značaj). Sastoji se iz potpuno zatvorene kutije na čijoj je jednoj strani montiran zvučnik.



Slika 7.23 - Zvučnički sistem sa zatvorenom kutijom: 1) zvučnik, 2) kutija

Sa naglim razvojem „hi-fi“ reprodukcije zvuka počinje i masovnija primena zvučničkih sistema sa zatvorenom kutijom relativno malih dimenzija i zvučnikom velike elastičnosti vešanja membrane. U literaturi se ovakvi sistemi nazivaju kompresioni sistemi sa zatvorenom kutijom. Rezonansu sistema određuje elastičnost vazduha u kutiji (koja je mnogo manja od elastičnosti vešanja zvučnika) i masa kretnog sistema zvučnika.

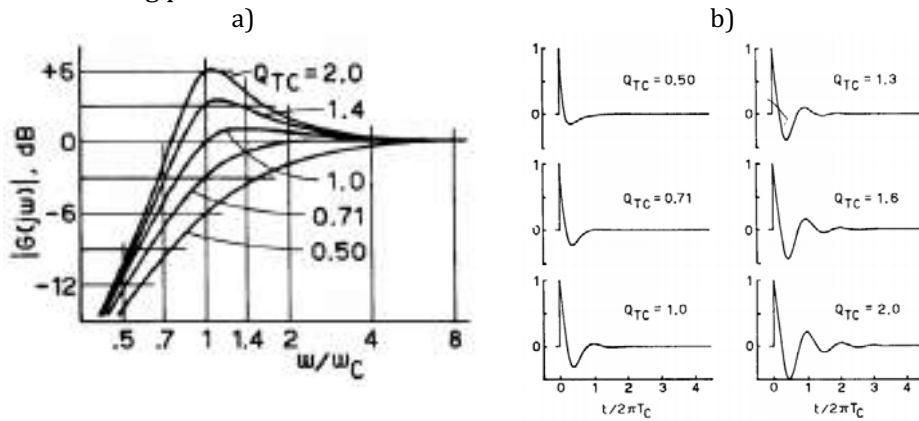
Frekvencijska karakteristika zvučničkog sistema ekvivalentna je prenosnoj funkciji filtra propusnika visokih frekvencija drugog reda (nagib 12 dB/oct), i njen oblik zavisi od vrednosti parametra Q_{tc} , slika 7.24a, koji predstavlja ukupni Q faktor zvučničkog sistema sa zatvorenom kutijom na

frekvenciji njegove rezonanse f_c . Ova dva parametra definisani su izrazima [6]:

$$Q_{tc} \approx \sqrt{\alpha + 1} \cdot Q_{ts}, \quad (7.23)$$

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{at}m_{as}}} = \sqrt{\alpha + 1} f_s. \quad (7.24)$$

Kada je $Q_{tc} = 0,5$ imamo kritično prigušen zvučnički sistem. Za $Q_{tc} = 0,707$ amplitudska karakteristika je maksimalno ravna, zovemo je Batervortova kriva i označavamo sa B2. Amplitudske karakteristike za $Q_{tc} > 0,707$ odgovaraju Čebiševljevoj aproksimaciji i označavaju se sa C2. Kako se vidi sa slike 7.24b, impulsni odziv se brzo smiruje za slučajeve kada je $Q_{tc} \leq 0,707$, dok za veće vrednosti parametra Q_{tc} „zvoni“ i to više što je vrednost ovog parametra veća.

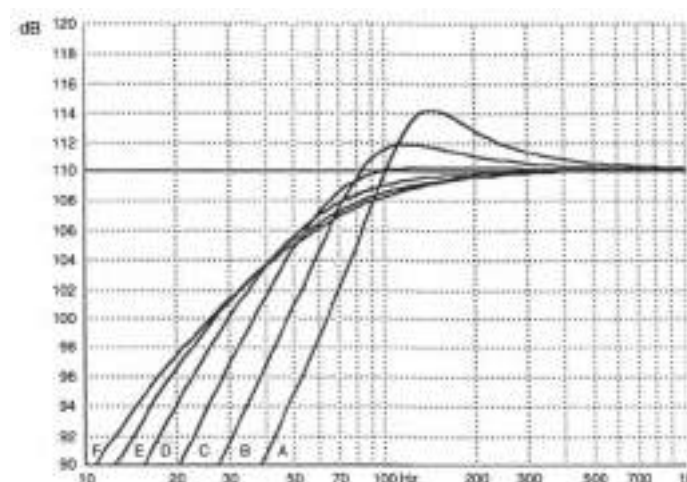


Slika 7.24 - Karakteristike zvučničkog sistema sa zatvorenom kutijom:
a) amplitudska karakteristika, b) odziv na impulsnu pobudu [6]

Proračun zvučničkog sistema sa zatvorenom kutijom relativno je prost. Uz poznate parametre zvučnika (f_s , V_{as} , Q_{ts}) potrebno je odabrati željeni oblik frekvencijske karakteristike (slika 7.24a), što se svodi na izbor vrednosti parametra Q_{tc} . Nakon toga, iz izraza (7.15), (7.18) i (7.23) se dobija potrebna zapremina kutije:

$$V_b = \frac{V_{as}}{\gamma \cdot \left[\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} - 1 \right]}. \quad (7.25)$$

Na slici 7.25 su prikazane amplitudske karakteristike zvučničkog sistema sa zatvorenom kutijom, u funkciji *frekvencije* za različite zapremine kutije za zvučnik čija je frekvencija rezonanse $f_s = 20$ Hz [43]. Kako se može videti, frekvencija f_3 ovde ne opada monotono sa padom Q_{tc} već dostiže minimalnu vrednost, pa ponovo raste.



Slika 7.25 – Amplitudne karakteristike zvučnog sistema sa zatvorenom kutijom kada se isti zvučnik ugradi u kutije različite zapremine (zapremina kutije raste idući od krive A do krive F)[43].

Iz ovog porasta f_3 moglo bi se pogrešno zaključiti da veća kutija ima lošiju reprodukciju niskih frekvencija nego manja. Međutim, ako se posmatra donja granična frekvencija f_a za neko drugo slabljenje, recimo -10dB, onda se jasno vidi da su kod veće kutije jače izražene niske frekvencije. Drugim rečima, čini se da bi za poređenje sistema sa zatvorenom kutijom više odgovarala donja granična frekvencija f_{10} nego f_3 . Ovo pokazuje da su niske frekvencije jače izražene kod sistema sa manjim Q_{tc} iako slabljenje amplitudske karakteristike počinje na višim frekvencijama.

7.10 Zvučnički sistemi sa bas-refleks kutijom



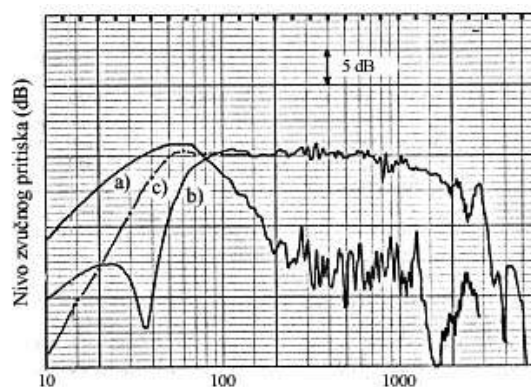
Slika 7.26 - Zvučnički sistem sa bas-refleks kutijom:

- 1) zvučnik,
- 2) bas refleks kanal,
- 3) kutija.

Zvučnički sistem sa bas-refleks kutijom je karakterističan po tome, što je kod njega primenjen princip Helmholtzovog rezonatora za poboljšanje zračenja na niskim frekvencijama. Na kutiji, pored ugrađenog zvučnika,

postoji slobodan otvor ili kanal, slika 7.26, u kojem se vazduh pomera napred-nazad zavisno od varijacije pritiska u kutiji. Ovo kretanje vazduha u otvoru doprinosi povećanju akustičkog protoka sistema na niskim frekvencijama, a time i povećanju njegove akustičke snage.

Naime, vazduh u otvoru deluje kao akustička induktivnost koja na određenoj frekvenciji stupa u rezonansu sa akustičkom kapacitivnošću kutije. U okolini frekvencije rezonance zračenje zvučnog sistema je veoma pojačano. U praksi se područje ove rezonanse postavlja na niskim frekvencijama, tako da se proširuje korisni frekvencijski opseg zvučnog sistema.



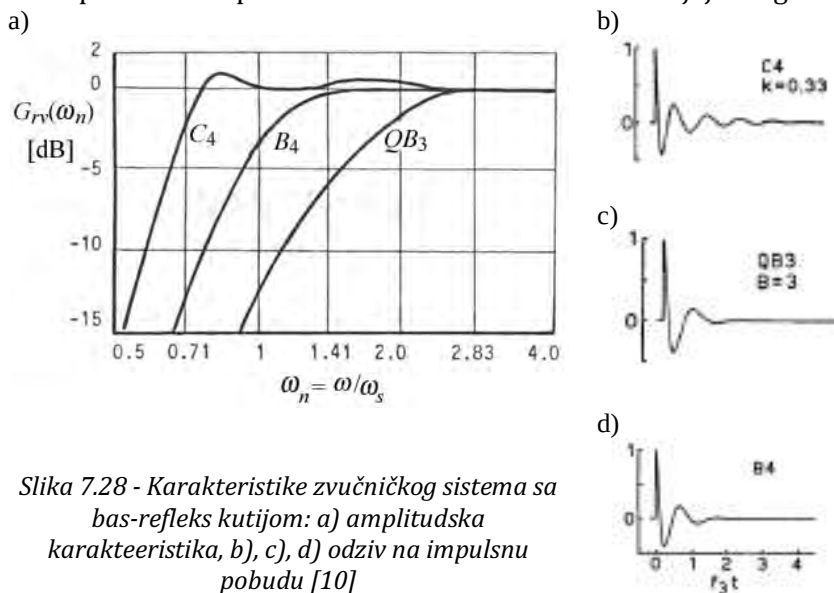
Slika 7.27 –
Frekvencijske
karakteristike zračenih
elemenata tipičnog bas
refleks zvučnog
sistema a) bas-refleks
kanala, b) membranae,
i c) kompletnog sistema

U okolini frekvencije rezonanse kutije (izraženi minimum na krivoj b na slici 7.27) ukupno zračenje uglavnom potiče od bas-refleks kanala (kriva a na slici 7.27) dok je, idući prema višim frekvencijama, njegov uticaj sve slabiji. Ispod frekvencije rezonanse zračenja membrane i bas-refleks kanala su u protivfazi i međusobno se oduzimaju zbog čega ukupna amplitudska karakteristika sistema (kriva c na slici 7.27) u ovom opsegu brzo opada sa smanjivanjem frekvencije.

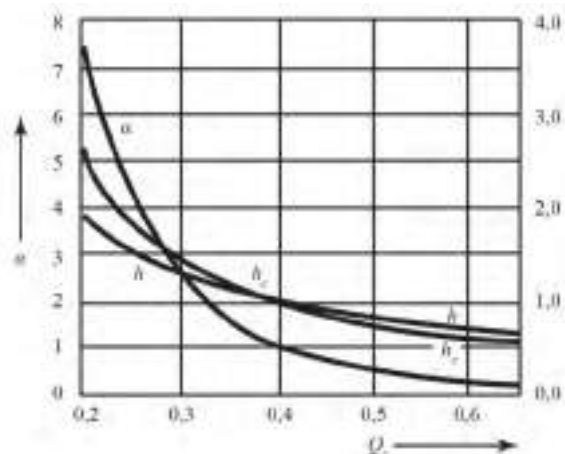
Prenosna funkcija bas-refleks sistema odgovara prenosnoj funkciji filtra propusnika visokih frekvencija četvrtog reda. U praktičnoj primeni ima smisla govoriti samo o onim oblicima prenosne funkcije koji imaju ravnu ili približno ravnu amplitudsku karakteristiku. To su: Batervortova funkcija četvrtog reda (B_4), Čebiševljeva funkcija četvrtog reda (C_4) sa ograničenim premašajem i Batervortova funkcija „kvazi-trećeg reda“ (QB_3) [10].

Na slici 7.28a prikazana su ova tri karakteristična oblika amplitude prenosne funkcije bas-refleks sistema (tj. njegove frekvencijske karakteristike) za $Q_t = 0,2$ (C_4); $0,4$ (B_4) i $0,65$ (QB_3). Za sve ostale vrednosti parametra Q_t ($0,2 < Q_t < 0,65$) amplitudske karakteristike se nalaze između dva granična slučaja predstavljena krivama C_4 i QB_3 . Sve amplitudske karakteristike iz ovog opsega su ravne, ili približno ravne, i pogodne za praktičnu primenu. Koja će biti odabrana, zavisi od karakteristika zvučnika

koji imamo na raspolaganju, jer vrednost njegovog parametra Q_{ts} diktira oblik optimalne amplitudske karakteristike sistema koji je moguće dobiti.



Na slici 7.28b, 7.28c i 7.28d su prikazani odzivi na impulsnu pobudu zvučnog sistema sa bas refleks kutijom, odakle se može zaključiti da se izlaz sistema brže smiruje (tačnija reprodukcija brzih signala) što je njegova frekvencijska karakteristika manjeg nagiba u okolini donje granične frekvencije. Dakle, redosled sistema prema tačnosti reprodukcije brzih signala je sledeći: QB3, B4 i na kraju C4.



Slika 7.29 – Parametri bas-refleks zvučnog sistema, α , h , i h_c u funkciji Q_t ($Q_t \approx Q_{ts}$) [10]

Ovde je važno istaći da svakoj vrednosti parametra $Q_t \approx Q_{ts}$ odgovara po jedna vrednost parametara sistema α , h i h_c , koje se obično daju u obliku tabela, grafika (slika 7.29) ili sledećih približnih izraza [16]:

$$\alpha = \frac{V_{as}}{V_{ab}} = 0,07 Q_t^{-3} \quad (7.26)$$

$$h = \frac{f_b}{f_s} = 0,445 Q_t^{-0,934}, \quad (7.27)$$

$$h_c = \frac{f_3}{f_s} = 0,33 Q_t^{-1,28}, \quad (7.28)$$

gde je f_3 donja granična frekvencija (-3 dB) zvučnog sistema dok su ostale veličine definisane u odeljku 7.4.5.

Takođe se za maksimalno odstupanje R_H frekvencijske karakteristike, u dB, od srednje vrednosti u propusnom opsegu, može pisati:

$$R_H \approx 20 \log(2,6 Q_t \alpha^{0,35}). \quad (7.29)$$

Malim vrednostima parametra Q_t ($0,2 < Q_t < 0,4$) odgovaraju Batervortove funkcije kvazi trećeg reda (QB_3) sa ravnom amplitudskom karakteristikom, nešto blažim nagibom (oko 18 dB/okt.) ispod donje granične frekvencije i visokom donjom graničnom frekvencijom f_3 u odnosu na f_s . Većim vrednostima Q_t predstavljene su Čebiševljeve funkcije (C_4) sa jednakim odstupanjima R_H amplitudske karakteristike ispod i iznad srednje vrednosti, oštrim nagibom (24 dB/okt.) već u okolini donje granične frekvencije i niskom donjom graničnom frekvencijom u odnosu na f_s . Batervortovoj funkciji (B_4), koja ima najravniju amplitudsku karakteristiku, odgovara $Q_t \approx 0,4$. Inače, sve navedene amplitudske karakteristike na niskim frekvencijama dovoljno udaljenim od f_3 imaju nagib od 24 dB/oktavi.

Za vrednosti Q_t manje od 0,2 donja granična frekvencija sistema postaje suviše visoka ($h_c > 2,53$), dok je za $Q_t > 0,65$ talasanje amplitudske karakteristike sistema veliko, pa nisu od posebnog praktičnog interesa.

Pre nego se počne proračun zvučnih sistema sa bas-regleks kanalom potrebno je odabrati zvučnik čiji Q faktor približno odgovara željenom obliku amplitudske i tranzijentne karakteristike sa slike 7.28. Pri tome treba uzeti u obzir i činjenicu da je za veće vrednosti parametra Q_t donja granična frekvencija sistema niža (širi radni opseg prema niskim frekvencijama) ali i potrebna zapremina kutije veća (h i h_c opadaju sa porastom Q_t). Za dati zvučnik, iz izraza 7.26 do 7.29 možemo izračunati:

- zapreminu kutije: $V_b = \frac{V_{as}}{0,07 Q_t^{-3}},$
- frekvenciju rezonanse kutije: $f_b = 0,045 \cdot f_s \cdot Q_t^{-0,934},$
- donju graničnu frekvenciju (-3 dB) sistema:
 $f_3 = 0,033 \cdot f_s \cdot Q_t^{-1,28}$ i

- maksimalno odstupanje amplitudske karakteristike sistema od srenje vrednosti u propusnom opsegu: $R_H \approx 20 \log(2,6 Q_t \alpha^{0,35})$.

Na kraju, iz poznate vrednosti frekvencije rezonanse kutije f_b , i njene veze sa akustičkom kapacitivnošću kutije C_{ab} i akustičkom induktivnošću bas-refleks kanala m_{ap} , jednačina 7.17, možemo izračunati potrebne dimenzije bas-refleks kanala. Tako za dužinu bas – refleks kanala dobijamo [16]:

$$l_v = \frac{c^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{f_b^2 V_b} r^2 - Cr. \quad (7.30)$$

gde je r pluprečnik njegovog poprečnog preseka, a C konstanta ($C = 1,463$ za kanal ugrađen ravno sa zidom kutije, $C = 1,7$ za bas-refleks otvor).

Pre nego što izračunamo dužinu kanala prema prethodnom izrazu potrebno je odabrati veličinu njegovog poprečnog preseka S_v vodeći računa da ne bude suviše mala, kada u kanalu usled pojačanog strujanja vazduha može doći do velikih gubitaka akustičke energije, čujnih šumova i izobličenja reprodukovanog signala.

Granični uslov za veličinu poprečnog preseka kanala dat je relacijom [16]:

$$S_v \geq \frac{3,23 V_d}{\sqrt{f_b}}. \quad (7.31)$$

gde je S_v u cm^2 , a V_d u cm^3 .

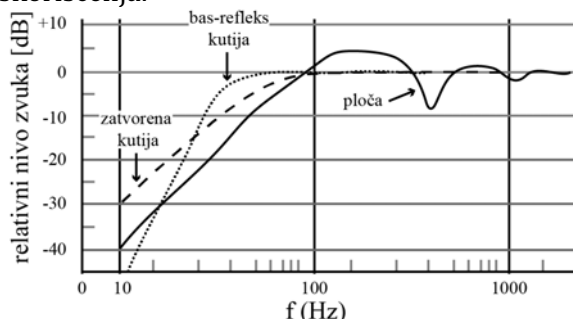
7.10.1 Poređenje sistema sa zvučnikom u ploči, zatvorenoj i bas-refleks kutiji

Očigledno je da je sistem sa zvučnikom u ploči najjednostavniji, a zatim po složenosti konstrukcije slede zvučnik u zatvorenoj kutiji i na kraju zvučnik u bas-refleks kutiji.

Prenosne funkcije sistema sa bas-refleks kutijom su četvrtog reda, a sistema sa zatvorenom kutijom drugog reda, što znači da je nagib njihovih krivih frekvencijskog odziva 24 dB/oktavi i 12 dB/oktavi, respektivno, slika 7.30. Sa iste slike se vidi da frekvencijska karakteristika zvučnika u ploči, na niskim frekvencijama, ima nagib negde između dve prethodno navedene vrednosti, tj. približno 18 dB/oktavi. To dalje znači da sistemi sa zatvorenom kutijom imaju najbolju tranzijentnu karakteristiku, jer je poznato da sistemi sa prenosnim funkcijama nižeg reda imaju slabije izraženo „zvonjenje“ pri odzivu na impulsnu pobudu.

Detaljnija analiza ovih sistema pokazuje da su za datu zapreminu kutije i donju graničnu frekvenciju za bas-refleks sistem i sistem sa zatvorenom kutijom potrebna dva sasvim različita zvučnika. Uz iste ostale parametre zvučnik za bas-refleks sistem treba da ima veću membranu i jaču elektromagnetnu spregu, nego zvučnik za sistem sa zatvorenom kutijom.

Zbog ove razlike sistemi sa bas-refleks kutijom imaju veći koeficijent iskorišćenja.



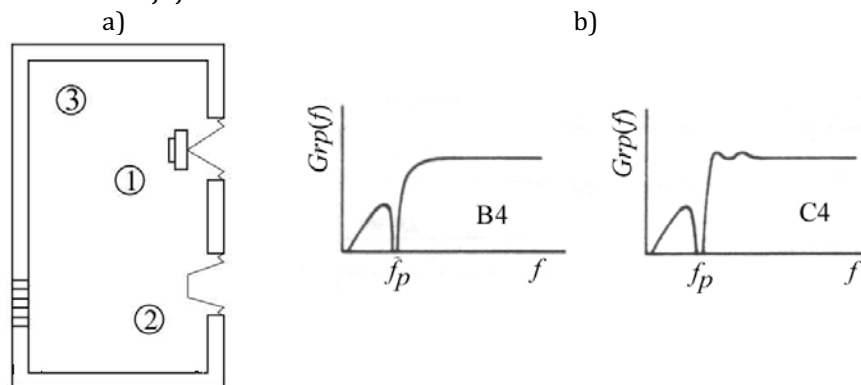
Slika 7.30 - Frekvencijske karakteristike zvučnih sistema sa pločom, zavorenom i bas refleks kutijom za isti zvučnik [43]

Zvučnici u sistemima sa zatvorenom kutijom treba da imaju veliku elastičnost u odnosu na elastičnost vazduha u kutiji. Obratno, kod sistema sa bas-refleks kutijom maksimalni stepen iskorišćenja se postiže sa relativno malom vrednošću odnosa elastičnosti zvučnika i elastičnosti vazduha u kutiji.

7.11 Zvučnički sistemi sa pasivnim radijatorom

Zvučnički sistem sa pasivnim radijatorom ima dva zračeća elementa: zvučnik i membranu bez magneta i kalema, slika 7.31. Ova membrana koja se ne pobuđuje električnim signalom naziva se u literaturi pasivni radijator ili pomoćni radijator za niske frekvencije.

Način rada zvučničkog sistema sa pasivnim radijatorom veoma je sličan načinu rada bas-refleks zvučničkog sistema. Pasivni radijator praktično zamenjuje bas-refleks kanal.



Slika 7.31 – Zvučnički sistem sa pasivnim radijatorom: a) elementi sistema: 1) zvučnik, 2) pasivni radijator, 3) kutija, b) amplitudska karakteristika [11]

Amplitudska karakteristika zvučničkog sistema sa pasivnim radijatorom ima usek (jako izražen minimum) na frekvenciji f_p , (frekvencija rezonanse pasivnog radijatora), slika 7.31 [11]. Izborom parametara

sistema ova frekvencija se može podesiti dovoljno nisko. Iznad frekvencije f_p , amplitudska karakteristika ima oblik filtra propusnika visokih frekvencija četvrtog reda. Deo amplitudske karakteristike ispod f_p nije interesantan jer se nalazi u nepropusnom opsegu sistema.

7.11.1 Poređenje bas-refleks sistema i sistema sa pasivnim radijatorom

Prethodno iznete činjenice jasno govore da su bas-refleks sistemi i sistemi sa pasivnim radijatorom veoma slični. Osnovna razlika među njima je što sistem sa pasivnim radijatorom ima usek - nulu u nepropusnom delu frekvencijske karakteristike. Ukoliko nije dovoljno nisko ova nula može degradirati karakteristike sistema sa pasivnim radijatorom. Ove pojave se mogu izbeći ako se primeni pasivni radijator sa velikom elastičnošću vešanja membrane.

Značajna prednost sistema sa pasivnim radijatorom je ta što se oni mogu fizički realizovati u mnogim slučajevima kada bas-refleks sistemi ne mogu. To se posebno odnosi na sisteme male zapremine kutije i niske donje granične frekvencije, koji treba da obezbede relativno veliku akustičku snagu. Bas-refleks kanal, pravilno projektovan, kod ovakvih sistema ima takve dimenzije da ga je nemoguće smestiti u kutiju, pa je jedino rešenje njegova zamena pasivnim radijatorom. Zato se, sa pravom, sistemi sa pasivnim radijatorom smatraju sasvim prirodnim i logičnim proširenjem bas-refleks sistema. U svim slučajevima gde se u kutiju može ugraditi bas-refleks kanal odgovarajućih dimenzija, pasivni radijator je neekonomično rešenje.

Praktično isti zvučnici koji su pogodni za ugradnju u bas-refleks sisteme, mogu se koristiti i u sistemima sa pasivnim radijatorom.

Sistemi sa pasivnim radijatorom ne proizvode šumove i izobličenja koja mogu nastati kod bas-refleks sistema usled rezonansi ili velike brzine čestica, u nepravilno dimenzionisanom bas-refleks kanalu. Takođe, pasivni radijator sprečava prolazak zvuka, na niskim frekvencijama, iz kutije u prostoriju, što kod bas-refleks sistema može biti uzrok određenih izobličenja. I na kraju, sistemi sa pasivnim radijatorom su manje osetljivi na signale subsoničnih frekvencija nego što su to bas-refleks sistemi.

7.12 Zvučnički sistem sa spregnutim komorama

Ako se zvučnički sistem sa bas-refleks kanalom ili sa pasivnim radijatorom modifikuje tako da u okolni prostor zrači samo kanal ili otvor, odnosno pasivni radijator, dobija se zvučnički sistem čija amplitudska karakteristika odgovara karakteristici filtra propusnika opsega frekvencija.

Ovakav sistem, prikazan je šematski na slici 7.32. Zvučnik je montiran u kutiji, tako da se iza njega nalazi zatvorena komora zapremine V_{b1} , a ispred njega komora zapremine V_{b2} sa bas-refleks kanalom. Akustička energija zrači se u okolni prostor kroz ovaj kanal. Kao što se vidi, ovde zvučnik ne zrači direktno u okolni prostor već služi kao akustička sprega između komora V_{b1} i V_{b2} , pa se zato ovakvi sistemi nazivaju sistemi sa spregnutim komorama.

Oblik amplitudske karakteristike zvučničkog sistema sa spregnutim komorama prikazan je na slici 7.33 [19]. Kao što se vidi maksimalni nivo zvuka i propusni opseg sistema zavise od parametra α_t koji, za maksimalno ravan oblik krive, mora imati vrednost [19]:

$$\alpha_t = \frac{1}{2Q_{tc}^2}. \quad (7.32)$$

Granične frekvencije (-3 dB) frekvencijske karaktersitke $|\underline{G}_{bp}(j f_n)|$ sa slike 7.33 date su relacijama:

$$f_h = f_0 \frac{\sqrt{\alpha_t} + \sqrt{\alpha_t + 4}}{2}, \quad (7.33)$$

$$f_l = \frac{f_0^2}{f_h}. \quad (7.34)$$

gde je $f_n = f/f_0$, normalizovana frekvencija a $f_0 = \sqrt{f_h \cdot f_l}$ centralna frekvencija propusnog opsega ovog sistema.

Prilikom projektovanja zvučničkog sistema sa spregnutim komorama, polazi se ili od potrebnog propusnog opsega definisanog graničnim frekvencijama f_l i f_h , ili od potrebne "efikasnosti" odnosno vrednosti funkcije $|\underline{G}_{bp}(j f_n)|$ na centralnoj frekvenciji f_0 , koja izražena u dB iznosi:

$$\Delta L = 20 \log |\underline{G}_{bp}(j f_0)| = -20 \log(\alpha_t). \quad (7.35)$$

Vrednost izraza (7.35) predstavlja razliku između maksimalnog nivoa koji stvara sistem sa spregnutim komorama i nivoa koji bi stvarao sam zvučnik pri zračenju u polovinu prostora [19].

Zapremine jedne i druge komore se nealaze iz izraza [19]:

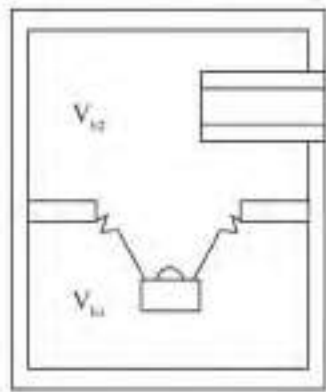
$$V_{b1} = \frac{V_{as}}{\left[\left(\frac{f_c}{f_s} \right) - 1 \right]}, \quad (3.36)$$

$$V_{b2} = \frac{V_{as}}{\alpha_t \cdot \left(\frac{f_c}{f_s}\right)^2}, \quad (3.36)$$

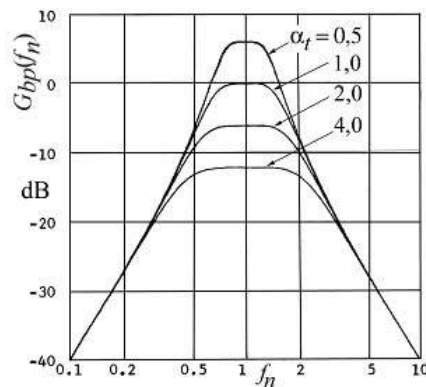
gde je $f_c = f_0$.

Dimenzije bas refleks kanala je moguće izračunati na isti način kao kod bas-refleks sistema, jednačine (7.30) i (7.31), uzimajući da je $V_b = V_{b2}$ i $f_b = f_0$.

Ako obe komore V_{b1} i V_{b2} zvučničkog sistema sa slike 7.32 izvedemo sa bas-refleks kanalima, dobićemo sistem sa prenosnom funkcijom istog oblika ali većeg nagiba (funkcija šestog reda) u nepropusnom opsegu [19]. Zanimljivo je da ovaj sistem ima za oko 6 dB veći maksimalni nivo pritiska, uz iste ili manje pomeraje membrane nego što bi se dobilo za isti zvučnik u sistemu sa jednim bas-refleks kanalom. Međutim, podešavanje sistema sa dva bas-refleks kanala je dosta komplikovano i uglavnom se izvodi eksperimentalno - metodom "probe i greške".



Slika 7.32 – Šematski izgled zvučničkog sistema sa spregnutim komorama



Slika 7.33 – Amplitudska karakteristika zvučničkog sistema sa spregnutim komorama [19]

7.13 Karakteristike usmerenosti zvučnih sistema sa direktnim zračenjem

Kod višepojasnih zvučnih sistema potrebno je znati karakteristike usmerenosti svake komponente. Za srednjetonke i visokotonske levkove ovi podaci se obično daju u pratećim prospektima. Međutim, za niskotonske zvučnike to nije slučaj. Kod njih je situacija komplikovanija jer se radi o zvučnom izvoru ugrađenom u aksutički zastor (kutiju) konačnih dimenzija. Svi pojedinačni zvučnici ugrađeni u kutije ponašaju se identično što se tiče

usmerenosti. Njihova usmerenost ne zavisi ni od oblika membrane (kalotna, konusna, ravna itd.).

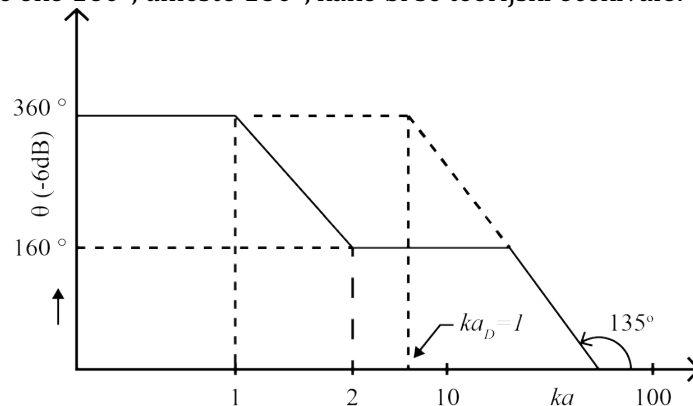
Na najnižim frekvencijama zvučnik zajedno sa kutijom se ponaša kao tačkasti izvor i zrači neusmereno sve do frekvencije na kojoj je obim prednje ploče kutije jednak talasnoj dužini zvuka. Ako sa a označimo efektivni poluprečnik prednje ploče zvučničke kutije čija je površina S ($a = \sqrt{S/\pi}$), onda je granica neusmerenog zračenja definisana jednakošću:

$$ka \approx 1 \quad (7.32)$$

gde je $k = 2\pi/\lambda$ talasni broj, a λ talasna dužina zvuka. Iznad ove frekvencije ugao zračenja zvučnog sistema θ (-6) opadne na polovinu pri svakom udvajanju frekvencije, slika 7.34. Smanjivanje ugla zračenja se nastavlja sve dok se ne dostigne frekvencija na kojoj je

$$ka \approx 2. \quad (7.33)$$

Iznad ove frekvencija prednja ploča zvučničke kutije predstavlja za membranu zvučnika u akustičnom smislu beskonačnu ravan i zvučnik zrači u polovinu prostora. Ugao zračenja zvučnika u ovom frekvenzijskom opsegu u praksi je oko 160° , umesto 180° , kako bi se teorijski očekivalo.



Slika 7.34 – Ugao zračenja zvučnog sistema sa direktnim zračenjem sa jednim zvučnikom

Ugao zračenja od 160° se zadržava sve do frekvencija na kojima ugao zračenja same membrane poluprečnika a_d spadne na vrednost od 160° . Idući prema višim frekvencijama prednja ploča zvučnog sistema više ne utiče na karakteristiku zračenja i zvučnik zrači kao u otvorenom prostoru. Dalje prema višim frekvencijama ugao zračenja pada na polovinu svoje prethodne vrednosti svaki put kada se udvoji frekvencija.

Tačka u kojoj ugao zračenja počinje opadati ispod 160° dobija se u preseku prave $\theta = 160^\circ$ i prave povučene kroz tačku $(ka_d, 360^\circ)$ pod uglom od 135° u odnosu na pozitivan smer ka ose.

Kada se radi o višepojasnom zvučničkom sistemu u kojem su svi zvučnici sa direktnim zračenjem, treba primeniti princip sa slike 7.34 na sve pojedinačne zvučnike u pripadajućim frekvencijskim područjima i sve prikazati na jednom dijagramu. Na presečnim frekvencijama skretnice trebalo bi da zvučnici za niži i viši frekvencijski opseg imaju približno isti ugao zračenja.

7.14 Zvučnički sistemi sa levkom

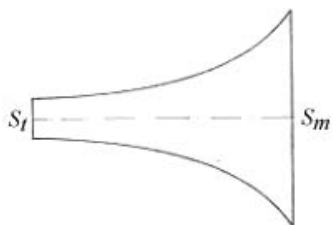
7.14.1 Akustički levak

Akustički levak predstavlja zvukovod čija se površina poprečnog preseka, idući duž njegove ose, menja na unapred dati način, slika 7.35. Brzina promene površine definisana je konstantom širenja m , koja predstavlja važan parametar levka.

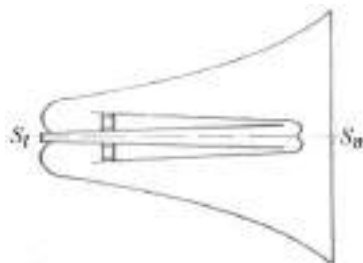
Početni, najuži deo levka nazivamo grlom i njegovu površinu označavamo sa S_l . Krajnji najširi deo levka naziva se otvor (ili usta) i njegova površina je S_m . Rastojanje od grla do otvora levka, duž njegove ose, predstavlja dužinu levka.

Osa savijenog levka, slika 7.36, je izlomljena linija, čija ukupna dužina od grla do otvora predstavlja dužinu levka.

Oblik površine poprečnog preseka levka nema posebnog značaja. Takođe promene oblika poprečnog preseka levka duž njegove ose nemaju uticaja na karakteristike ukoliko su postupene i ako se održava zakon širenja u prelaznoj oblasti.



Slika 7.35 – Presek akustičkog levka



Slika 7.36 – Savijeni levak

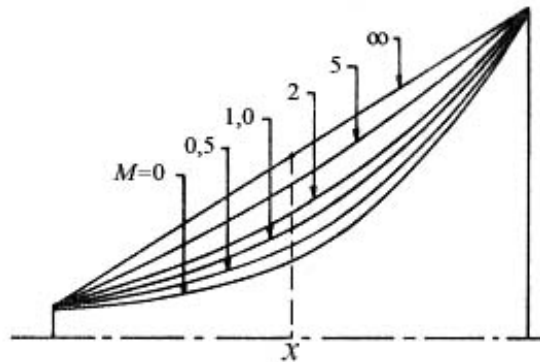
7.14.2 Prekidna frekvencija levka

Brzina promene površine levka sa povećanjem rastojanja od grla određena je konstantom širenja levka m . Ova konstanta, s druge strane, određuje prekidnu frekvenciju levka f_0 na sledeći način [9]:

$$f_0 = \frac{mc}{4\pi} \quad (7.34)$$

Ispod frekvencije f_0 nema prostiranja zvučnih talasa duž ose levka. Iz izraza (7.34) se jasno vidi da, što je širenje levka postepenije (m manje) prekidna frekvencija f_0 je niža.

7.14.3 Tipovi levkova



Slika 7.37 – Širenje površine različitih tipova levkova[9]

Prema zakonu po kojem se menja površina poprečnog preseka levka razlikujemo konusne, eksponencijalne, hiperbolične, parabolične itd. levkove. Zakon širenja za familiju hiperbolično-eksponencijalnih levkova može se u opštem slučaju izraziti sa [9]:

$$S(x) = S_t \left(\cosh \frac{mx}{2} + M \sinh \frac{mx}{2} \right)^2 \quad (7.35)$$

gde je:

x - rastojanje od grla levka,

$m = \frac{4\pi}{f_0 c}$ - konstanta širenja levka,

c - brzina zvuka u vazduhu,

f_0 - prekidna frekvencija levka,

S_t - površina grla levka,

$S(x)$ - površina poprečnog preseka levka na rastojanju x od grla levka.

M je parametar koji definiše klasu kojoj levak pripada. Tako za $M = 0$ imamo hiperbolični levak kod kojeg je:

$$S(x) = S_t \cosh^2 \left(\frac{mx}{2} \right) \quad (7.36)$$

Kada je $M=1$ dobijamo eksponencijalni levak, čija površina poprečnog preseka se menja po zakonu:

$$S(x) = S_t e^{m \cdot x} \quad (7.37)$$

Ako $M \rightarrow \infty$ dolazimo do konusnog levka za koji je:

$$S(x) = S_t \left(1 + \frac{mx}{2}\right)^2 \quad (7.38)$$

Na slici 7.37 prikazani su zakoni širenja površine poprečnog preseka levkova za različite vrednosti parametra M , i za iste dimenzije grla i otvora. Vidi se da levkovi sa manjim vrednostima parametra M imaju manji nagib u blizini grla.

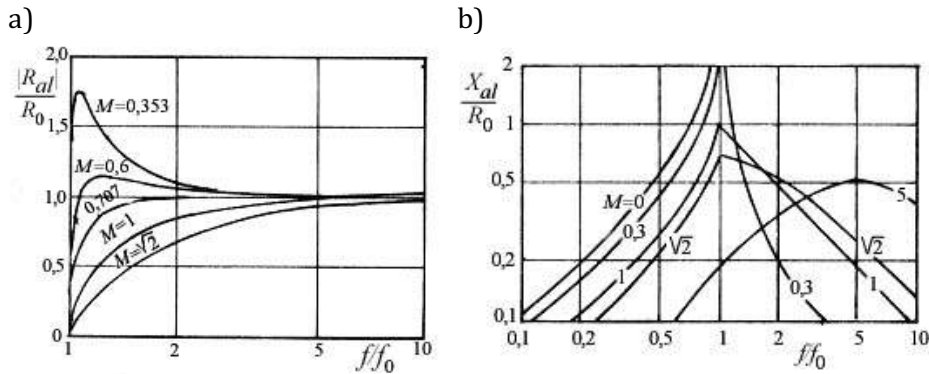
7.14.4 Akustička impedansa levka

Akustička impedansa na grlu beskonačnog levka je [9]:

$$Z_{al} = R_0 \frac{\sqrt{1 - (f_0/f)^2} + jM(jf_0/f)}{1 - (1 - M^2)(f_0/f)^2}, \quad (7.39)$$

gde je: $R_0 = \frac{\rho_0 c}{S_t}$.

Normalizovane vrednosti otpornosti i reaktanse levka prikazane su na slikama 7.38 i 7.39, respektivno.



Slika 7.38 - Normalizovane vrednosti akustičke otpornosti (a), i akustičke reaktanse (b), beskonačno dugačkog levka [9]

Za frekvencije veće od prekidne frekvencije f_0 akustička otpornost R_{al} i induktivnost m_{al} levka su:

$$R_{al} = \frac{\rho_0 c}{S_t} \quad (7.40)$$

$$m_{al} = \frac{\rho_0 c}{\omega_0 S_t} = \frac{\rho_0 c}{2\pi f_0 S_t} \quad (7.41)$$

Slike 7.38a i 7.38b pokazuju da su levkovi sa parametrom $M \approx 0,6$ najbolje rešenje sa stanovišta frekvencijske karakteristike na niskim frekvencijama. Međutim, ne treba zaboraviti da su izobličenja reprodukovano zvučnog signala veća što je širenje levka sporije. Iz tog razloga u praksi su do sada ipak najrasprostranjeniji eksponencijalni levkovi

($M=1$) kao kompromis između zahteva za niskim izobličenjima i što širim frekvencijskim opsegom na niskim frekvencijama.

Danas se takođe sreću levkovi nastali kombinacijom prethodno opisanih tipova, kao i levkovi sa sasvim drugačijim zakonom širenja i drugačijom konstrukcijom, kod kojih su optimizirani ili frekvencijska karakteristika ili karakteristika usmerenosti.

7.14.5 Veličina otvora levka

Iako je prekidna frekvencija određena konstantom širenja, linearnost akustičke otpornosti u funkciji frekvencije određena je prečnikom otvora, koji za datu površinu grla i konstantu širenja određuje ukupnu dužinu levka.

Kada je obim otvora levka $C > \lambda_0$ nema značajne razlike u otpornosti zračenja u odnosu na slučaj beskonačnog levka. Ovaj uslov može se izraziti relacijom:

$$C = 2\pi a_m \geq \lambda_0 \quad (7.42)$$

odakle za površinu otvora levka dobijamo:

$$S_{m(4\pi)} \geq \frac{\lambda_0^2}{4\pi} \quad (7.43)$$

λ_0 je talasna dužina zvuka na prekidnoj frekvenciji f_0 , a a_m je efektivni poluprečnik levka ($a_m = \sqrt{S_m/\pi}$).

Sa svakim smanjenjem ugla zračenja levka, za isti relativni iznos smanjuje se i potrebna površina otvora levka S_m . Dakle, možemo pisati da je:

$$S_m \geq \left(\frac{\lambda_0}{4\pi}\right)^2 \cdot \Omega, \quad (7.44)$$

gde je Ω prostorni ugao u koji levak zrači.

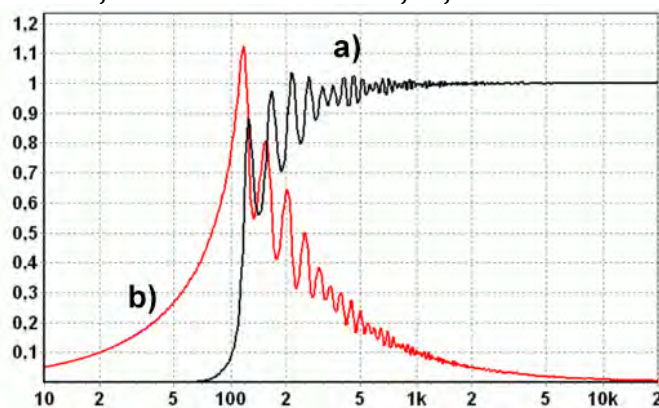
Većina niskotonskih levkova koji se danas koriste ima površinu otvora koja odgovara zračenju u prostorni ugao između π i 2π steradijana. Ovo je i logično pošto su uobičajeni uslovi korišćenja levkova mnogo bliži tome nego zračenju u otvorenom prostoru (prostorni ugao od 4π steradijana).

7.14.6 Dužina levka

Prethodno iznete teorijske osnove i karakteristike levkova dobijene na osnovu njih polazile su od pretpostavke da su levkovi neograničene dužine. Međutim, u praksi to nije slučaj, levkovi imaju konačnu dužinu i njihove karakteristike odstupaju od onih dobijenih za idealne levkove beskonačne dužine. Na ustima levkova zbog nagle promene uslova prostiranja zvučnih talasa dolazi do refleksija koje zajedno sa zvučnim

talasima koji stižu direktno od membrane zvučnika u unutrašnjosti levka formiraju stojeće talase.

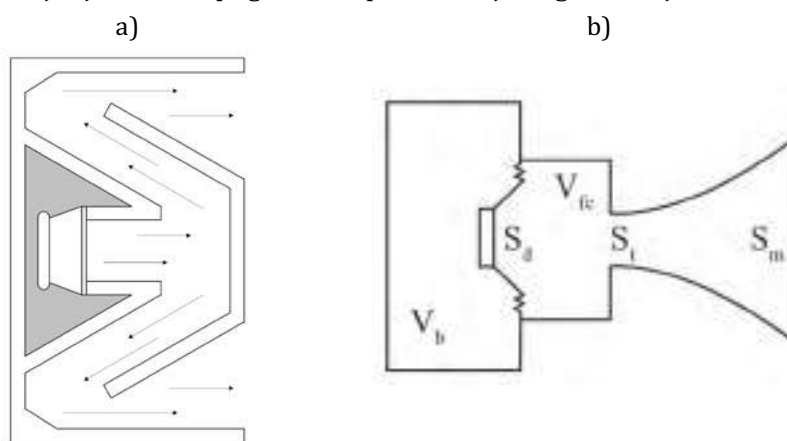
Na niskim frekvencijama levkovi konačne dužine se ponašaju slično kao otvorena cev. Krive akustičke otpornosti i induktivnosti imaju niz rezonantnih pikova, čija vrednost se smanjuje sa povećanjem frekvencije, slika 7.39 [44]. Iz tog razloga i frekvencijska karakteristika levka na niskim frekvencijama će imati slične varijacije.



Slika 7.39 - Normalizovane vrednosti akustičke otpornosti (a), i akustičke reaktanse (b), levka ograničene dužine [44].

7.14.7 Zvučnički sistemi sa levkom za niske frekvencije

Većina niskotonskih levkova je pravougaonog poprečnog preseka, slika 7.40a, jer je to oblik pogodan za proizvodnju i ugrađivanje.



Slika 7.40 - Niskotonski zvučnički sistem sa levkom:
a) presek, b) šematski prikaz

Šematski izgled zvučničkog sistema sa levkom za niske frekvencije prikazan je na slici 7.40b. Membrana elektrodinamičkog zvučnika je sa prednje strane, preko pretkomore zapremine V_f , spregnuta sa levkom. Sa

zadnje strane membrane nalazi se kutija (zatvorena) zapremine V_b . Efektivna površina membrane je S_d , dok su površine grla i otvora levka S_t i S_m , respektivno.

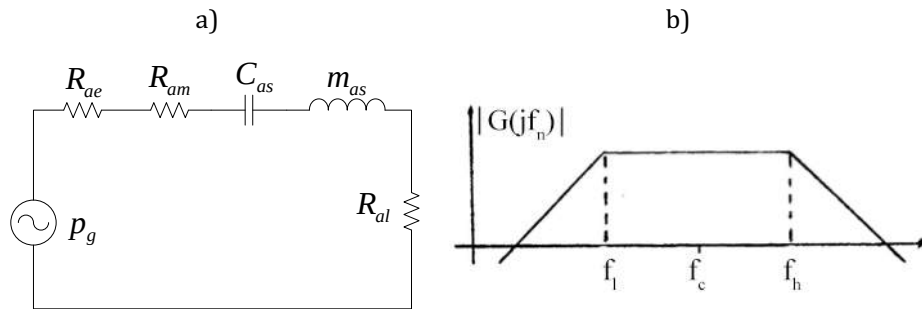
U opsegu srednjih frekvencija koji u osnovi predstavlja radno područje zvučničkog sistema sa levkom, analogno akustičko kolo izgleda kao na slici 7.41a [15], [20]. U ovom kolu R_{ae} predstavlja električne gubitke u kalemu preslikane u akustičko kolo dok je m_{as} akustička induktivnost zvučnika, a R_{am} i C_{at} su akustički elementi dati izrazima:

$$R_{am} = R_{as} + R_{ab}, \quad (7.45)$$

$$C_{at} = \frac{C_{as}C_{ab}}{C_{as}+C_{ab}}. \quad (7.46)$$

Kao i u prethodnim slučajevima R_{as} i C_{as} su akustička otpornost i kapacitivnost zvučnika, a R_{ab} i C_{ab} kutije, koja zatvara zvučnik sa zadnje strane, čija je zapremina V_b . R_{al} je akustička otpornost zračenja membrane na poziciji grla levka.

Ne ulazeći u detaljnu analizu kola sa slike 7.41a, niti u analizu kola koja bi odgovarala slučajevima niskih i visokih frekvencija, ovde ćemo dati samo osnovne rezultate te analize i navesti minimalno potrebne izraze za proračun ovakvog sistema.



Slika 7.41 - Zvučnički sistem sa levkom na srednjim frekvencijama: a) analogno akustičko kolo, b) frekventijska karakteristika[15]

Frekventijska karakteristika ovakvog sistema odgovara karakteristici filtra propusnika opsega frekvencija, slika 7.41b. Granične frekvencije radnog opsega date su relacijama:

$$f_l \approx f_c Q_{tc}, \quad (7.47)$$

$$f_h \approx \frac{f_c}{Q_{tc}}. \quad (7.48)$$

gde je f_c centralna frekvencija radnog opsega a Q_{tc} faktor dobrote ekvivalentnog kola. Iz izraza (7.47) i (7.48) je moguće dobiti i sledeće jednakosti:

$$f_c = \sqrt{f_l f_h}, \quad (7.49)$$

$$Q_{tc} = \sqrt{\frac{f_l}{f_h}}. \quad (7.50)$$

Koeficijent iskorišćenja zvučničkog sistema sa levkom zavisi samo od parametara zvučnika i definisanog radnog opsega sistema prema izrazu [20], [45]:

$$\eta \approx \frac{f_s}{f_h \cdot Q_{es}}. \quad (7.51)$$

Kako se vidi iz izraza (7.51) zvučničkim sistemima sa levkom odgovaraju zvučnici kod kojih je odnos f_s/Q_{es} što je moguće veći. Zato postupak projektovanja ovakvih sistema baš i počinje izborom odgovarajućeg zvučnika. Nakon toga, treba odabrati gornju graničnu frekvenciju f_h , vodeći računa o mogućoj vrednosti koeficijenta iskorišćenja η , jednačina (7.51). Potom se bira donja granična frekvencija f_l , imajući u vidu potrebne dimenzije usta levka S_m , jednačina (7.44):

$$f_l \geq f_0 = \frac{c}{4\pi \sqrt{\frac{S_m}{\Omega}}}. \quad (7.52)$$

gde je c brzina zvuka, Ω prostorni ugao zračenja levka a f_0 njegova prekidna frekvencija, ispod koje levak ne zrači akustičku energiju.

Prekidnu frekvenciju je moguće podesiti izborom parametara M levka, prema sledećoj jednakosti [45]:

$$f_0 = \frac{M \cdot f_l}{(1 - \eta)} \quad (7.53)$$

Pri tome treba nastojati da parametar M padne u opsegu između 0,5 i 1 što predstavlja prihvatljiv kompromis u smislu zahteva za malim izobličenjima i uniformnom karakteristikom ulazne otpornosti levka.

Sada se, iz izraza (7.49) i (7.50), mogu naći vrednosti f_c i Q_{tc} , pa ostaje da se izračunaju zapremina kutije V_b , zapremina prednje komore V_{fc} i odnos transformacije površina membrane i grla levka $T=S_d/S_t$. Ove veličine se dobijaju iz jednačina [20], [45]:

$$V_b = \frac{V_{as}}{\left(\frac{f_c}{f_s}\right)^2 - 1}, \quad (7.54)$$

$$V_{fc} \leq \frac{V_{as}}{\eta} \cdot \frac{Q_{tc}}{Q_{es}} \cdot \frac{f_s}{f_c}, \quad (7.55)$$

$$T = \frac{1 - \eta}{\eta} \cdot \frac{c \cdot a_d^2}{2 \cdot f_s \cdot V_{as} \cdot Q_{es}}. \quad (7.56)$$

Na kraju, iz poznatog odnosa transformacije T nalazi se površina grla levka kao $S_t = S_d / T$.

7.15 Levkovi za srednje i visoke frekvencije

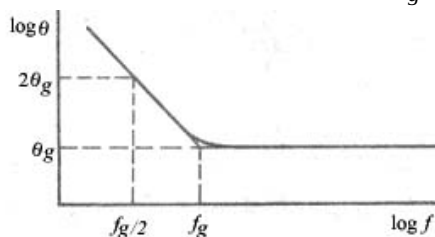
Levkovi za srednje i visoke frekvencije koriste se u audio sistemima, uglavnom iz dva osnovna razloga: imaju visok koeficijent korisnog dejstva i relativno konstantne uglove zračenja. Idealni levak bi trebalo da predstavlja konstantno akustičko opterećenje za zvučnik (pobuđivač) i da ima precizno definisane i konstantne uglove zračenja u celom radnom opsegu frekvencija.

Da bi što bolje zadovoljili ove kriterijume, levkovi su se godinama usavršavali menjajući svoj osnovni oblik, konstrukcione parametre i materijale od kojih se izrađuju.

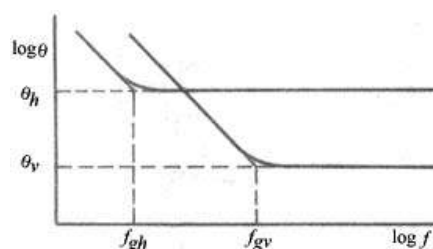
Danas u upotrebi imamo klasične eksponencijalne, višecelijske, radijalne, familiju novijih, takozvanih "difrakcionih" levkova i najnovije levkove nazvane »talasovodima«.

7.15.1 Levkovi sa idealnim karakteristikama usmerenosti

S obzirom da su levkovi u praksi ograničenih dimenzija oni, u idealnom slučaju, mogu imati konstantne uglove zračenja samo počev od određene granične frekvencije f_g pa naviše, slika 7.42.



Slika 7.42 - Ugao zračenja idealnog levka



Slika 7.43 - Ugao zračenja idealnog levka sa pravougaonim oblikom otvora

Ispod granične frekvencije f_g , gde dimenzije levka postaju uporedive sa talasnom dužinom zvuka, ugao zračenja levka se povećava dostižući dvostruku vrednost na dva puta nižoj frekvenciji, sve dok ne dostigne ugao od 360° .

Frekvencija iznad koje je ugao zračenja konstantan, kao i njegova vrednost, u opštem slučaju, razlikuju se za horizontalnu i vertikalnu ravan, slika 7.43.

Eksperimentalno je utvrđeno da levkovi koji svojim oblikom aproksimiraju segment radijalno pulsirajuće sfere u datoj ravni (hiperbolično-eksponencijalni, konusni, višećelijski, radijalni itd.) zadovoljavaju relaciju [13]:

$$f_g = \frac{k}{\theta \cdot h} \quad (7.57)$$

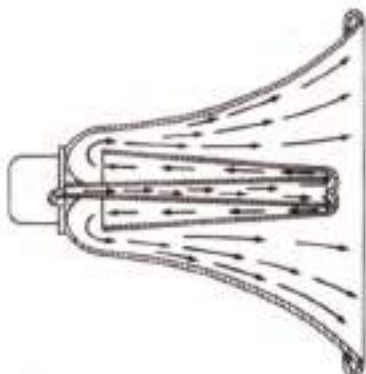
gde je: h - dimenzija otvora levka,

θ -ugao zračenja,

f_g -granična frekvencija iznad koje je ugao zračenja levka konstantan,

$k = 2,5 \cdot 10^4$ m·Hz, konstanta.

Eksponencijalni levkovi koji se odavno primenjuju imaju prihvatljivu frekvencijsku karakteristiku skoro do same prekidne frekvencije. Međutim, oni nemaju uniformnu karakteristiku usmerenosti niti konstantne uglove zračenja. Pored toga, karakteristika usmerenosti im



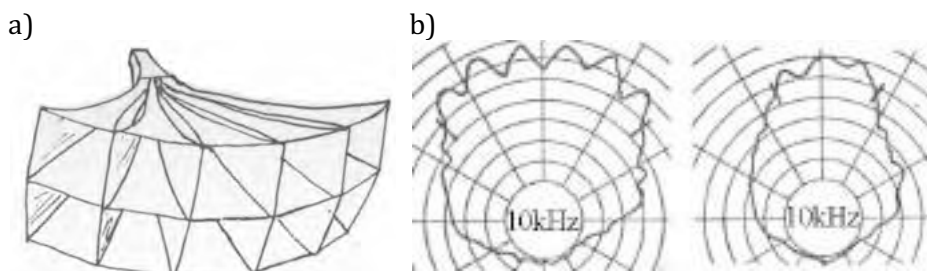
Slika 7.44.- Savijeni eksponencijalni levak

jako zavisi od brzine širenja. Da bi se mogli koristiti do što nižih frekvencija, u kom slučaju moraju imati što sporiji porast površine poprečnog preseka i što veću dužinu, ovi levkovi se često grade u savijenoj formi, slika 7.44, sa kružnim poprečnim presekom. Nažalost i u tom slučaju imaju ugao zračenja koji jako zavisi od frekvencije.

Dve familije eksponencijalnih levkova sa poboljšanim karakteristikama usmerenosti su višećelijski i radijalni levkovi o kojima će dalje biti više reči.

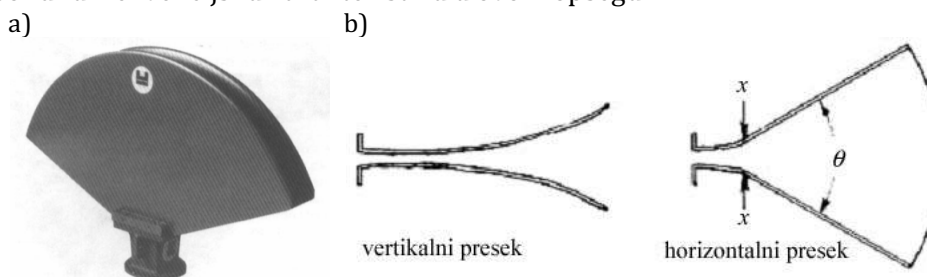
Višećelijski levkovi sastoje se od velikog broja malih eksponencijalnih levkova čije ose prolaze kroz zajedničku tačku, i koji su usmereni u željenom pravcu, slika 7.45a [13]. Ovo je originalan način kontrole karakteristika usmerenosti. Ovakva konstrukcija na nižim i

srednjim frekvencijama dobro aproksimira sfernu površinu sa uniformnom fazom i amplitudom zvučnih talasa na otvoru levka. Na višim frekvencijama međutim, svaki "mali levak" zrači pojedinačno u nezavisan uzan snop. To stvara velika kolebanja u karakteristici usmerenosti, slika 7.45b. Pored toga, višćelijski levkovi sužavaju ugao zračenja na srednjim frekvencijama u obe ravni.



Slika 7.45 - Višćelijski levak: a) izgled, b) karakteristike usmerenosti u horizontalnoj i vertikalnoj ravni na visokim frekvencijama (podela na skali je 5 dB) [13]

Zbog eksponencijalnog zakona širenja imaju veoma dobro prilagođenje impedanse na niskim frekvencijama, a kao posledicu toga i solidnu frekvencijsku karakteristiku u ovom opsegu.



Slika 7.46 - Radijalni levak (60° x 90°): a) izgled, b) preseki u verikalnoj i horizontalnoj ravni [13]

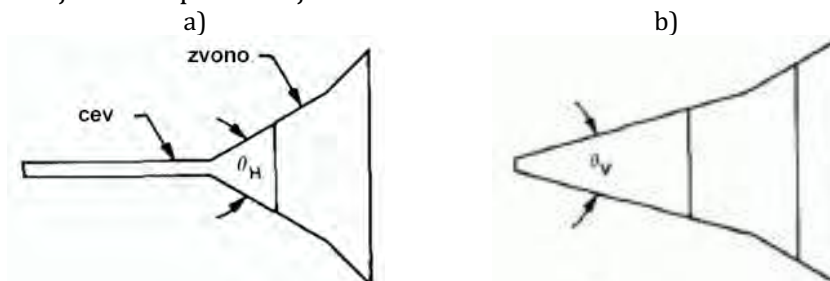
Radijalni levkovi imaju takav oblik da dozvoljavaju prirodno radijalno širenje zvuka od grla ka otvoru, uz jednovremeno održavanje eksponencijalnog zakona širenja radi obezbeđenja prihvatljive frekvencijske karakteristike na niskim frekvencijama. Dve naspramne strane, obično horizontalne, kod ovih levkova su ravne a druge dve zakrivljene, slika 7.46 [13]. Ugao zahvaćen ravnim stranama ujedno je i ugao zračenja radijalnog levka u horizontalnoj ravni.

Kod ovog levka se takođe sužava ugao zračenja na srednjim frekvencijama ali samo u horizontalnoj ravni, dok u vertikalnoj ravni stalno opada sa frekvencijom.

Difrakcioni levkovi predstavljaju noviju generaciju levkova kod kojih je u prvom planu karakteristika usmerenosti, dok je u drugom planu akustičko prilagođenje i frekvenzijska karakteristika na niskim frekvencijama. Ovo je donekle logično, s obzirom da karakteristike usmerenosti zavise od oblika samog levka dok je prenosnu karakteristiku, u određenoj meri, moguće popraviti elektronski različitim vrstama frekvenzijskih korektora.

Svi ovi levkovi spadaju u familiju levkova konstantne direktivnosti („Constant Directivity“ - ili „CD“ levkovi). S obzirom na način formiranja talasnog fronta oni su difrakcioni. Naime, kod difrakcionih levkova na putu talasa od grla ka otvoru postoji jedan jako izražen diskontinuitet, slika 7.47 [17]. Na mestu diskontinuiteta talasni front, usled difrakcije, prelazi u vrlo široku polarnu karakteristiku. Ovu karakteristiku dalje kontroliše deo levka sa ravnim ili zakrivljenim zidovima, ali sa manjim prostornim uglom od onog koji bi se dobio samo difrakcijom.

Da bi se popravio ugao zračenja u okolini granične frekvencije kod difrakcionih levkova se uvodi još jedan diskontinuitet u vidu naglog širenja zadnjeg dela levka, neposredno ispred otvora. Tako duž levka postoje tri zone difrakcije: na difrakcionom otvoru, na mestu naglog širenja pre otvora i na samom otvoru levka. U nekim slučajevima se na poziciji otvora levka, lagano prelazi u ravan akustički zastor, čime se izbegava treća zona difrakcije ali se zbog sporog prelaska strana levka u ravan zastor njegove dimenzije znatno povećavaju.



Slika 7.47 - Difrakcioni levak – presek: a) horizontalna, b) vertikalna ravan [17]

Difrakcione levkove u različitim varijantama proizvode mnogi proizvođači zvučnika, pod različitim imenima. Tako ih Electro-Voice naziva „CE levkovi“, Altec „Manta-Ray“ levkovi, JBL „Biradijalni“ levkovi itd. Kod svakog proizvođača postoji i neko specifično rešenje u konstrukcionim detaljima i svaki od ovih tipova levkova je zaštićen patentom.

Pored pozitivne osobine da su im uglovi zračenja konstantni difrakcioni levkovi imaju ne mali broj nedostataka. To su pre svega, pojačana izobličenja koja nastaju, pri visokim nivoima zvuka, na delovima levka sa sporom promenom poprečnog preseka. Diskontinuiteti na putu prostiranja

zvučnih talasa kroz levak dovode do refleksija zvučne energije, što ima za posledicu frekvencijski promenljivu električnu i akustičku impedansu i neravnu frekvencijsku karakteristiku. Na diskontinuitetima duž levka dolazi do difrakcije zvučnih talasa što dovodi do pojave dodatnih izobličenja. Na segmentima levka gde su mu paralelni naspramni zidovi dolazi do pojave neželjenih rezonansi.

Svi ovi faktori u kombinaciji daju prepoznatljiv tzv. „zvuk levka“, koji znači smanjen kvalitet reprodukcije audio signala.

Takođe, difrakcioni levkovi imaju jak astigmatizam površine talasnog fronta. Naime poluprečnik krivine talasnog fronta je različit u horizontalnoj i vertikalnoj ravni. Usled toga oblik talasnog fronta ovakvog levka, u najboljem, može biti elipsoid. Ovo ne mora da bude nedostatak ako se levak koristi sam, međutim problem nastaje ako se više od jednog levka koristi u grupi.

7.15.2 Akustički talasovodi

Radi otklanjanja navedenih nedostataka difrakcionih levkova razvoj u ovoj oblasti dovodi do pojave levkova čije su karakteristike takve da omogućavaju prostiranje akustičkog talasa „jednog parametra“ (1P talas). Kretanje ovakvog talasa može se opisati jednom prostornom koordinatom. Ovakvi tipovi levkova su nazvani *akustički talasovodi* [28], [32], [33]. Koncept talasovoda se dugi niz godina koristi u mikrotalasnoj tehnici, ali je relativno nov u akustici.

U akustičkom talasovodu mogu se prostirati 1P talasi ukoliko su talasni frontovi paralelene površine, koaksijalni cilindri ili koncentrične sfere [33]. Pri tome vodeća površina talasovoda mora biti ortogonalna na talasne frontove a to zadovoljavaju cilindar, hiperboloid i konus, respektivno. 1P akustički talas ima uniformnu brzinu čestica i intenzitet po celom talasnom frontu, na svim frekvencijama, tako da je njegova direktivnost nezavisna od frekvencije.

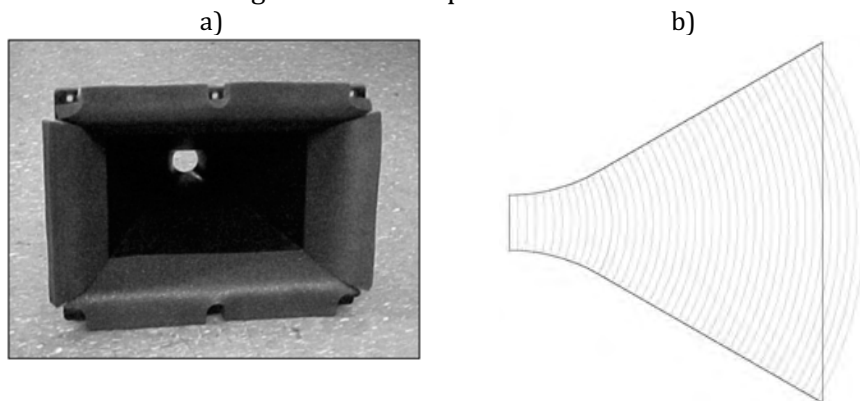
Pravi 1P talasovod mora imati neograničenu dužinu. Ako talasovod nije neograničene dužine on ima karakteristike tipa 1P samo na dovoljno visokim frekvencijama, i zbog toga se sve više približava talasovodu konstantne direktivnosti kako frekvencija raste.

Od pobrojana tri tipa levkova koji imaju osobine 1P talasovoda konusni levkovi su najprostiji za izradu i uglavnom služe kao osnova za gradnju savremenih levkova konstantne direktivnosti. Ali kod njih je potrebna određena korekcija zakona širenja na prelazu iz grla u zvono levka, da bi se ravanski talasni front, koji postoji na grlu levka, pretvorio u sferni, koji bi trebalo da postoji na njegovom otvoru. Taj prelaz treba da bude blag sa veoma laganom promenom radijusa i to je ono što ove levkove čini

različitim od familije levkova koji koriste difrakciju radi postizanja konstantne direktivnosti.

Osnovni problem koji se u izradi ovakvih levkova pojavljuje je kako napraviti prelaz sa kružnog oblika grla na ravne zidove koji definišu uglove zračenja levka. Pri tome akustički centri levka za horizontalnu i vertikalnu ravan moraju da budu u jednoj tački u centru grla. Na ovaj način se izbegava astigmatizam talasnog fronta i ovaj postaje sferni, što za posledicu ima veoma lako kombinovanje prostornih segmenata kada se više levkova koristi u jednom nizu. Levkovi se mogu zakretati i naginjati prema potrebi, bez uticaja na prostornu orijentaciju talasnog fronta, pošto je on sferni [36].

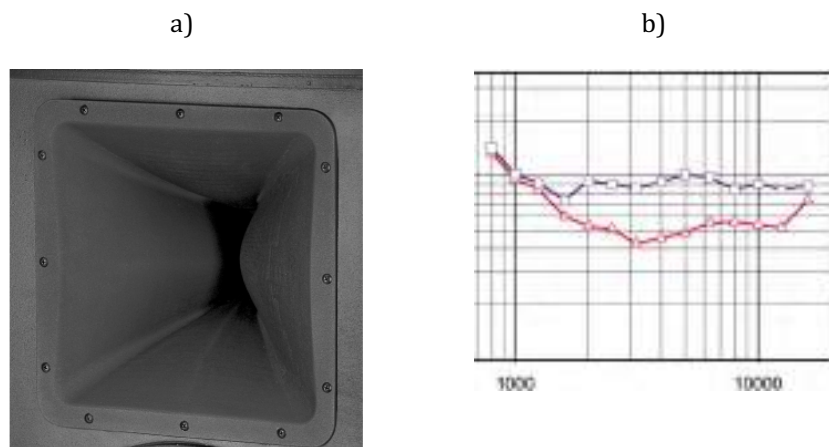
Talasovodi realizovani u praksi imaju različite nazive zavisno od toga šta su proizvođači želeli da istaknu kao originalnu crtu u njihovom dizajnu. Inače to su u osnovi konusni levkovi u zoni zvona, sa manjim ili većim odstupanjem od konusnog zakona širenja poprečnog preseka u zoni prelaza između grla i zvona. Način realizacije ovog prelaza razlikuje se od proizvođača do proizvođača i uglavnom se on ističe kao osnovna karakteristika i često figurira u nazivu proizvoda.



Slika 7.48 - Talasovod sa kvadratnim grlom (*Quadratic-Throat Waveguide*) [36]:
a) izgled, b) presek sa naznačenim oblikom talasnog fronta gde se vidi prelaz iz ravanskog u sferni

Tako imamo elipsoidni talasovod (*Oblate Spheroid Wave Guide*) [32], talasovod sa kvadratnim grlom (*Quadratic-Throat Waveguide*) [36], slika 7.48, talasovod sa progresivnim prelazom (*Progressive Transition Waveguide*), slika 7.49, [47] itd.

Talasovodi o kojima je bilo reči, imaju ravniju frekvencijsku karakteristiku, ravniju krivu električne i akustičke impedanse i znato manja harmonijska izobličenja od odgovarajućih levkova konstantne direktivnosti sa difrakcijom, što je neminovno rezultiralo i višim kvalitetom zvuka.



Slika 7.49 - Talasovod sa progresivnim prelazom (*Progressive Transition Waveguide*) [47]: a) izgled, b) uglovi zračenja u horizontalnoj i vertikalnoj ravni

Najvažniji nedostaci talasovoda su što je sa njima teško postići konstantne široke uglove zračenja i što nisu pogodni za niske frekvencije. Da bi se mogli primeniti na niskim frekvencijama, morali bi, kao i klasični konusni levkovi, imati veliku dužinu. Stoga se može reći da akustički talasovodi imaju izvanredne direktivne karakteristike i obezbeđuju veoma dobro prilagođenje akustičke impedanse na frekvencijama iznad oko 1 kHz.

Refleksija akustičke energije na ustima talasovoda u praksi se umanjuje povećanjem krivine na poziciji usta i prelaskom u ravan zastor, ili oblaganjem ivica usta određenom vrstom akustičke pene. U ovom drugom slučaju ukupna dužina levka može da bude manja.

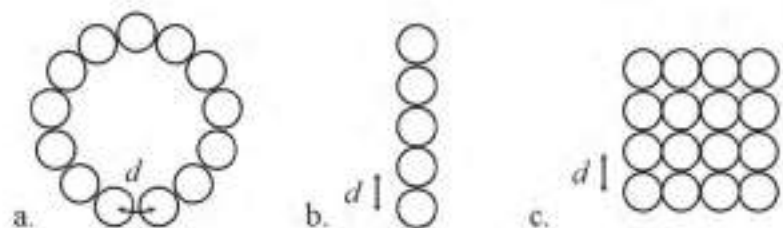
7.16 Zvučničke grupe

7.16.1 Pojam zvučničke grupe

Zvučničku grupu čine dva ili više identičnih zvučnika pravilno raspoređenih, na što manjim međusobnim rastojanjima. To mogu biti zvučnici ugrađeni u jednu kutiju odnosno posebne zvučničke jedinice sa zatvorenim ili bas refleks kutijom, ili sa levkom, međusobno tako raspoređene da čine jednu celinu.

Oblik grupe može biti kružni, linijski ili kvadratni, kako je prikazano na slici 7.50.

Osnovna namena zvučničke grupe je reprodukcija visokih nivoa zvuka uz mala izobličenja. Koriste se za ozvučavanje velikih otvorenih ili zatvorenih prostora. Na niskim frekvencijama zračenje grupe je neusmereno i ona se ponaša kao jedan izvor zvuka znatno veće akustičke snage nego što je zbir snaga pojedinih elemenata u njoj.



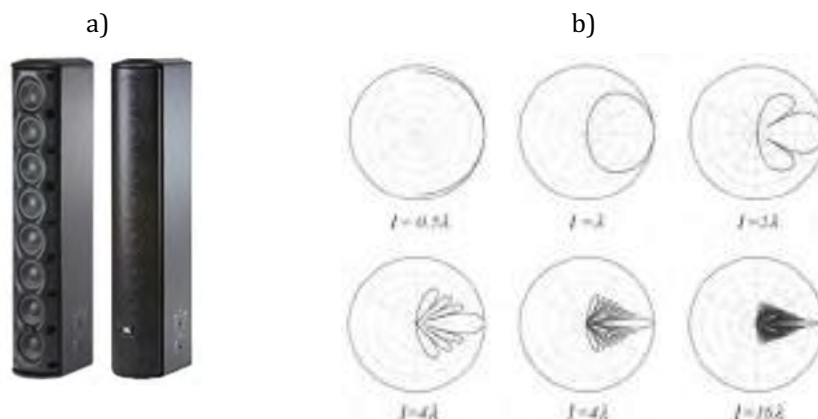
Slika 7.50 – Tipovi zvučničkih grupa: a. kružni, b. linijski, c. kvadratni

Poseban oblik zvučničkih grupa predstavljaju linijski izvori zvuka. Njihova osnovna osobina, pored povećane snage zračenja, je i konstantna karakteristika usmerenosti u vertikalnoj ravni.

7.16.2 Linijski izvori

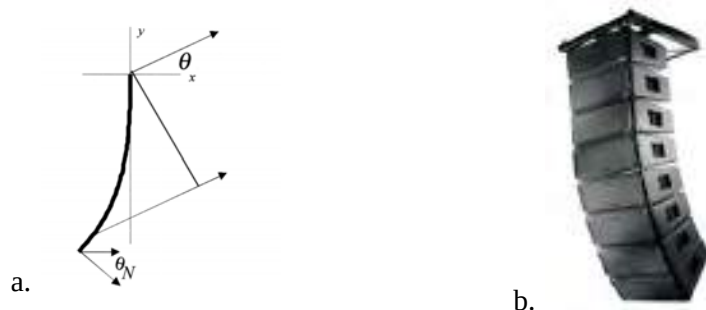
Linijski izvori se danas sve više koriste u sistemima ozvučavanja [40], [41], [43]. Ranije verzije zvučničkih linijskih izvora, poznatije pod imenom »zvučni stubovi« imale su u svom sastavu vertikalni niz širokopojasnih zvučnika sa direktnim zračenjem, slika 7.51a.

Na slici 7.51b prikazane su karakteristike usmerenosti uniformnog linijskog izvora pri različitim odnosima dužine izvora l i talasne dužine zvuka λ . Kako se ovaj odnos povećava karakteristika usmerenosti se sužava i u njoj se pojavljuju nule i bočne petlje zračenja.



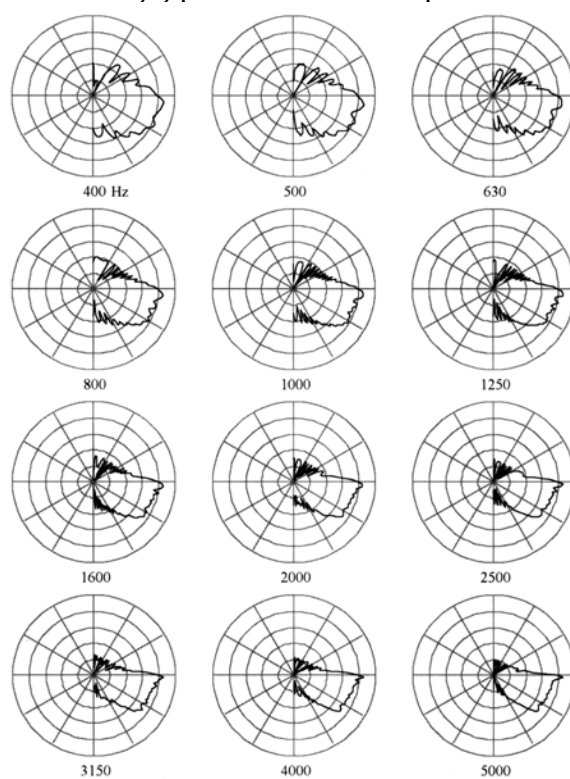
Slika 7.51 - Zvučni stub: a) izgled, b) dijagrami zračenja u vertikalnoj ravni [40]

Pri velikim vrednostima l/λ , odnosno kada se radi o dugačkim izvorima ili visokim frekvencijama, njegova karakteristika usmerenosti postaje preterano uska, što predstavlja ozbiljan nedostatak u praktičnoj primeni.



Slika 7.52 - Progresivni linijski izvor sa graničnim uglom θ_N ,
a) geometrijske relacije, b) fizički izgled [43]

Savremeni linijski izvori sastoje se od određenog broja višepojasnih zvučnih sistema (zvučnička kutija sa ugrađenim zvučnicima za niske, srednje i visoke frekvencije) poređanih u obliku prave ili zakrivljene linije.



Slika 7.53 - Karakteristike usmerenosti progresivnog linijskog izvora u vertikalnoj ravni (dužina izvora je $l = 5 \text{ m}$, a granični ugao $\theta_N = 45^\circ$) [43]

Može se reći da sastavne jedinice savremenih linijskih izvora, same za sebe, predstavljaju složene zvučničke sisteme sa većim brojem zvučnika

za svaki opseg frekvencija. Njihove karakteristike usmerenosti u horizontalnoj ravni obično su simetrične. Za reprodukciju srednjih i visokih frekvencija se najčešće koriste zvučnici sa specijalnim levkom – talasovodom koji ima konstantne uglove zračenja do najviših audio frekvencija.

U praksi je često potrebno da linijski izvor u vertikalnoj ravni ima asimetričnu karakteristiku zračenja tako da zvučnu energiju usmerava napred i prema dole u isto vreme. Ovo se, može postići ako je izvor delimično zakrivljen u svom donjem delu, slika 7.52 [43].

Takav je tzv. „progresivni“ linijski izvor kod kojeg se ugao između dva susedna elementa menja za iznos definisan izrazom:

$$\theta_n = (n - 1)\Delta\theta, \quad (7.58)$$

gde je sa n označen n -ti element (zvučnik ili zvučnički sistem) u linijskom izvoru. Opseg vednosti broja n je $1 \leq n \leq N$, dok je N ukupan broj elemenata izvora. Tako, ako je $\Delta\theta = 1^\circ$ i ako je prvi element usmeren u horizontalnom pravcu, tj. $\theta_1 = 0^\circ$, drugi će sa ovim pravcem zahvatati ugao $\theta_2 = 1^\circ$, treći $\theta_3 = 2^\circ$, četvrti $\theta_4 = 3^\circ$, peti $\theta_5 = 4^\circ$, itd. Zadnji element u nizu zahvataće sa horizontalnom ravni ugao θ_N dat relacijom:

$$\theta_N = \frac{N(N-1)}{2}\Delta\theta. \quad (7.59)$$

Ovo je ujedno i granični ugao linijskog izvora, slika 7.52a.

Na slici 7.53 su prikazane karakteristike usmerenosti u vertikalnoj ravni progresivnog linijskog izvora dužine $l = 5$ m i graničnog ugla $\theta_N = 45^\circ$ [42]. Sa slike se vidi da se karakteristika usmerenosti ovog izvora slabo menja sa frekvencijom. Iz tog razloga izvori ovakve geometrije sve se više koriste u savremenim sistemima ozvučavanja.

7.17 Pitanja za proveru znanja

1. Koliki deo električne snage dovedene na priključke zvučnika sa direktnim zračenjem se pretvara u kalem u toplotu?
2. Šta predstavlja efikasnost zvučnika izražena u dB?
3. Šta je indeks pretvaranja zvučnika? Koliko iznosi indeks pretvaranja zvučnika koji pri ulaznom naponu od 2,83 V daje na rastojanju 1m, u pravcu ose, zvučni pritisak od 1 Pa?
4. Kako se definiše efikasnost zvučnika? Koliko iznosi efikasnost zvučnika impeanse 8Ω koji pri ulaznom naponu od 2,83 V daje na rastojanju 1m, u pravcu ose, zvučni pritisak od 2 Pa?
5. Šta je gornja granica „opsega klipa“ membrane za dati zvučnik?
6. Šta je i koliko iznosi efektivni poluprečnik membrane zvučnika?
7. Koji se oblici membrane niskotonskih zvučnika pojavljuju u praksi?

8. Koliki nagib ima amplituda prenosne funkcije zvučničkog sistema sa zatvorenom kutijom na niskim frekvencijama?
9. Ako dva zvučnika različitih veličina membrana daju istu akustičku snagu, kakav je odnos pomeraja njihovih membrana?
10. Kakav oblik ima amplituda prenosne funkcije zvučnih sistema sa spregnutim komorama?
11. Šta su i kakvu karakteristiku usmerenosti imaju „progresivni“ linijski izvori?
12. Šta se može reći za čujnost šumova i izobličenja kod sistema sa bas refleks kutijom, a šta kod sistema sa pasivnim radijatorom?
13. Šta su zvučničke grupe, u kakvim oblicima se najčešće izrađuju i koje su njihove najvažnije osobine?
14. Navesti neke od najpoznatijih familija levkova koji se koriste u audio sistemima.
15. Koje su osnovne karakteristike eksponencijalnih levkova i zašto se eksponencijalni levkovi često izrađuju u savijenoj formi?
16. Kako izgleda višćelijski levak i koje su mu dobre osobine?
32. Šta su difrakcioni levkovi i koje su najpoznatije njihove familije?

7.18 Literatura

- [1] L.L. Beranek, *Acoustics*, McGraw Hill, New York, 1954.
- [2] H.F. Olson, *Acoustical Engineering*, D.Van Nostrand Company Inc., New York, 1957.
- [3] A.N. Thiele, "Loudspeakers in Vented Boxes", *Proc. IREE (Australia)* vol 22, p 487 (Aug. 1961).
- [4] A.B. Cohen, *Hi - Fi Loudspeakers, and Enclosures*, Hyden Book Company, 1968.
- [5] J.E. Benson, "Theory and Design of Loudspeaker Enclosures", *A.W. A Tech. Rev.*, vol 14, part I, No 1, pp 1 (1968), part II, No 3, pp 225 (1971), part III, No 4, pp 369 (1972)
- [6] R.H. Small, "Direct -Radiator Loudspeaker System Analysis", *J. Audio Eng. Soc.*, vol 20, no.5, pp 383 (June 1972).
- [7] R.H. Small, "Closed-Box Loudspeaker Systems", *J.Audio Eng. Soc.*, Part I, vol 20, pp 798, . (Dec. 1972), Part II, vol 21, pp 11, (Jan./Feb. 1973).
- [8] D.B Keele, Jr., "Optimum Horn Mouth Size" 46th AES Conv., preprint 933, (September 1973).
- [9] J. Dinsdale, "Horn Loudspeaker Design" *Wireless World*, Part I pp 19-24 (March), Part II pp 133-138 (May) Part III pp 186-190 (June 1974).
- [10] R. H. Small, "Vented- Box Loudspeaker Systems", *J. Audio Eng. Soc.*, vol 21, part I, pp 363 (June 1973), part II, pp 438, (July/August 1973), part III, pp 549 (Sept 1973), part IV, pp 635 (Oct. 1974).

- [11] R.H. Small, "Passive - Radiator Loudspeaker Systems", *J.Audio Eng. Soc.*, Part I, vol 22, no. 8, pp 592-601, (October 1974), Part II, vol 22, no. 9, pp 683-689, (November 1974).
- [12] R.H. Small, "Suitability of Low-Frequency Drivers for Horn-Loaded Loudspeaker Systems", 57th AES Conv., preprint 1251, (May 1977).
- [13] D.B. Keele, Jr., "What's so Sacred About Exponential Horns?" 51st AES Conv., preprint 1038, (May 1975).
- [14] *Loudspeakers*, An anthology of article on loudspeakers from the pages of the Journal of the Audio Engineering Society, Vol.1 – Vol.25 (1953 – 1977).
- [15] D.B. Keele, Jr., "Low-Frequency Horn Design Using Thiele/Small Driver Parameters", 57th AES Conv., preprint 1250, (May 1977).
- [16] D. B. Weems, *How to Design, Build and Test Complete Speaker Systems*, Tab Books, Pa, USA, 1978.
- [17] C. Henriksen, M. Ureda, "Blasfemy – The Manta –Ray Horns, 58th AES Conv., Preprint no. 1288, (May 1978).
- [18] F. J. M. Francort, «Vibration Patterns and Radiation Behaviour of Loudspeaker Cones», *J. Audio Eng.Soc.*, vol 26, pp 609-622 (September 1978).
- [19] L. R. Fincham, "A Bandpass Loudspeaker Enclosure", 63rd AES Conv., Preprint no 1512 (1979).
- [20] W.M.Lech Jr., „On The Specification of Moving-Coil Drivers for Low – Frequency Horn-Loaded Loudspeaker Systems“, *J. Audio Eng. Soc.* vol. 27, No 12, pp 950-959, (December 1979).
- [21] A.B. Williams, *Electronic Filter Design Handbook*, Mc-Graw Hill, 1981.
- [22] J. Merhaut, *Theory of Electroacoustics*, McGraw Hill, New York, 1981.
- [23] M. Colloms, *High Performance Loudspeakers*, Pentech Press, 1981.
- [24] T.L. Clarke, "Augmented Passive – Radiator Loudspeaker systems", Part I, *J.Audio Eng. Soc.*, vol 29, no. 6, pp. 394-404 (June 1981), Part II, *J.Audio Eng. Soc.*, vol 29, no. 7, pp. 511-516, (Jule/August 1981).
- [25] M. E. Engebretson, »Low Frequency Sound Reproduction«, 72-nd AES Conv., Preprint No 1937 (October 1982).
- [26] R. A. Greiner, M. Allie, »Acoustical and Electrical Interaction in Multidriver Arrays«, *J. Audio Eng. Soc.* vol. 31, No 10, pp 737-744, (October 1983).
- [27] H. J. Wiebell, R. A. R. Bywater, "Pracitcal Design of Optimal Sealed-Box Loudspeaker Systems", *Australian Regional AES Conv.*, Preprint no 2105, (Sept. 1984).
- [28] E. R. Geddes, "Acoustic Waveguide Theory", 83rd AES Conv., Preprint no. 2547, (October 1987).
- [29] R. Lian, «Distorsion Mechanisms in the Electrodinamic Motor System», 84th AES Conv., Preprint No. 2572, (March 1988).

- [30] E. R. Geddes, „An Introduction to Band-Pass Loudspeaker Systems“, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol.37, No.5, (May1989).
- [31] H. Š. Kurtović, *Osnovi tehničke akustike*, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [32] I. Jelenčić, *Zvučnici*, Školska knjiga, Zagreb, 1991.
- [33] E. R. Geddes, „Acoustic Waveguide Theory Revisited“, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 41, No.6, (June 1993).
- [34] G. R. Putland, „Every One-Parameter Acoustic Field Obeys Webster's Horn Equation“, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 41, No. 6, (June 1993).
- [35] J. D'Appolito, *Testing Loudspeakers*, Audio Amateur Press, 1998.
- [36] W. M. Leach, Jr., *Introduction to Electroacoustics and Amplifier Design*, Kendall/Hunt Publishing Co.,1999.
- [37] C. E. Hughes, „A Generalized Horn Design to Optimize Directivity Control and Wavefront Curvature“, *107-th AES Conv.*, paper 5016, (September 1999).
- [38] D.H. Hurlburt, « Complete Response Function and system Parameters for a Loudspeaker with Passive radiator“, *J.Audio Eng. Soc.*, vol 48, no. 3, pp. 147-163, (March 2000).
- [39] J. Borwick, *Loudspeaker and Headphone Handbook*, Focal Press, 2001.
- [40] M.S.Ureda, »Line – Arrays: Theory and Applications«, *110-th AES Conv.*, Preprint No 5304, (May 2001).
- [41] M. E. Engbretson, »Directional Radiation Characteristics of Articulating Line Array Loudspeaker Systems«, *111-th AES Conv.*, (November 2001).
- [42] AES2-1984 (r2003), AES Recommended Practice Specification of Loudspeaker Components Used in Professional Audio and Sound Reinforcement.
- [43] M.S.Ureda, »Analysis of Loudspeker Line Arrays«, *J. Audio Eng. Soc.* vol. 52, No 5, pp 467-495, (May 2004).
- [44] P. Newell, K. Holland, *Loudspeakers for Music Recording and Reproduction*, Focall Press, 2007.
- [45] P. Pravica, D. Drinčić, *Elektroakustika*, Visoka škola elektrotehnike i računarstva, Beograd 2008.
- [46] B. Kolbrek, “Introduction to Horn Theory”, part I and part II, AudioXpress 2008, www.audioXpress.com.
- [47] Progressive Transition (PT) Waveguides , JBL Professional, Technical Notes Volume 1, Number 31.

Zvučničke skretnice

8.1 Uvod

Zvučničke skretnice se pojavljuju sa počecima zvučnog filma. U svom radu „Dividing Networks for Loud Speaker Systems“ objavljenom još 1936. godine, Hilliard i Kimball [1] dotiču skoro sve probleme vezane za korišćenje skretnica (slabljenje, impedansu, fazu, kašnjenje, karakteristike zvučnika itd.), koji su i do danas ostali aktuelni.

U prvom delu ove glave objašnjeni su osnovni pojmovi o električnim filtrima, što će, kasnije, doprineti boljem razumevanju materije koja se odnosi na zvučničke skretnice.

Izlaganje o skretnicama počinje objašnjenjem načina njihovog korišćenja i principa njihove podele na aktivne i pasivne, dvopojasne i višepojasne, objašnjenjem njihovih osnovnih karakteristika i pregledom potrebnih uslova za realizaciju optimalnih skretnica.

Zatim su detaljno izložene karaktersitike dvopojasnih i tropojasnih zvučničkih skretnica i uobičajeni načini njihove realizacije.

8.2 Električni filtri

8.2.1 Osnovne karakteristike električnih filtara

Električni filtar se u opštem slučaju može prikazati četvoropolom, kako je dato na slici 8.1, gde je e_g elektromotorna sila izvora (generatora), a Z_p impedansa opterećanja filtra. Prenosna funkcija filtra u kompleksnom domenu $F(s)$, definisana kao odnos izlaznog napona V_i i elektromotorne sile izvora e_g može se napisati na sledeći način [11]:

$$F(s) = \frac{V_i(s)}{e_g(s)} = |F(s)|e^{j\varphi(s)}, \quad (8.1)$$

gde su (za $s = j\omega$):

$$M(\omega) = |F(j\omega)| = \sqrt{\operatorname{Re}[F(j\omega)]^2 + \operatorname{Im}[F(j\omega)]^2}, \quad (8.2)$$

i

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}[F(j\omega)]}{\operatorname{Re}[F(j\omega)]} \quad (8.3)$$

amplituda i faza filtra. U literaturi se ove dve poslednje veličine nazivaju još, i amplitudska i fazna frekventijska karaktersitka (ili odziv) filtra, ili prosto, amplitudska i fazna karaktersitka filtra.

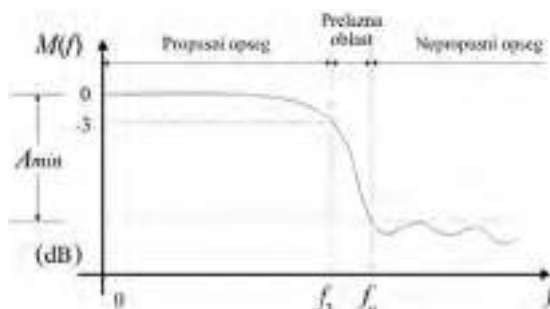
Grupno kašnjenje filtra je takođe jedan od njegovih važnih parametara i često se koristi umesto fazne karakteristike. Grupno kašnjenje je definisano izrazom:

$$\tau_g(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}, \quad (8.4)$$

gde je $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ kružna učestanost.



Slika 8.1 - Električni filter kao četvoropol



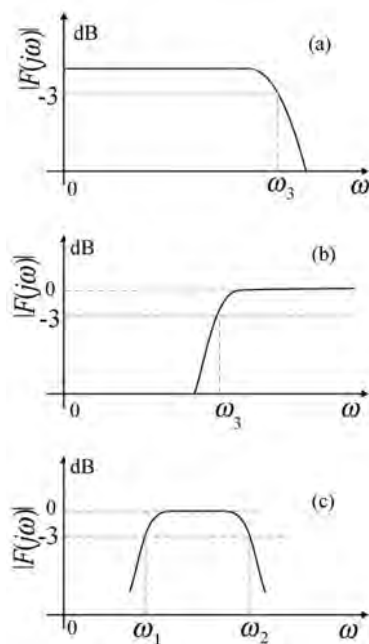
Slika 8.2 - Amplitudska karakteristika filtra sa definisanim karakterističnim frekventijskim opsezima

Opseg frekvencija u kojem električni filter propušta ulazni signal (bez značajnog slabljenja) naziva se propusnim opsegom filtra, dok se opseg frekvencija u kojem je ulazni signal pri prolasku kroz filter jako oslabljen (teorijski jednak nuli) naziva nepropusnim opsegom, slika 8.2.

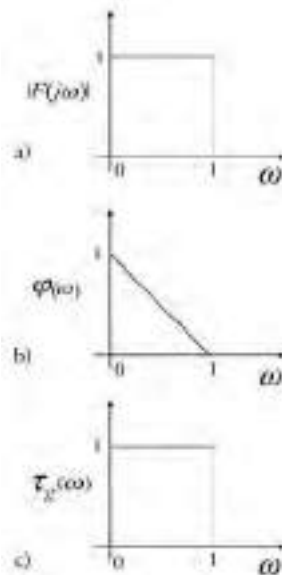
Granična frekvencija filtra f_3 (misli se na graničnu frekvenciju propusnog opsega) je frekvencija na kojoj amplitudska karakteristika filtra opadne za 3 dB u odnosu na njenu vrednost u propusnom opsegu. Granica nepropusnog opsega f_n definiše se za određeno minimalno slabljenje filtra A_{min} , kako je prikazano na slici 8.2. Područje na frekventijskoj osi između f_3 i f_n naziva se prelazna oblast filtra.

U praksi postoje pet osnovnih tipova frekventijski selektivnih električnih filtera. To su: propusnik niskih frekvencija, propusnik visokih frekvencija, propusnik opsega frekvencija, nepropusnik opsega frekvencija i propusnik frekvencija (svih) sa faznom ili vremenskom korekcijom. Kombinacijom ovih osnovnih tipova moguće je realizovati i druge složenije filtre.

U audio skretnicama se uglavnom koriste prva tri tipa električnih filtera, slika 8.3, pa će o njima dalje biti više reči.



Slika 8.3 – Električni filteri koji se najčešće koriste u audio skretnicama;
a) propusnik niskih frekvencija,
b) propusnik visokih frekvencija i
c) propusnik opsega frekvencija



Slika 8.4 - Normalizovane karakteristike Idealnog niskopropusnog filtra:
a) amplitudna karakteristika, b) fazna karakteristika, c) grupno kašnjenje

8.2.2 Aproksimacija idealnih filtera

Kod proučavanja električnih filtera obično se polazi od idealnog normalizovanog filtra propusnika niskih frekvencija, čija je amplitudna karakteristika u propusnom opsegu jednaka jedinici a van ovog opsega nuli, slika 8.4. Fazna karakteristika ovoga filtra je linearna u propusnom opsegu sa negativnim nagibom prema apscisi. Grupno kašnjenje ovakvog filtra je u propusnom opsegu konstantno. U praksi nije moguće realizovati filter sa karakteristikama prikazanim na slici 8.4.

Zato se aproksimira amplitudna ili fazna karakteristika idealnog filtra sa filtrom čija je realizacija moguća i čije su karakteristike najpribližnije idealnim. Kada se dođe do željene aproksimacije filtra propusnika niskih frekvencija tada se odgovarajućim transformacijama frekvencije ovaj osnovni, takozvani „prototip filter“ pretvara u druge tipove filtera, kao što su propusnici visokih frekvencija, propusnici opsega frekvencija itd.

Dakle, problem aproksimacije se svodi na određivanje prenosne funkcije koja treba da zadovolji određene unapred postavljene zahteve. Tako su dobijeni Batervortovi, Čebiševljevi, inverzni Čebiševljevi, eliptički,

Beselovi itd. filtri. Svaka od navedenih familija filtara na određeni način aproksimira amplitudsku ili faznu karakteristiku idealnog filtra sa slike 8.4 [11].

Prenosna funkcija aproksimirajućeg filtra, u opštem slučaju, racionalna je funkcija kompleksne učestanosti s , sa realnim koeficijentima, data izrazom [11]:

$$F(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{\sum_{i=0}^m b_i \cdot s^i}{\sum_{k=0}^n a_k \cdot s^k} \quad (8.5)$$

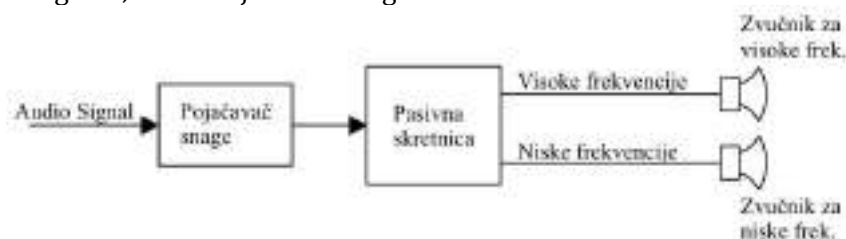
gde su: a_k, b_i – realni koeficijenti, m, n – konstante ($m \leq n$). Red filtra određen je vrednošću konstante n .

8.3 Primena i osnovni tipovi zvučnih skretnica

Visokokvalitetni zvučnički sistemi koji su danas u upotrebi napravljeni su, uglavnom, kao višepojasni. To znači da u svom sastavu imaju dva ili više zvučnika od kojih je svaki optimiziran za određeni deo frekvencijskog opsega. Iako bi bilo poželjno da sva akustička energija stiže od jednog izvora (jednog zvučnika) to u praktičnoj realizaciji nije moguće. Naime, za reprodukciju najviših frekvencija audio signala potreban je zvučnik sa malom i lakom membranom (prečnika 2 cm do 3 cm). Nasuprot tome, za reprodukciju niskih frekvencija, u profesionalnim audio sistemima, potrebni su veliki pomerači kretnog sistema zvučnika i velika površina membrane (prečnika 38 cm do 45 cm). Kao što vidimo, odnos površina membrana niskotonskih i visokotonskih zvučnika dostiže vrednosti od preko 300:1. Sa druge strane, zračenje zvučnika postaje usmereno na višim frekvencijama, a počev od frekvencije na kojoj je prečnik membrane uporediv sa talasnom dužinom zvuka. Za niskotonske zvučnike najvećeg prečnika usmereno zračenje nastaje već na frekvencijama od 1000 Hz pa naviše. Da bi se održao dovoljno širok ugao zračenja za sve frekvencije, reprodukciju viših frekvencija mora preuzeti drugi zvučnik, manjeg prečnika membrane. Kao što se može zaključiti iz nekoliko prethodno iznetih činjenica, podela opsega audio frekvencija na više zvučnika radi poboljšanja kvaliteta reprodukcije, na ovom stepenu razvoja tehnike je neminovna, i jednostavno je posledica fizičkih zakona reprodukcije i prostiranja zvuka.

Značajan deo svakog višepojasnog zvučničkog sistema je i skretnica. To je električna mreža koja se sastoji od dva ili više filtara, pa otuda i nazivi dvopojasna, tropojasna ili višepojasna skretnica. Skretnica deli ukupni audio signal, koji treba reprodukovati, na dva ili više odvojenih signala po frekvenciji. Tako se, svaki zvučnik, u jednom zvučničkom sistemu, napaja signalom iz opsega frekvencija za koji je predviđen.

Pored svoje osnovne funkcije, podele audio signala na dva ili više opsega po frekvenciji, skretnice mogu imati i neke druge funkcije kao što su: korekcija frekvencijskih karakteristika zvučnika, korekcija međusobne razlike u efikasnosti zvučnika, unošenje vremenskog kašnjenja radi korekcije fizičkog položaja zvučnika, korekcija interakcije zvučnika i prostorije, korekcija reprodukcije na niskim i/ili visokim frekvencijama itd. O ovim dodatnim funkcijama skretnice, kada ona dobija osobine procesora audio signala, ovde dalje neće biti govora.



Slika 8.5a – Načini realizacije audio skretnica visokog nivoa (pasivne)

Ovde treba istaći i činjenicu da se prostom podelom audio signala na podopsege ne završava uloga skretnica. Nakon podele, sledi sabiranje reprodukovanih audio signala u akustičkom okruženju zvučničkog sistema, pri čemu oni moraju imati korektnu amplitudu i fazu. Potrebno je da sabrani signal bude što verniji originalu u različitim tačkama u prostoru (a ne samo po osi zvučničkog sistema). To jednostavno nije moguće u potpunosti osvariti u praksi, tako da je izbor i realizacija optimalnih skretnica uvek, u izvesnoj meri pitanje kompromisa, kao što ćemo videti u narednim odeljcima.



Slika 8.5b – Načini realizacije audio skretnica niskog nivoa (aktivne)

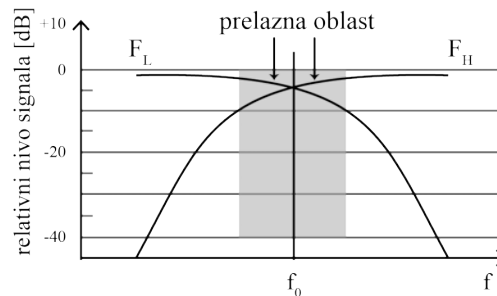
U upotrebi su dve osnovne verzije skretnica. Jedno su pasivne skretnice, napravljene sa L, C elementima, koje se, u audio lancu, nalaze između izlaza pojačavača snage i zvučnika, slika 8.5a. Ove skretnice se često nazivaju i skretnicama visokog nivoa pošto se koriste na izlazu pojačavača snage, gde audio signal ima najveći nivo u celom audio lancu. Drugo su aktivne skretnice koje, s obzirom na tehnologiju u kojoj su realizovane, mogu biti analogne ili digitalne. One se još nazivaju i elektronske skretnice ili skretnice niskog nivoa. Aktivne skretnice se u audio lancu nalaze ispred

pojačavača snage, tako da svaki zvučnik, u jednom zvučničkom sistemu, ima svoj pojačavač snage, slika 8.5b.

8.4 Dvopojasne skretnice

Dvopojasne skretnice predstavljaju najprostiju i najčešće primenjivanu familiju audio skretnica.

Dvopojasnu skretnicu čine filter propusnik niskih i filter propusnik visokih frekvencija. Njihove prenosne funkcije označavamo sa $F_L(s)$ i $F_H(s)$, respektivno. Amplitudske karakteristike ovih filtera se seku na frekvenciji f_0 , slika 8.6, koju nazivamo presečna frekvencija skretnice. Opseg frekvencija u okolini presečne frekvencije skretnice nazivamo prelazna oblast ili prelazna zona skretnice.



Slika 8.6 - Amplitudske karakteristike filtera u dvopojasnoj skretnici

Prenosna funkcija skretnice ili zbirna prenosna funkcija $F(s)$, je jednaka zbiru prenosnih funkcija filtera u njoj, tj.:

$$F(s) = F_L(s) + F_H(s) \quad (8.6)$$

Amplitudska i fazna karakteristika funkcije (8.6) su, respektivno:

$$F(\omega) = |F_L(j\omega) + F_H(j\omega)|, \quad (8.7)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}F(j\omega)}{\text{Re}F(j\omega)}, \quad (8.8)$$

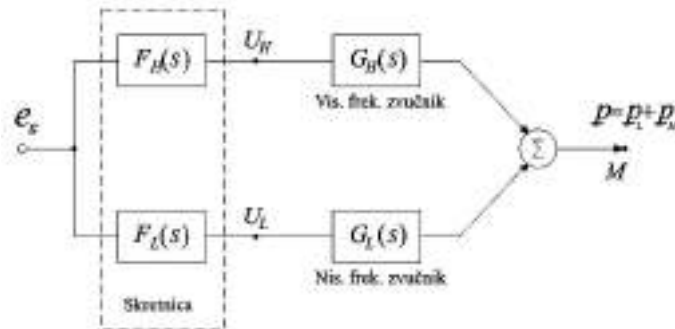
dok je ukupna prenesena snaga jednaka zbiru kvadrata amplituda prenosnih funkcija filtera u skretnici, odnosno:

$$P_e(\omega) = |F_L(j\omega)|^2 + |F_H(j\omega)|^2 \quad (8.9)$$

Osnovni kriterijumi koje treba da ispune kvalitetne audio skretnice često se definišu polazeći od rezultata poznatih iz teorije električnih filtera, a ne uzimajući u obzir prenosne funkcije pojedinih zvučnika i mehanizam superpozicije odvojenih akustičkih signala. Tako dobijeni rezultati ne

obezbeđuju optimalna rešenja, pa se mora uzeti u obzir i električni i akustički deo sistema, sa svim svojim specifičnostima.

Principska šema dvopojasnog zvučnog sistema koja uključuje i skretnicu i zvučnike prikazana je na slici 8.7. Napon generatora na ulazu u sistem označen je sa e_g . Skretnica se sastoji od filtra propusnika niskih i filtra propusnika visokih frekvencija čije su prenosne funkcije $F_L(s)$ i $F_H(s)$,



Slika 8.7 – Principska šema dvopojasnog zvučnog sistema

respektivno. Prenosne funkcije niskotonskog i visokotonskog zvučnika označene su sa $G_L(s)$ i $G_H(s)$, respektivno.

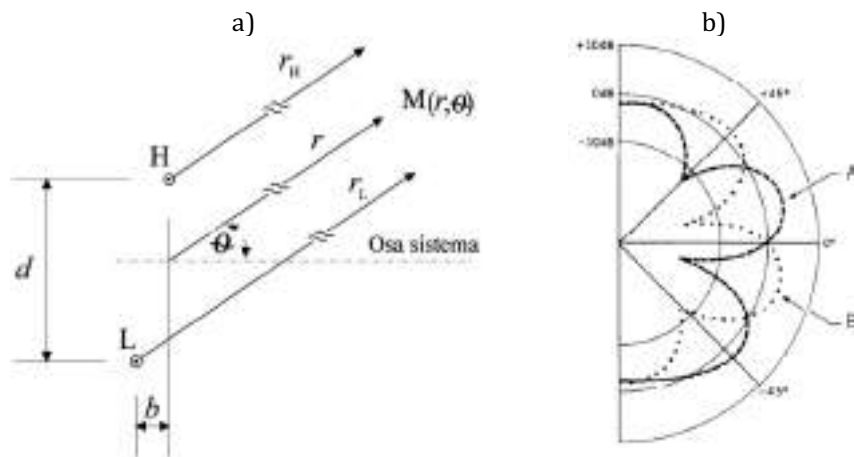
Ukupni zvučni pritisak u tački slušanja M jednak je zbiru pritisaka koje stvaraju oba zvučnika, tj.:

$$\underline{p} = \underline{p}_L + \underline{p}_H. \quad (8.10)$$

Za dalju analizu pretpostavićemo da se radi o zvučnicima koji su u prelaznoj oblasti skretnice neusmereni i čije su prenosne funkcije konstantne amplitude i linearne faze. Međutim, treba imati u vidu da su kod većine dvopojasnih zvučnih sistema zvučnici nekoincidentni, tj. da se njihovi akustički centri nalaze u međusobnom položaju kako je prikazano na slici 8.8a [10].

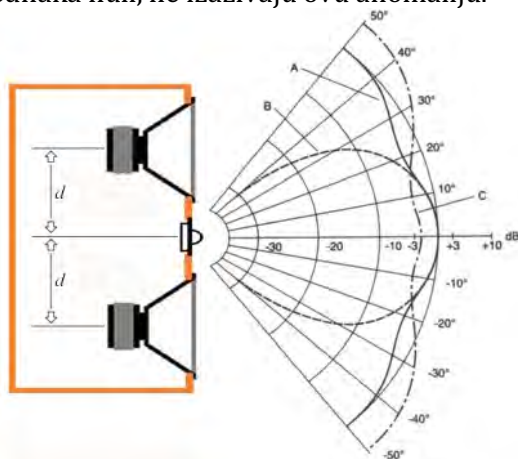
Rastojanje b predstavlja horizontalni, a rastojanje d vertikalni razmak zvučnika. Uticaj rastojanja b se u svakom konkretnom slučaju može lako eliminisati pravilnim postavljanjem akustičkih centara zvučnika u istu vertikalnu ravan. Ako je to iz nekih razloga onemogućeno, onda ostaje da se signal zvučnika, čiji je akustički centar isturen napred, elektronski zakasni. U svakom slučaju o ovom rastojanju u daljoj analizi nećemo voditi računa. Uticaj vertikalnog rastojanja d se ogleda u pojavi minimuma (tj. nula) u karakteristici zračenja u vertikalnoj ravni, slika 8.8b, zvučnog sistema na frekvencijama u okolini presečne frekvencije skretnice. Ovakva karaktersitika zračenja je rezultat interferencije zvučnih talasa koji dolaze iz dva nekoincidentna izvora. Što je rastojanje d veće, veći je broj nula i uža je

glavna petlja zračenja zvučnog sistema. Iz tog razloga ovo rastojanje treba da bude što je moguće manje.



Slika 8.8 - a) Geometrija dvopojasnog zvučnog sistema sa nekoincidentnim zvučnicima; L je niskotonski zvučnik, H visokotonski zvučnik, a M pozicija u kojoj se sluša, b) karakteristika usmerenosti ovakvog sistema u vertikalnoj ravni na frekvencijama u prelaznoj oblasti skretnice (A i B) [10]

Filtri u pojedinim tipovima skretnice dodatno izobličavaju karaktersitku zračenja, zakrećući njenu glavnu petlju naviše ili naniže u odnosu na pravac ose zvučnog sistema, slika 8.8b [10]. Samo one skretnice, kod kojih je fazna razlika između filtara na presečnoj frekvenciji jednaka nuli, ne izazivaju ovu anomaliju.



Slika 8.9 - Karakteristike zračenja vertikalno simetričnog dvopojasnog zvučnog sistema u vertikalnoj ravni, kada se koristi sa različitim tipovima skretnice (A; B i C). $(d=c/f_0)$ [26]

U praksi se mogu sresti tzv. „vertikalno simetrični“ dvopojasni zvučni sistemi, slika 8.9 [26], koji imaju dva niskotonska zvučnika postavljena simetrično u vertikalnoj ravni u odnosu na visokotonski zvučnik. Tačno je da je kod ovakvog sistema eliminisano zakretanje glavne petlje

zračenja u zoni presečne frekvencije skretnice, međutim, zbog interferencije niskotonskih zvučnika, slične anomalije se pojavljuju na drugim frekvencijama. Iz tog razloga se dovodi u pitanje opravdanost primene ovakvog sistema s obzirom da ima više elemenata i da je skuplji od odgovarajućeg sistema sa jednim basovnim zvučnikom.

8.4.1 Osnovni kriterijumi za ocenu kvaliteta dvopojasnih skretnica

Ovde treba ponoviti činjenicu, koju smo prethodno istakli, da je nemoguće, frekvencijski razdeljeni audio signal potpuno rekonstruisati sa dvopojasnim zvučničkim sistemom. Postoji mnogo oprečnih zahteva kojima treba udovoljiti, tako da je, uopšte uzev, nemoguće govoriti o idealnoj audio skretnici. Kao što ćemo dalje videti, to su uvek kompromisna rešenja koja, manje ili više, favorizuju određene karakteristike zvučnog sistema na račun zanemarivanja drugih.

Ipak među stručnjacima iz ove oblasti postoji konsenzus oko toga šta kvalitetne dvopojasne audio skretnice, minimalno, treba da ispunje. Poređano po prioritetnom redosledu važnosti, skretnice treba da imaju:

1. Ravnu amplitudsku karakteristiku zbirne prenosne funkcije za tačke na akustičkoj osi dvopojasnog sistema, zbog velike osetljivosti čovečjeg čula sluha na relativno male promene frekvencijske karakteristike;
2. Dovoljno oštar nagib pojedinih filtara u nepropusnim opsezima da bi se, pre svega, sprečilo pogoršanje karakteristika sistema usled uticaja loših karakteristika zvučnika izvan njihovog radnog opsega;
3. Prihvatljivu polarnu karakteristiku zbirne prenosne funkcije, uzimajući u obzir i fizičko rastojanje između zvučnika; po mogućnosti simetričnu glavnu petlju zračenja u odnosu na osu sistema.
4. Prihvatljivu faznu karakteristiku zbirne prenosne funkcije, po mogućnosti linearnu;
5. Ukupnu prenetu snagu konstantnu u funkciji frekvencije.

Svih pet prethodnih zahteva ne ispunjava ni jedna skretnica pošto se neki od njih prosto isključuju kada se radi o sistemima sa nekoincidentnim zvučnicima. Ako se akustički centri zvučnika poklapaju onda je moguće ispuniti dobar deo navedenih zahteva.

8.4.2 Najznačajniji tipovi dvopojasnih skretnica

Najznačajniji tipovi dvopojasnih skretnica su takozvane Batervortove (*Butterworth*) i Linkvic – Rajlijeve (*Linkwitz-Riley*)

skretnice [12]. Normalizovane prenosne funkcije njihovih filtara su date u tabeli 8.1.

Tabela 8.1 – Prenosne funkcije filtara u Batervortovim (B1, B2, B3 i B4) i Linkvic – Rajlijevim (LR2 i LR4) skretnicama; s_n je normalizovana kompleksna učestanost ($s_n = s/\omega_0$)

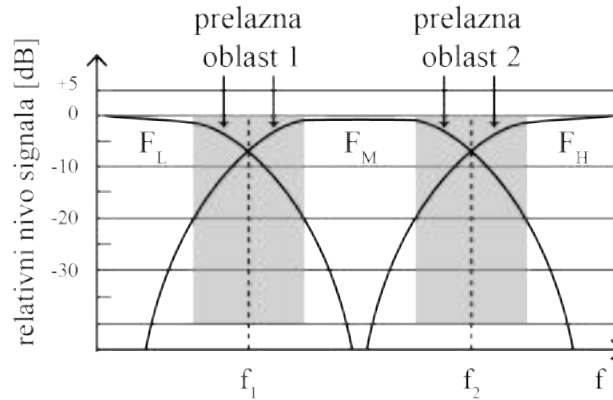
Tip i red skretnice, k	Filtar propusnik niskih frekvencija $F_L(s_n)$	Filtar propusnik visokih frekvencija $F_H(s_n)$
B 1	$\frac{1}{s_n + 1}$	$\frac{s_n}{s_n + 1}$
B 2	$\frac{1}{s_n^2 + \sqrt{2}s_n + 1}$	$\frac{s_n^2}{s_n^2 + \sqrt{2}s_n + 1}$
B 3	$\frac{1}{s_n^3 + 2s_n^2 + 2s_n + 1}$	$\frac{s_n^3}{s_n^3 + 2s_n^2 + 2s_n + 1}$
B 4	$\frac{1}{s_n^4 + 2,61s_n^3 + 3,41s_n^2 + 2,61s_n + 1}$	$\frac{s_n^4}{s_n^4 + 2,61s_n^3 + 3,41s_n^2 + 2,61s_n + 1}$
LR 2	$\frac{1}{s_n^2 + 2s_n + 1}$	$\frac{-s_n^2}{s_n^2 + 2s_n + 1}$
LR 4	$\frac{1}{s_n^4 + 2\sqrt{2}s_n^3 + 4s_n^2 + 2\sqrt{2}s_n + 1}$	$\frac{s_n^4}{s_n^4 + 2\sqrt{2}s_n^3 + 4s_n^2 + 2\sqrt{2}s_n + 1}$

Batervortove skretnice se još nazivaju i skretnice konstantne snage ili skretnice konstantne otpornosti. Prenesena snaga im je konstantna, kako im i ime kaže, dok je kod skretnica neparnog reda iz ove familije (označene sa B1 i B3 u tabeli 8.1) konstantna i amplituda. Nedostatak ovih skretnica je što utiču na zakretanje glavne petlje zračenja zvučnickog sistema sa nekoincidentnim zvučnicima.

Linkvic – Rajlijeve skretnice (označene sa LR2 i LR4 u tabeli 8.1) imaju, na presečnoj frekvenciji, faznu razliku između filtara u skretnici jednaku nuli i slabljenje filtara 6 dB. Ovo je uslov da dvopojasni zvučnički sistem, šematski prikazan na slici 8.7, ima pravilnu karakteristiku zračenja u vertikalnoj ravni sa maksimumom usmerenim u pravcu ose sistema. Takođe treba naglasiti da je amplituda prenosne funkcije skretnice konstantna, i to u slučaju skretnice drugog reda kada se izlazi filtara sabiraju u protivfazi a kod skretnice četvrtog reda kada se izlazi filtara sabiraju u fazi. Prenesena snaga kod ovih skretnica nije konstantna što je nedostatak od manjeg značaja.

8.5 Tropojasne skretnice

Tropojasna skretnica se sastoji od filtra propusnika niskih frekvencija, filtra propusnika opsega frekvencija i filtra propusnika visokih frekvencija čije ćemo prenosne funkcije označiti sa $F_L(s)$, $F_M(s)$ i $F_H(s)$, respektivno. Kod ove skretnice imamo dve presečne frekvencije f_1 i f_2 , gde ćemo uzeti da je $f_1 < f_2$, slika 8.10.



Slika 8.10 - Amplitudske karakteristike filtara u tropojasnoj skretnici

Tropojasne skretnice se najčešće sastoje od redne veze dvopojasnih skretnica ili od paralelne kombinacije tri filtra; propusnika niskih, propusnika srednjih i propusnika visokih frekvencija [17], [18].

Slično kao i kod dvopojasnih skretnica, i kod tropojasnih se definiše ukupna prenosna funkcija, odnosno prenosna funkcija skretnice $F(s)$, koja je jednaka zbiru prenosnih funkcija filtara u njoj, tj.:

$$F(s) = F_L(s) + F_M(s) + F_H(s). \quad (8.11)$$

Amplitudska i fazna karakteristika funkcije (8.11) su, respektivno:

$$F(\omega) = |F_L(j\omega) + F_M(j\omega) + F_H(j\omega)|. \quad (8.12)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}F(j\omega)}{\text{Re}F(j\omega)} \quad (8.13)$$

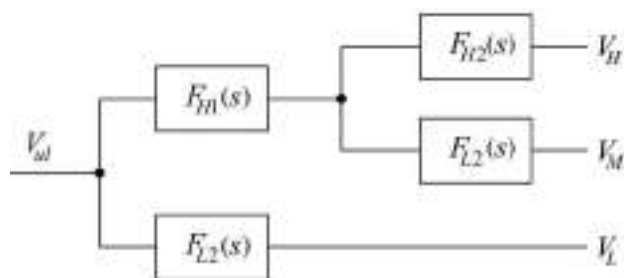
Ukupna prenesena snaga je ovde jednaka zbiru kvadrata amplituda prenosnih funkcija filtara u skretnici, odnosno:

$$P_e(\omega) = |F_L(j\omega)|^2 + |F_M(j\omega)|^2 + |F_H(j\omega)|^2 \quad (8.14)$$

8.5.1 Tropojasna skretnica kao redna veza dve dvopojasne skretnice

Tropojasna skretnica kao redna veza dve dvopojasne skretnice formira se tako što se na izlaz filtra propusnika visokih frekvencija prve skretnice priključi ulaz druge skretnice, slika 8.11.

Presečna frekvencija prve dvopojasne skretnice f_1 je normalno niža od presečne frekvencije f_2 druge dvopojasne skretnice. Kao dvopojasne skretnice u blok šemi na slici 8.11 mogu se koristiti bilo koje skretnice prikazane u odeljku 8.4. One čak ne moraju uvek biti istog tipa i istog reda.



Slika 8.11 – Tropojasna skretnica kao redna veza dve dvopojasne skretnice

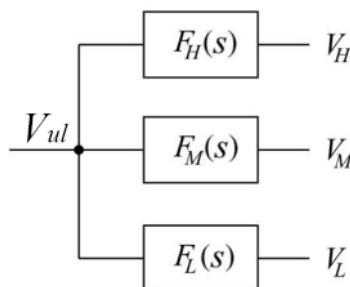
Nedostatak ovakve topologije je što ne postoje skretnice kod kojih je konstantna amplituda i prenesena snaga. Ni dve dvopojasne skretnice konstantne amplitude u ovakvoj vezi nemaju konstantnu ukupnu amplitudu.

Varijacije amplitudske karakteristike i karakteristike snage su u praksi posebno izražene ako se skretnice realizuju pasivnim LC mrežama jer su, u tom slučaju, retko kada obezbeđeni uslovi konstantne i čisto otporne impedanse opterećenja.

8.5.2 Tropojasna skretnica kao paralelna veza filtara

U paralelnoj izvedbi, tropojasna skretnica se formira paralelnom vezom filtara propusnika niskih, propusnika visokih i propusnika opsega frekvencija, kako je prikazano na slici 8.12. Pri realizaciji filtara polazi se od normalizovanog filtra propusnika niskih frekvencija. Stepenom polinoma u imeniocu ovog filtra definisan je stepen skretnice. Prenosna funkcija filtra propusnika visokih frekvencija dobija se transformacijom frekvencije kako je napomenuto u odeljku 8.1.2.

Filtar propusnik opsega frekvencija realizuje se na dva načina. Jedan način je iz prenosne funkcije filtra niskih frekvencija, transformacijom kompleksne učestanosti, slično kao i filter propusnik visokih frekvencija. Ovakva skretnica ima tu osobinu da su filter propusnik opsega frekvencija i filter propusnik visokih frekvencija potpuno definisani, ako je poznat filter propusnik niskih frekvencija.



Slika 8.12 – Tropojasna skretnica kao paralelna veza filtara

Drugi način za realizaciju filtra propusnika opsega frekvencija je da se redno vežu filter propusnik visokih frekvencija (presečna frekvencija f_1) i filter propusnik niskih frekvencija (presečna frekvencija f_2).

Zbog kaskadne veze filtara u poslednjem slučaju, za praktičnu realizaciju je pogodnije koristiti aktivne mreže, mada je njihova realizacija moguća i pasivnim mrežama. Ni ova topologija ne obezbeđuje konstantnu amplitudu prenosne funkcije skretnice.

Složenijim postupcima realizacije moguće je dobiti tropojasne skretnice konstantne amplitude. Zbog složenosti i obimnosti postupaka realizacije o njima dalje ovde neće biti govora.

8.6 Praktična realizacija zvučnih skretnica

Skretnice je moguće realizovati sa pasivnim ili aktivnim komponentama. Aktivna realizacija podrazumeva kompleksniji audio sistem, gde pored skretnice mora postojati određeni broj pojačavača snage i više kablova za međusobnu vezu skretnica, pojačavača snage i zvučnika, što neminovno dovodi do veće cene celog sistema. Sistemi sa aktivnim skretnicama imaju takođe, povećanu potrošnju električne energije zbog napajanja većeg broja pojačavača snage i potrošnje same skretnice.

Međutim, u aktivnoj varijanti moguće je realizovati veoma kompleksne skretnice bez značajnog povećanja broja komponentata i cene, što nije slučaj ako se radi o pasivnim mrežama. U sklopu aktivnih skretnica, bez mnogo komplikacija, moguće je implementirati složene korektore frekvencijskih karaktersitka zvučnika bez bojazni da će vrednost impedanse opterećenja pojačavača snage preći očekivane limite, što je slučaj ako bi se ista funkcija realizovala pasivnim komponentama. U aktivnim skretnicama snaga gubitaka je mala u poređenju sa istom kod pasivnih skretnica, gde se usled zagrevanja komponenti menjaju njihovi parametri pa i parametri same skretnice. Kod pasivnih skretnica su potrebne dodatne komponente za kompenzaciju promena impedanse zvučnika sa frekvecijom. U profesionalnim sistemima velike snage, gde su naponi i struje velikih vrednosti, veličina i cena pasivnih komponenti može biti neprihvatljiva.

Takođe, snaga disipacije na ovim komponentama je tada velika a njihova povećana redna otpornost može značajno doprineti degradaciji faktora prigušenja pojačavača snage. Ovi problemi postaju još izraženiji kada su u pitanju skretnice višeg reda.

U sklopu aktivnih skretnica je relativno lako realizovati kašnjenje signala, i izjednačiti razlike u efikasnosti zvučnika, što bi bilo jako komplikovano u slučaju pasivnih skretnica. Savremene aktivne komponente omogućavaju izradu aktivnih skretnica skoro bez ikakvih izobličenja signala, dok kalemovi sa jezgrom i nepolarizovani elektrolitički kondenzatori u pasivnim skretnicama mogu biti izvori jako velikih izobličenja. Elektronske komponente u aktivnim skretnicama su stabilnije i manje podložne promenama tokom vremena nego one kod pasivnih.

Sve ove prednosti i nedostatke jednog i drugog tipa zvučničkih skretnica, moraju imati u vidu proizvođači zvučničkih sistema, u svakom konkretnom slučaju, kada opredeljuju namenu, nivo kvaliteta i cenu svojih proizvoda.

8.6.1 Realizacija dvopojasnih pasivnih skretnica

Tabela 8.2 - Normalizovane vrednosti komponenti ($R = 1, \omega_0 = 1$) za Batervortove (B1, B2, B3 i B4) i Linkvic – Rajlijeve (LR2 i LR4) filtre propusnike niskih frekvencija

Tip i red filtra	g_1	g_2	g_3	g_4
B 1	1			
B 2	1,414	0,707		
B 3	1,500	1,333	0,400	
B 4	1,531	1,577	1,082	0,383
LR 2	2,000	0,500		
LR 4	1,886	1,591	0,943	0,354

Ovde ćemo se kratko zadržati na realizaciji dvopojasnih skretnica navedenih u odeljku 8.3, samo pomoću pasivnih elektronskih kola. Za ovu namenu se koriste lestvičaste mreže, kako je prikazano na slici 8.13. Normalizovane vrednosti komponenti za filtre propusnike niskih frekvencija date su u tabeli 8.2. Normalizacija je izvedena na presečnu učestanost $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1$ rad/s i otpornost opterećenja $R = 1 \Omega$. Stvarne vrednosti komponenti dobijaju se denormalizacijom i to:

$$L_L = g R / 2 \pi f_0 , \quad (8.15)$$

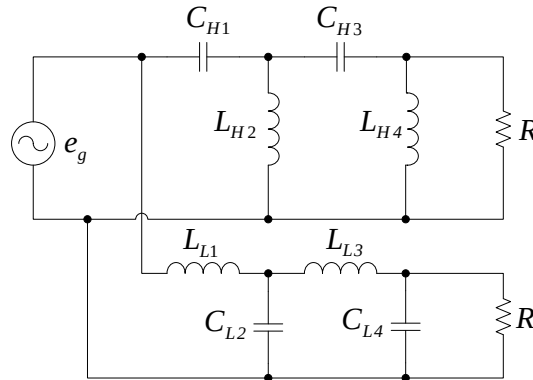
$$C_L = g / 2 \pi f_0 , \quad (8.16)$$

za filter propusnik niskih, i:

$$L_H = R/2 \pi f_0 g, \quad (8.17)$$

$$C_H = 1/2 \pi f_0 g, \quad (8.18)$$

za filter propusnik visokih frekvencija.



Slika 8.13 - Električna šema dvopojasne zvučničke skretnice realizovane pasivnim lestvičastim mrežama

Broj elemenata u svakom filteru skretnice odgovara redu skretnice. Tako skretnica prvog reda ima po jedan element u svakom filteru (C_{H1} i L_{L1}), dok recimo, skretnica trećeg reda ima po tri elementa u svakom filteru (C_{H1} , L_{H2} , C_{H3} i L_{L1} , C_{L2} , L_{L3}). Brojni indeksi elemenata u filteru odgovaraju indeksima normalizovanih vrednosti komponenti datih u tabeli 8.2. Tako komponentama C_{H1} i L_{L1} odgovara normalizovana vrednost g_1 , komponentama L_{H2} i C_{L2} odgovara normalizovana vrednost g_2 itd. Oznaka L u indeksu se odnosi na filter propusnik niskih, a oznaka H na filter propusnik visokih frekvencija.

8.6.2 Kompenzacija opterećenja pasivnih skretnica

Elementi pasivnih audio skretnica proračunavaju se pod pretpostavkom da će opterećenje skretnice biti konstantna termogena otpornost. Teorijski oblici prenosnih funkcija filtera u skretnici takođe se odnose na isti slučaj. Međutim, u realnim uslovima filteri u skretnici su opterećeni zvučnicima. Kao što znamo zvučnik nije ni konstantno ni čisto termogeno opterećenje.

Impedansa opterećenja filtera u pasivnim skretnicama

Tipičan oblik modula električne impedanse elektrodinamičkog zvučnika (u vazduhu ili ugrađenog u zatvorenu kutiju) prikazan je na slici 7.1. Impedansa zvučnika je približno konstantna samo u uskom frekvencijskom području iznad frekvencije rezonance f_s . Minimalna

vrednost impedanse, u ovom opsegu, nešto je veća od otpornosti zvučnika za jednosmernu struju R_e . Nominalna, ili nazivna impedansa zvučnika, koju proizvođači daju kao jednu od njegovih osnovnih karakteristika, nema direktnu vezu ni sa jednom karakterističnom vrednošću (minimalna, maksimalna i sl.) impedanse. Ona je prosto, zavisno od slučaja do slučaja za 10% do 20% veća od minimalne vrednosti impedanse u frekvencijskom opsegu rada zvučnika. U proračunu elemenata pasivne skretnice ova vrednost impedanse uzima se kao vrednost termogenog opterećenja filtera u skretnici.

Iz svega prethodnog treba očekivati da će se ponašanje pasivne skretnice, opterećene zvučnicima, znatno razlikovati od onog koje se teorijski predviđa i koje bi se javilo pri konstantnom termogenom opterećenju, za koje su filteri u skretnici projektovani. Ulazna impedansa skretnice biće pretežno reaktivna, a njen modul će pokazivati značajne varijacije, što može prouzrokovati velike probleme u pojačavaču snage. Prenosne funkcije filtera u skretnici znatno će odstupati od očekivanih oblika, naročito ako se rezonansa zvučnika, ili frekvencijsko područje jako izražene induktivnosti kalema, nađu u prelaznoj oblasti skretnice.

Kompenzaciona mreža

Ovi nedostaci pasivnih skretnica mogu se znatno ublažiti pravilnom kompenzacijom opterećenja filtera u skretnici. Kompenzacija se izvodi pasivnom mrežom vezanom paralelno priključcima zvučnika. Impedansa ove mreže, slika 8.14, označena je sa Z , dok je zvučnik predstavljen njegovom ekvivalentnom električnom šemom gde su:

R_e - otpornost kalema zvučnika za jednosmernu struju,

L_e - induktivnost kalema zvučnika,

C_{mes} - električni ekvivalent mase kretnog sistema zvučnika ($= M_{as} S_d^2 / B^2 l^2$),

L_{ces} - električni ekvivalent elastičnosti vešanja kretnog sistema zvučnika ($= B^2 l^2 C_{ms}$),

R_{es} - električni ekvivalent mehaničke otpornosti vešanja zvučnika ($B^2 l^2 / R_{ms}$),

L_{ceb} - električni ekvivalent akustične kapacitivnosti kutije ($= C_{ab} B^2 l^2 / S_d^2$),

R_{el} - električni ekvivalent otpornosti curenja kutije ($= B^2 l^2 / R_{al} S_d^2$),

C_{mep} - električni ekvivalent mase vazduha u bas-refleks kanalu ili mase pasivnog radiatora ($= M_{ap} S_d^2 / B^2 l^2$).

Impedansu Z sa slike 8.14 odredićemo pod uslovom da ulazna impedansa između krajeva 1-1', Z_{ul} , bude jednaka otpornosti kalema zvučnika R_e . Uz ovaj uslov dobija se da impedansa Z ima oblik kao na slici 8.15. Vrednosti pojedinih elemenata u kompenzacionoj mreži Z su:

$$C_e = L_e / R_e^2 \quad (8.19)$$

$$C_m = L_{ces} / R_e^2 = 1 / (R_e Q_{es} \omega_s) \quad (8.20)$$

$$L_m = R_e^2 C_{mes} = (R_e Q_{es}) / \omega_s \quad (8.21)$$

$$R_m = R_e^2 / R_{es} = (R_e Q_{es}) / Q_{ms} \quad (8.22)$$

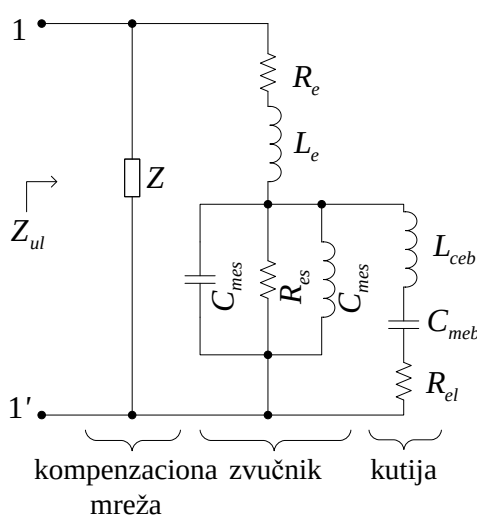
$$L_a = (\alpha Q_{es} R_e) / (h^2 \omega_s) \quad (8.23)$$

$$C_a = 1 / (\alpha R_e Q_{es} \omega_s) \quad (8.24)$$

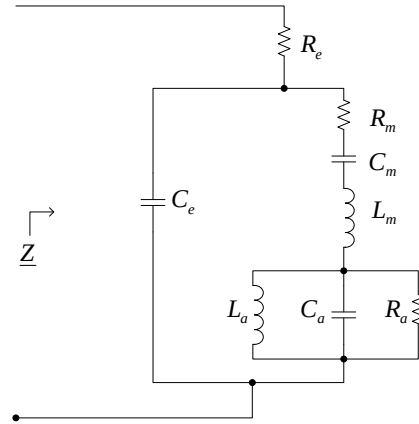
$$R_a = (\alpha R_e Q_{es} Q_l) / h \quad (8.25)$$

gde su sve veličine na desnoj strani jednačina (8.19) do (8.25) definisane u odeljku 7.4.

Komponente iz kompenzacione mreže sa indeksom m odgovaraju mehaničkim parametrima zvučnika, a komponente sa indeksom a akustičkim parametrima kutije.



Slika 8.14 – Ekvivalentno električno kolo elektro-dinamičkog zvučnika u bas-refleks kutiji sa kompenzacionom mrežom Z na njegovim priključcima



Slika 8.15 – Izgled kompenzacione mreže Z

Kompenzaciona mreža na slici 8.15 odgovara bas refleks zvučničkom sistemu. Ako se radi o sistemu sa zatvorenom kutijom tada

treba izostaviti L_a i R_a , a kapacitivnosti C_m i C_a zameniti jednom kapacitivnošću koja je jednaka njihovoj rednoj vezi, tj. $C = C_a C_m / (C_a + C_m)$. Ukoliko ne postoji kutija, kakav je slučaj kod visokotonskih zvučnika, onda treba kratko spojiti C_a .

Kompenzaciona mreža Z retko se kada koristi kompletna, kako je prikazana na slici 8.15. Naime, uticaj induktivnosti kalema, mehaničke impedanse zvučnika i akustičkih parametara kutije dovoljno je kompenzovati samo u prelaznoj oblasti skretnice u okolini presečne frekvencije. U propusnom opsegu bilo kog filtra u skretnici njegova prenosna funkcija je veoma malo osetljiva na varijacije opterećenja.

Ne treba zaboraviti da se vrednosti elemenata skretnice u svim slučajevima kompenzacije moraju proračunati za vrednost opterećenja jednaku otpornosti kalema zvučnika za jednosmernu struju R_e .

8.6.3 Realizacija aktivnih skretnica

Aktivne skretnice je moguće realizovati u analognom ili digitalnom obliku. Bez obzira o kojem obliku realizacije se radi on podrazumeva dosta složena elektronika kola i postupke, što izlazi iz okvira ove knjige. Zbog toga ćemo u vezi sa ovom temom, dalje napomenuti samo nekoliko osnovnih činjenica.

Aktivne analogne skretnice se realizuju sa operacionim pojačavačima i pasivnim R, C komponentama. Digitalne skretnice mogu biti realizovane softverski sa digitalnim procesorima signala ili hardverski sa prostijim digitalnim kolima. Ne postoje nikakve suštinske razlike u načinu delovanja skretnica na audio signal bez obzira da li su realizovane u analognoj ili digitalnoj tehnologiji. Naravno, digitalna verzija je superiornija kada se radi o tačnosti karakteristika realizovanih filtara i kada se radi o stepenu odstupanja njihovih karakteristika od proizvoda do proizvoda, pošto ovde nema uticaja tolerancija vrednosti komponenata koja se manifestuje u analognim rešenjima.

Češće se za realizaciju digitalnih audio skretnica koriste IIR (filtri beskonačnog impulsnog odziva) nego FIR (filtri ograničenog impulsnog odziva) filtri, jer se u prvom slučaju troši manje resursa digitalnih procesora signala i ovim filtrima se skoro savršeno mogu klonirati karakteristike analognih filtara, koje tada nazivamo originalima.

8.7 Pitanja za proveru znanja

1. Šta je propusni opseg filtra?
2. Šta je nepropusni opseg filtra?
3. Šta je granična frekvencija filtra?

4. Skicirati amplitudsku karakteristiku filtra i na njoj označiti njegove karakteristične frekvencijske opsege (propusni, nepropusni, prelaznu oblast).
5. Skicirati amplitudske karakteristike filtera propusnika niskih, propusnika visokih i propusnika opsega frekvencija.
6. Šta je zvučnička skretnica?
7. Kako se mogu podeliti zvučničke skretnice? Skicirati osnovne celine dvopojasnog zvučničkog sistema sa pasivnom skretnicom.
8. Skicirati osnovne celine tropojasnog zvučničkog sistema sa aktivnom skretnicom.
9. Skicirati osnovne celine tropojasne skretnice sa paralelnim filterima.
10. Kako izgleda tropojasna skretnica sa rednom vezom dve dvopojasne skretnice?
11. Nacrtati električnu šemu pasivne dvopojasne skretnice drugog reda.

8.8 Literatura

- [1] J.K. Hilliard and H.R. Kimball, „Dividing Networks for Loud Speaker Systems“, *Journal of the Society of Motion Picture Engineers*, Vol. 27, no. 1, July 1936, Reprinted *JAES* Vol 26, no. 11, 1978.
- [2] N. H. Crowhurst, »The Basic Design of Constant Resistance Crossovers«, *Audio*, vol.37, October 1953.
- [3] L.Storch, "Synthesis of Constant-Time-Delay Ladder Networks Using Bessel Polynomials", *Proc.of the IRE*, vol. 42, no. 11, pp. 1666-1675, November 1954.
- [4] R.P. Sallen and E.L. Key, "A Practical Method of Designing RC Active Filters", *IRE Trans. on Circuit Theory*, CT-2, pp.74-85, March 1955.
- [5] J.R. Ashly, "On the Transient Response of Ideal Crossover Networks", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 10, no. 3, pp. 241-244, 1962.
- [6] R. H. Small, »Constant-voltage Crossover Network Design«, *J.Audio Eng. Soc.*, 19:1, p.12, 1971.
- [7] J.R. Ashley and L.M. Henne, "Operational Amplifier Implementation of Ideal Electronic Crossover Networks", *J.Audio Eng. Soc.*, vol. 19, no.1, pp.7-11, 1971.
- [8] G.L. Augspurger, "Electrical Versus Acoustical Parameters in the Design of Loudspeaker Crossover Networks", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 19, no. 6, p.509, 1971.
- [9] R.H. Frater, "A New Look at Crossover Networks", presented at the International Symposium on Loudspeakers, Sydney, August 1975.
- [10] S.H. Linkwitz, »Active Crossover Networks for Noncoincident Drivers« *J.Audio Eng.Soc.*, vol.24, ~1, 2-8, 1976.
- [11] A.B. Williams, *Electronic Filter Design Handbook*, Mc-Graw Hill, 1981.

- [12] Robert M. Bullock, "Loudspeaker-Crossover Systems: An Optimal Crossover Choice", *J.Audio Eng.Soc.*, vol. 30, no. 7/8, pp. 486-495, 1982.
- [13] B. Raković, *Elektronika-linearna integrisana kola*, Građevinska knjiga, Beograd, 1983.
- [14] S.P. Lipshitz and J. Vanderkooy, »A Family of Linear-Phase Crossover Networks of High-Slope Derived by Time Delay«, *J.Audlo End.Soc.*, vol. 31, pp 2-30, January/February 1983.
- [15] S.P. Lipshitz and J. Vanderkooy, »In-Phase Crossover Network Design« *A.E.S. 74th Convention*, Preprint No. 2051, 1983.
- [16] R.M. Bullock, "Satisfying Loudspeaker Crossover Constraints with Conventional Networks - Old and New Desings", *J.Audio Eng.Soc.*, vol. 31, no. 7, pp.489-499, 1983.
- [17] R.M. Bullock III, "The Analysis and Synthesis of Passive Constant Power and All-Pass Three Way Crossovers", *74-th AES Conv.*, Preprint No.1995, October 1983. M. Allie and R.A. Greiner, "Synthesised Three-Way Loudspeaker Crossovers", *74-th AES Conv.*, Preprinr No.2007, October 1983.
- [18] R.M. Bullock III, "Passive Three-Way All-Pass Crossover Networks", *J. Audio Eng. Soc.*, pp 626-639, vol. 32, September 1984.
- [19] J.A. D'Appolito, "Active Realization of Multiway All-Pass Crossover Systems", *74-th AES Conv.*, Preprint No. 2125, October 1984.
- [20] S.K. Mitra, A.J. Damonte, N.Fujii and Y.Neuvo, »Tunable Active Crossover Networks«, *J.Audio Eng.Soc.*, vol.31, pp 762-769, October, 1985.
- [21] J. Vanderkooy and S.P. Lipshitz, "Power Response of Loudspeakers with Noncoincident Drivers – The Influence of Crossover" *J.Audio Eng.Soc.*, vol.34, no. 4, pp.236-244, April, 1986.
- [22] P.A. Regalia, N. Fujii, S.K. Mitra and Y. Neuvo, »Active RC Crossover Networks with Adjustable Characteristics«, *J.Audio Eng.Soc.*, vol.35, pp 24-30, Jan/Feb., 1987.
- [23] D.B Wims, *Designing, Building, and Testing Your Own Speaker System*, 4-th ed., McGraw Hill, 1997.
- [24] P. Pravica, D. Drinčić, *Elektroakustika*, Visoka škola elektrotehnike i računarstva, Beograd 2008.
- [25] D. Self, *The design of active crossovers*, Focal Press, 2011.
- [26] Speaker lobing calculator – Polar response, Audio judgement, May 2017, <http://audiojudgement.com/speaker-lobing-polar-response/>, preuzeto: septembar 2017.

Slušalice

9.1 Uvod

Kako tržište mobilnih uređaja za reprodukciju muzike raste, sve više ljudi sluša muziku sa slušalicama. Stoga slušalice postaju jedan od važnih i skoro nezaobilaznih audio uređaja u životu savremenog čoveka. Pored svoje osnovne primene u reprodukciji muzike, slušalice se koriste i u komunikacijama i audiometriji.



Slika 9.1 - Slušalice sa naznačenim glavnim delovima

Slušalice se sastoje iz dva, međusobno povezana, identična sklopa od kojih je svaki predviđen za postavljanje na po jedno uvo. Glavni delovi svakog od ovih sklopova su elektroakustički pretvarač ili slušni uložak (slušalica u užem smislu reči) i nosač slušnog uloška ili školjka, slika 9.1. Školjke sa slušnim ulošcima, kod većine slušalica, su međusobno mehanički povezane nekom vrstom podesivog elastičnog nosača koji služi za udobnije nošenje slušalica na glavi i njihovo nameštanje na uši. Pored toga ovaj nosač priteže školjke odgovarajućom silom uz glavu korisnika, čime se omogućava pravilno pozicioniranje slušnog uloška u odnosu na slušni kanal korisnika, kao i zaptivanje prostora između uva i školjke slušalica. Ovo zaptivanje ili pravilno naleganje slušalica na uši korisnika je neophodno za njihov ispravan rad.

U prvom delu ove glave izloženi su osnovni pojmovi o slušalicama, definisane njihove karakteristike, razjašnjeni principi njihove podele i ukratko opisane osnovne vrste slušalica. Zatim je definisan frekvencijski odziv slušalica i objašnjen način njegovog merenja i prikazivanja (koji se razlikuje od onog kod zvučnika).

U drugom delu poglavlja detaljnije su opisane elektrodinamičke,

elektrostatičke, planarne magnetne, elektromagnetne i piezoelektrične slušalice. Na kraju poglavlja razmotreni su načini redukcije buke pomoću slušalica, koji se danas koriste u praksi.

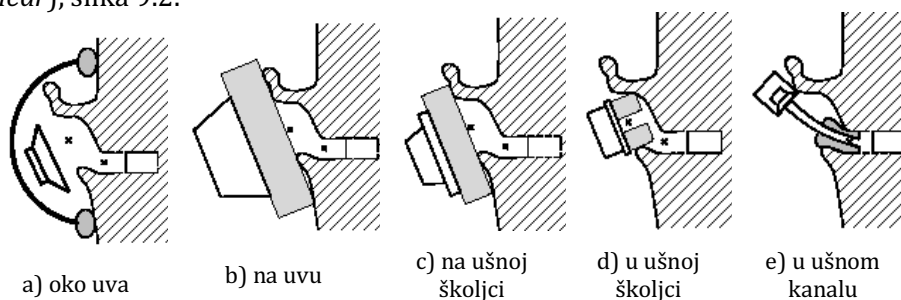
9.2 Osnovne karakteristike slušalica

Osnovne karakteristike slušalica, kao i kod zvučnika, su: faktor pretvaranja, frekventijska karakteristika, izobličenja, efikasnost i stepen iskorišćenja, definisane u odeljku 7.1.2. Za razliku od zvučnika koji stvara zvučni pritisak u prostoru koji ga okružuje, slušalica stvara pritisak u maloj komori između svoje membrane i bubne opne čovečjeg uva. Zato slušalica može da ima relativno malu membranu a da pritisak koji stvara u komori dostigne nivo i preko 120 dB. Frekventijska karakteristika kvalitetnih slušalica, pri dobrom naleganju, pokriva ceo opseg audio frekvencija, dok su ukupna harmonijska izobličenja znatno manja od 1 %. Efikasnost slušalica je reda (90-100) dB pri ulaznoj električnoj snazi od 1 mW. Maksimalna ulazna snaga slušalice iznosi nekoliko stotina mW.

9.3 Vrste slušalica

Postoji više različitih vrsta slušalica prema tipu pretvarača (slušnih uložaka) koji se u njima koriste, a ovde ćemo se nešto detaljnije upoznati sa elektrodinamičkim, elektrostatičkim, planarnim, elektromagnetnim, i piezoelektričnim.

Pored toga, slušalice se dele i prema obliku školjke ili nosača slušnih uložaka odnosno obliku i veličini jastučića kojima naležu na glavu korisnika. Tako, prema preporuci međunarodnog udruženja za telekomunikacije [19], s obzirom na oblik nosača slušnih uložaka, razlikujemo pet vrsta slušalica. To su okoušne (*Circumaural*) naušne (*Supra - aural*), za nošenje na ušnoj školci (*Supra-concha*), za nošenje u ušnoj školjci (*Intra-concha*) i u ušne ili kanalne (*Inear*), slika 9.2.



Slika 9.2 - Vrste slušalica prema obliku nosača slušnih uložaka [19]

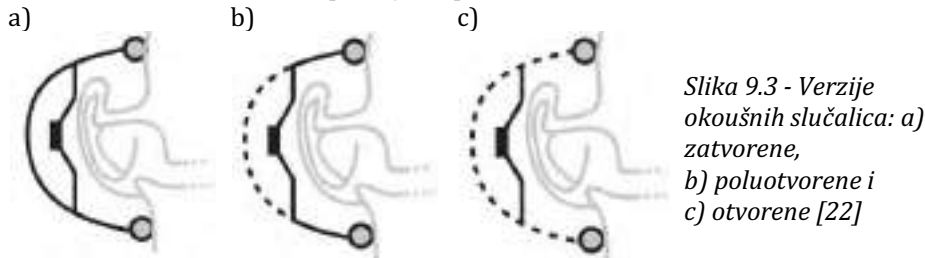
Okoušne (*Circumaural*) slušalice, slika 9.2a, imaju kružne ili eliptične jastučice koji obuhvataju uvo. Okoušne slušalice imaju dobru reprodukciju niskih frekvencija. Ovaj tip slušalica se najčešće koristi kod snimanja i slušanja muzike.

Naušne (*Supra-aural*) slušalice, slika 9.2b, imaju jastučice koji ne obuhvataju uvo već stoje na ušima. Imaju nešto lošiju reprodukciju niskih frekvencija nego okoušne slušalice ali je njihova glavna prednost relativno mala masa. Najviše su se koristile tokom osamdesetih godina prošlog veka uz personalne stereo uređaje. Spoljašnji prečnik jastučića kod ovih slušalica je bar 45 mm.

Slušalice za nošenje na ušnoj školjci (*Intra-concha*), slika 9.2c, su slušalice manje veličine koje se postavljaju direktno na ivice ušne školjke. Spoljašnji prečnik jastučića kod ovih slušalica je između 25 i 45 mm. Ovo su jeftine, praktične, slušalice koje se koriste uz personalne muzičke uređaje.

Slušalice za nošenje u ušnoj školjci (*Supra-concha*), slika 9.2d, su još manje veličine od prethodnih i nose se u udubljenju (šupljini) ušne školjke, ali ne ulaze u ušni kanal. Spoljašnji prečnik jastučića kod ovih slušalica je manji od 25 mm.

Kanalne ili uušne slušalice (*Canalphones, in-ear monitors, or IEMs*), slika 9.2e, su slušalice koje se postavljaju direktno u ušni kanal. Praktične su za nošenje, a ujedno deluju i kao zaštitnici od buke. Postoje dva tipa ovih slušalica – univerzalne i napravljene po narudžbini.



Sve slušalice sem verzije na slici 9.2c (na ušnoj školjci – *intra-concha*), mogu biti zatvorene, kada akustička energija ne curi u okolni prostor, ili otvorene, kada skustička energija delom curi u okolni prostor. U verziji okoušnih slušalica (slika 9.2a), pored ove dve vrste pominju se i poluotvorene.

Zatvorene slušalice (*Closed type headphones*) imaju potpuno zatvorene školjke i jastučice od zvučno nepropustljivog materijala, slika 9.3a. Nasuprot njima, otvorene slušalice (*open air headphones*) imaju porozne školjke i/ili su im jastučići izrađeni od zvučno propustljivog materijala, slika 9.3c.

Poluotvorene slušalice su neka vrsta kompromisa između zatvorenih i otvorenih slušalica, slika 9.3b. Konstrukcija školjki kod ovih slušalica je takva da zvuk delimično prolazi kroz njih u oba smera, ali ne bez

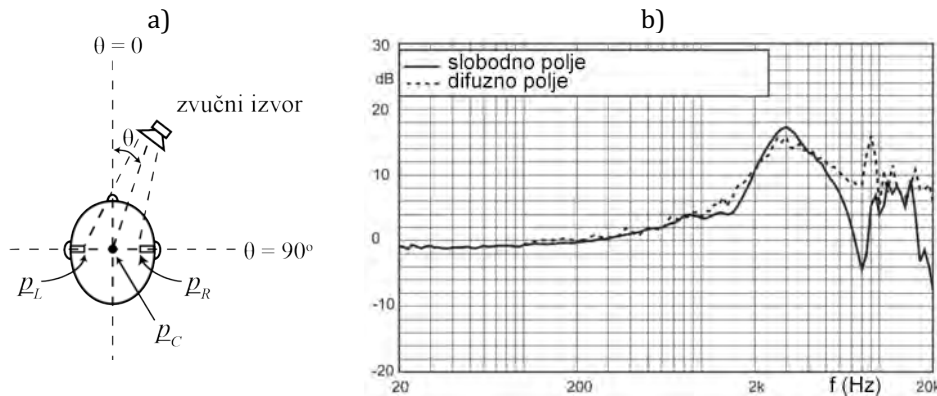
prepreka već kroz specifične kanale i otvore.

Otvorene slušalice ne obezbeđuju izolaciju korisnika od spoljašnjih zvukova, a ujedno zvuk slušalica mogu da čuju i drugi koji se nalaze u njegovoj neposrednoj blizini. Smatra se da ove slušalice imaju prirodniji zvuk od zatvorenih, odnosno zvuk sličan onom kada se sluša preko zvučnika, i kada su u ukupnu zvučnu sliku uključeni i zvuci iz okruženja.

Zatvorene slušalice imaju bolju reprodukciju niskih frekvencija od otvorenih, o čemu će kasnije biti više reči. Međutim, u zatvorenom kućištu, zbog rezonansi, može na određenim frekvencijama doći do povećanog izobličenja reprodukovanog zvuka. Zatvorene slušalice imaju značajnu izolaciju od zvukova iz okruženja, naročito na višim frekvencijama.

9.4 Frekvencijska karakteristika slušalica

9.4.1 Prenosna funkcija glave



Slika 9.4 - Prenosna funkcija glave: a) definicija pojedinih veličina, b) amplituda prenosne funkcije u slobodnom (puna linija) i difuznom (isprekidana linija) zvučnom polju [31]

Prenosna funkcija glave (*Head related transfer function - HRTF*) je funkcija koja nam pokazuje kako se zvučni pritisak promeni usled uticaja glave, torza, ušne školjke i ušnog kanala pre nego stigne do bubne opne. Ova funkcija, u kompleksnom obliku, je definisana, prema slici 9.4a, kao [21]:

$$\underline{F_{L/R}}(\theta, \varphi, \omega) = \frac{\underline{p_{L/R}}(\theta, \varphi, \omega)}{\underline{p_C}(\omega)} \quad (9.1)$$

gde je:

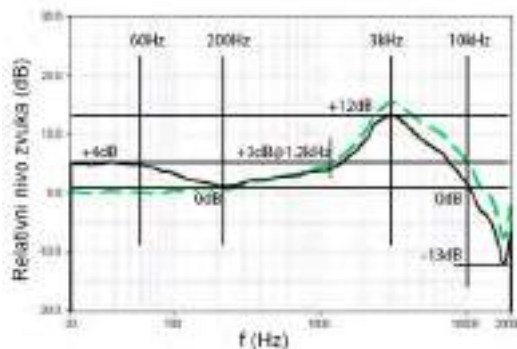
$\underline{p_C}(\omega)$ - zvučni pritisak na mestu glave slušaoca kada je slušalac odsutan,

$p_{L/R}(\theta, \varphi, \omega)$ - zvučni pritisak na bubnoj opni slušaoca (za levo ili desno uvo) kada se nalazi u zvučnom polju,
 θ, φ - uglovi u horizontalnoj (*azimuth*) i vertikalnoj ravni (*elevation*),
 ω - kružna učestanost.

Kada se slušalac nađe u referentnom zvučnom polju ravnog oktavnog ili tercnog spektra, pritisak u njegovom slušnom kanalu na mestu bubne opne neće biti ravan. Ako zvuk dolazi spreda, dobiće se na bubnoj opni jedan oblik spektra, dok će za druge pravce dolaska zvučnih talasa oblik spektra biti drugačiji. Tako, za slučaj kada zvučni talasi dolaze spreda, imamo prenosnu funkciju glave u slobodnom zvučnom polju (*free-field response*), predstavljenu punom linijom na slici 9.4b, a za slučaj kada zvučni talasi dolaze sa podjednakom verovatnoćom iz svih pravaca, prenosnu funkciju glave u difuznom zvučnom polju (*difuse-field response*) predstavljenu isprekidanom linijom na slici 9.4b [31].

9.4.2 Optimalna frekvencijska karaktersitika slušalica

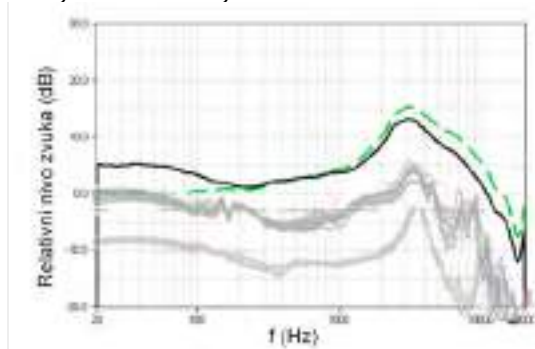
Optimalni oblik frekvencijske karakterisitke slušalica se u važećim standardima i preporukama vezuje za oblik amplitude prenosne funkcije glave. Drugim rečima, poželjno je da frekvencijska karakteritika slušalica, merena u ušnom kanalu na mestu bubne opne izgleda kao krive date na slici 9.4b. U litaraturi i pratećoj dokumentaciji slušalica najčešće srećemo njihove frekvencijske karakteristike, izmerene na mestu bubne opne, a potom za iznose date na slici 9.4b, korigovane na uslove slobodnog ili difuznog zvučnog polja. Od tako dobijenih krivih se očekuje da budu što ravnije.



Slika 9.5 - Optimalna frekvencijska karakteristika slušalica (puna linija) i zvučnika (isprekidana linija) izmerene na bubnoj opni [27]

Međutim, u novije vreme se polazi od činjenice da su slobodno i difuzno zvučno polje dva krajnja hipotetična slučaja zvučnog polja, koja ne odgovaraju uslovima u kojima se slušalice koriste. Pri definisanju optimalne frekvencijske karakteristike slušalica polazi se od činjenice da njihov odziv treba da bude identičan onom kakav imaju "dobri zvučnici u dobroj prostoriji" [6], [26], [27]. Naime odziv slušalica, meren na bubnoj opni slušaoca (ili odgovarajućeg simulatora) treba da bude identičan odzivu para

kvalitetnih zvučnika, merenom na isti način. Pri tome je prethodno odziv zvučnika u prostoriji za slušanje podešen da bude ravan [27]. Ovako dobijeni merni podaci su kasnije dopunjeni subjektivnim ispitivanjima, pa konačni rezultat izgleda kao na slici 9.5, gde je punom linijom nacrtana optimalna ili poželjna frekvencijska karakteristika slušalica.



Slika 9.6 - Frekvencijske karakteristike: optimalne za slušalice (puna linija) i zvučnike (isprekidana linija) i merene za dva tipa kvalitetnih slušalica renomiranih proizvođača (svetlija linija) [27]

Isprekidanom linijom na slici 9.5 je prikazana frekvencijska karakteristika zvučnika (prethodno ekvalizovanih na ravan odziv u prostoriji za slušanje) dobijena na poziciji bubne opne.

Na slici 9.6 su ispod optimalnih krivih slušalica i zvučnika (puna i isprekidana linija respektivno) u svetlijoj nijansi prikazane merene karaktersitke dva tipa kvalitetnih slušalica renomiranih proizvođača [27]. Vidi se da one upravo odgovaraju željenom obliku.

9.4.3 Merenje frekvencijske karakteristike slušalica

Frekvencijska karakteristika slušalica zavisi i od toga kako su nameštene i kako je izvedeno naleganje jastučića na uši i obraz korisnika. Zbog toga je neophodno merenje izvesti veći broj puta (u praksi je to obično pet), u različitim pozicijama, da bi se dobila usrednjena frekvencijska karakteristika, što bliža onoj koju imamo u realnim uslovima rada slušalica. Ovako dobijenu frekvencijsku karaktersitiku potom je potrebno korigovati, odnosno „prebaciti“ u frekvencijsku karakteristiku odgovarajućeg referentnog zvučnog polja u kojem bi prosečan slušalac imao na bubnoj opni spektar kakav je dobijen merenjem slušalica na simulatoru. Pod referentnim zvučnim poljem se, kako je prethodno rečeno, podrazumeva slobodno ili difuzno zvučno polje pa se u odnosu na uslove koji vladaju u njima i prave odgovarajuće korekcije. Te korekcije u stvari predstavljaju eliminaciju uticaja glave slušaoca i izvode se tako što se od dobijene usrednjene frekvencijske karaktersitke slušalica oduzme frekvencijaka karakteristika prnosne funkcije glave (*HRTF*) za odgovarajuće referentno zvučno polje. Tako dobijamo frekvencijsku karakteristiku slušalica u slobodnom ili difuznom zvučnom polju.

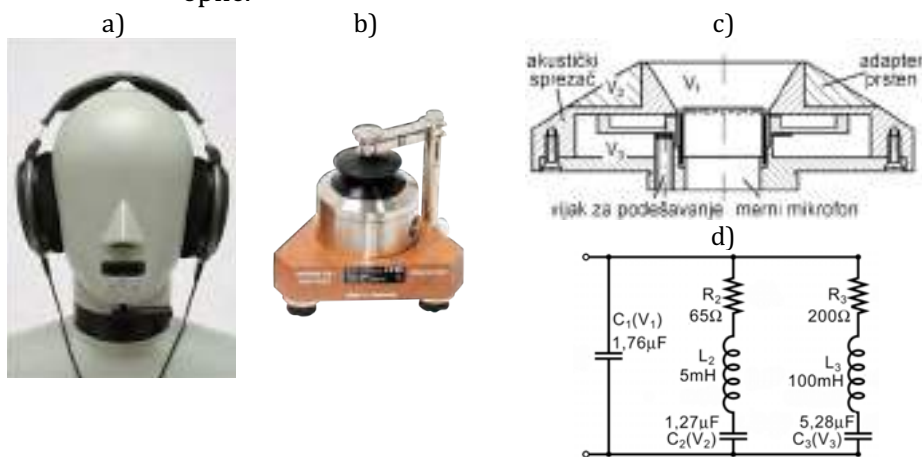
U novije vreme se ova korekcija daje i u odnosu na zvučno polje bliže realnim uslovima slušanja, koje nije ni slobodno ni reverberantno i moglo bi se nazvati „optimalnim“ [25], [29]. Pomenute korekcione krive su obično sastavni deo dokumentacije koja dolazi uz simulatore (adaptore) za merenje slušalica, ili se mogu naći u odgovarajućim standardima i preporukama [16], [19], [24].

Kao što je prethodno rečeno, karakteristike zvučnika se mere u otvorenom prostoru dok slušalice pri merenju moraju biti opterećene akustičkom impedansom koja je približno jednaka akustičkoj impedansi čovečjeg uva. Zbog toga se slušalice mere i proveravaju na uređajima koji simuliraju čovečje uvo, kao što su: *simulator uva*, *veštačko uvo* [19] ili *simulator glave i torza* [25], slika 9.7.

Pri merenju se koristi sinusni ton promenljive frekvencije takve amplitude da na nominalnoj impedansi slušalica daje snagu od 1 mW. Umesto ulazne snage od 1 mW, može se meriti sa jačinom pobudnog signala podešenom tako da se na određenoj frekvenciji dobije dati nivo zvuka (obično 94 dB na 500 Hz).

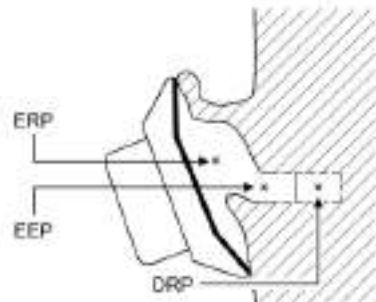
Oblik frekvencijske karakteristike zavisi od toga u kojoj tački se meri, a u praksi se sreću sledeće referentne merne tačke, slika 9.8:

- referentna tačka uva (*ear reference point ERP*), locirana na ulazu u uvo slušaoca,
- tačka na ulazu slušnog kanala (*ear canal entrance point EEP*), locirana u centru otvora ušnog kanala,
- referentna tačka bubne opne (*ear-drum reference point DRP*), locirana na kraju ušnog kanala, približno na poziciji bubne opne.



Slika 9.7 - Akustički simulatori: a) simulator glave i torza, b) veštačko uvo, c) presek dela veštačkog uva koji simulira akustičku impedansu prosečnog čovečjeg uva, d) ekvivalentno akustičko kolo sklopa pod c) [29]

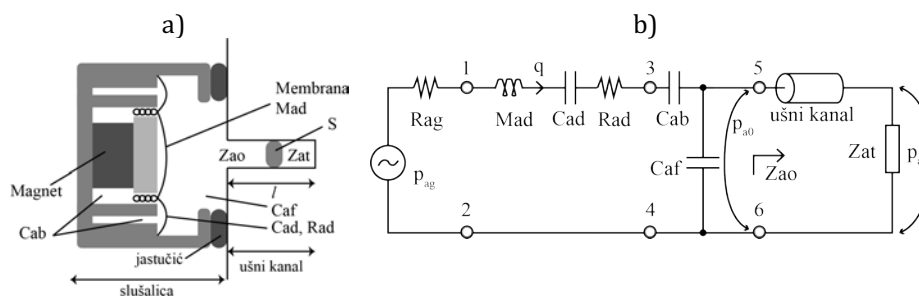
Čini se da je najlogičnije meriti zvuk u referentnoj tački bubne opne (DRP), mada se za različite portebe meri i u drugim tačkama. Rezultate dobijene u jednoj referentnoj tački moguće je preračunati u rezultate koji odgovaraju drugoj, koristeći se tabelama definisanim u pojedinim standardima i preporukama [17], [19], [25].



Slika 9.8 - Referentne tačke koje se koriste pri merenju frekvencijekse karaktersitike slušalica.

9.5 Elektrodinamičke slušalice

Pod elektrodinamičkim slušalicama, kao što je slučaj i kod elektrodinamičkih mikrofona i zvučnika podrazumevamo slušalice sa kretnim sistemom koji čine membrana i kalem. Membrana je spojena sa kalemom koji se kreće u vazdušnom procepu stalnog magneta, slika 9.9a. Kada naizmenična struja audio signala protiče kroz kalem, u vazdušnom procepu magnetnog kola nastaje promenljivi magnetni fluks koji se superponira sa fluksom stalnog magneta. Usled toga na kalem, a preko njega i na membranu, deluje magnetna sila koja ih pomera naizmenično, u jednom ili drugom smeru duž ose magnetnog sklopa, zavisno od smera struje u kalemu. Pomeranje membrane menja pritisak vazduha, usled čega nastaju zvučni talasi koji se šire u okolni prostor.



Slika 9.9 - Zatvorena elektrodinamička slušalica, postavljena na uvo, sa dobro izvedenim naleganjem: a) uprošćena skica, b) analogno akustičko kolo

Membrana elektrodinamičkih slušalica je izrađena od tankog i krutog materija (plastična ili metalna folija). Veličina pomeraja membrane

je proporcionalna jačini reprodukovanog zvuka. Magneti koji se koriste u savremenim elektrodinamičkim slušalicama su od neodimijuma ili ferita.

Elektrodinamičke slušalice su daleko najčešći tip slušalica koji koriste prosečni ljubitelji muzike, muzičari, profesionalni snimatelji i ton-majstori.

S obzirom da su slušalice i njihovi sastavni elementi malih dimenzija u odnosu na talasnu dužinu zvuka, osnovni način njihovog funkcionisanja možemo sagledati primenom analognih električnih kola kako je to objašnjeno u poglavlju 5. Poći ćemo od elektrodinamičke slušalice, zatvorene sa zadnje strane i čvrsto pripijene uz obraz korisnika tako da obuhvata ušnu školjku, slika 9.9a. Uprošćeno, analogno akustičko kolo ovakve sprege slušalice i uva izgleda kao na slici 9.9b, gde su:

$$p_{ag} = e_g Bl / (R_e S_d) - \text{elektromotorna sila ekvivalentnog}$$

akustičkog generatora,

$$R_{ag} = (Bl)^2 / (R_e S_d^2) - \text{unutrašnja akustička otpornost}$$

ekvivalentnog akustičkog generatora,

M_{ad} – akustička masa membrane i kalema,

C_{ad} – akustička kapacitivnost vešanja membrane,

R_{ad} – akustička otpornost vešanja membrane,

C_{ab} – akustička kapacitivnost komore iza membrane,

C_{af} – akustička kapacitivnost komore ispred membrane,

Z_{a0} – ulazna akustička impedansa slušnog kanala,

B – magnetna indukcija u procepu,

l – dužina provodnika kalema,

R_e – otpornost kalema,

e_g – elektromotorna sila generatora audio signala,

S_d – površina membrane.

Kao što se sa slike 9.9b vidi, sa p_{a0} je označen pritisak na ulazu u ušni kanal. Njegova vrednost delom zavisi i od ulazne akustičke impedanse ušnog kanala Z_{a0} . Ako ušni kanal posmatramo kao cev dužine l i površine poprečnog preseka S , onda imamo da je [14]:

$$Z_{a0} = \frac{Z_{at} + j\rho c/S \tan(kl)}{1 + j \frac{Z_{at}}{\rho c/S} \tan(kl)} \quad (9.2)$$

gde je Z_{at} akustička impedansa bubne opne.

Sada se za odnos pritisaka na krajevima ušnog kanala dobija:

$$p_{at} = \frac{p_{a0}}{\left\{ \cos(kl) + j \frac{\rho c}{SZ_{at}} \sin(kl) \right\}} \quad (9.3)$$

gde je p_{at} zvučni pritisak na bubnoj opni.

Analizom kola sa slike 9.9b može se zaključiti da pritisak p_{a0} na ulazu u slušni kanal a time i pritisak p_{at} na bubnoj opni su određeni veličinom akustičkog protoka q . Taj protok će imati najveću vrednost na rezonasi

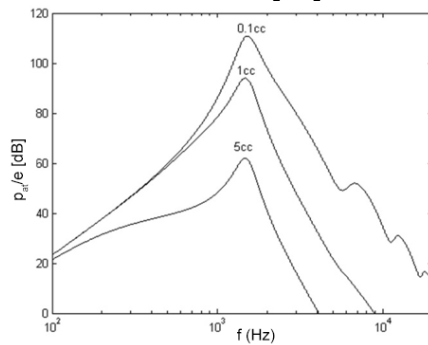
mehaničkog sistema slušalice koja je definisana njenom masom m_{ad} i ukupnom kapacitivnošću C_{at} osnovne grane kola, tj.:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{ad}C_{at}}} \quad (9.4)$$

gde je $C_{at} = C_{ad} C_{ab} / (C_{ad} + C_{ab})$.

Amplituda prenosne funkcije sistema slušalice-uvo, definisane kao p_{at}/e prikazana je grafički na slici 9.10a, kada je zapremina komore između prednje strane membrane slušalice i ulaza u slušni kanal V_f veoma mala, tako da je uticaj kapacitivnosti C_{af} na vrednost izlaznog pritiska zanemarljiv. Ujedno na ovom grafiku se vide rezonanse koje su rezultat uticaja slušnog kanala koji smo, kako je već rečeno, predstavili kao cev dužine l i površine poprečnog preseka S .

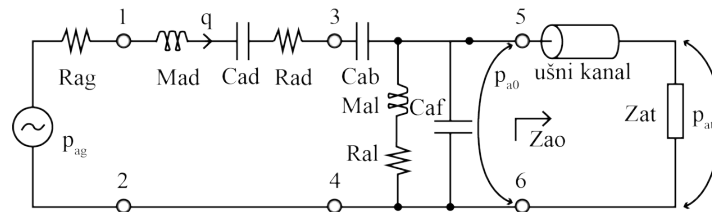
Što je zapremina ove komore veća to je frekvencijski opseg rada ovakve sprege širi, ali je efikasnost celog sistema manja, kako pokazuju grafici na slici 9.10b i 9.10c [14].



Slika 9.10 - Prenosna funkcija sistema slušalice-uvo, prikazanog na slici 9.9 [14], za različite veličine komore ispred membrane

- a) $V_f = 0,1 \text{ cm}^3$
- b) $V_f = 1 \text{ cm}^3$
- c) $V_f = 5 \text{ cm}^3$

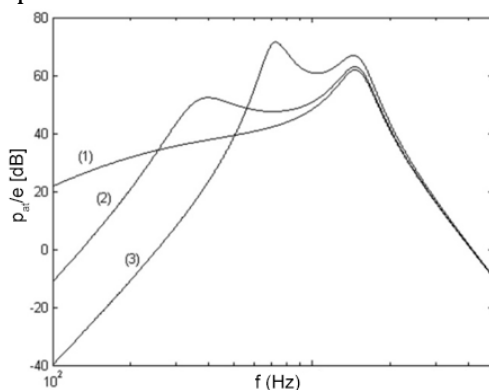
Naša pretpostavka da će slušalica biti čvrsto priljubljena uz lice korisnika i da nema curenja akustičke energije iz komore V_f nije sasvim tačna. Iako većina okoušnih slušalica imaju jastučiće koji se uz lice korisnika pritežu odgovarajućom elastičnom trakom ili sličnim mehanizmom, čest je slušaj da njihovo naleganje na lice ne obezbeđuje potpuno zaptivanje. Pri tome se dešava da deo akustičke energije iz komore curi u okolni prostor, što se u ekvivalentnom akustičkom kolu može predstaviti rednom vezom akustičke induktivnosti m_{al} i otpornosti R_{al} , slika 9.11.



Slika 9.11 - Analogno akustičko kolo slušalice sa slike 9.9a sa uključenim elementima m_{al} i R_{al} koji predstavljaju curenje akustičke energije ispod jastučića

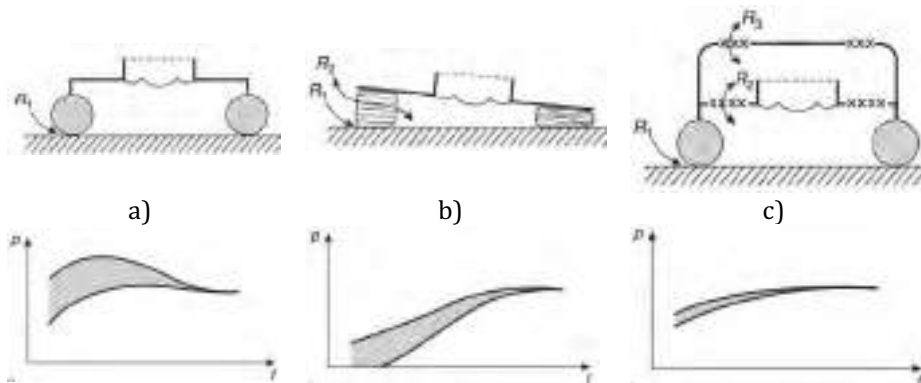
Impedansa curenja (m_{al} na red sa R_{al}) deluje na amplitudu prenosne funkcije sistema obaranjem niskih frekvencija, tim više, što je naleganje slušalice na lice slabije i curenje akustičke energije ispod jastučića veće.

Drugim rečima, reprodukcija niskih frekvencija kod zatvorenih slušalica zavisi od kvaliteta naleganja jastučića, i što je naleganje bolje, to se frekvencijski odziv proširuje dalje prema nižim frekvencijama. Ova pojava je grafički prikazana na slici 9.12 [14], gde kriva označena sa rednim brojem (1) predstavlja slučaj kada nema curenja, dok krive sa rednim brojevima (2) i (3) predstavljaju slučajeve sa srednjim i visokim intenzitetom curenja, respektivno.



Slika 9.12 - Uticaj curenja akustičke energije ispod jastučića okoušnih slušalica na amplitudu prenosne karakteristike sprege slušalice-uvo. Intenzitet curenja se povećava sa rastućim brojem krive [14]

Efekat gubitka niskih frekvencija nastao kao posledica curenja zvučne energije usled lošeg naleganja jastučića slušalice na glavu korisnika ne može se kompenzovati elektronskim putem, pošto su spektralne promene veoma različite od korisnika do korisnika. Zato se izvesno poboljšanje postiže tako što se uvodi relativno veliko, ali kontrolisano curenje akustičke energije kroz jastučice ili kroz školjku slušalice u okolni prostor.

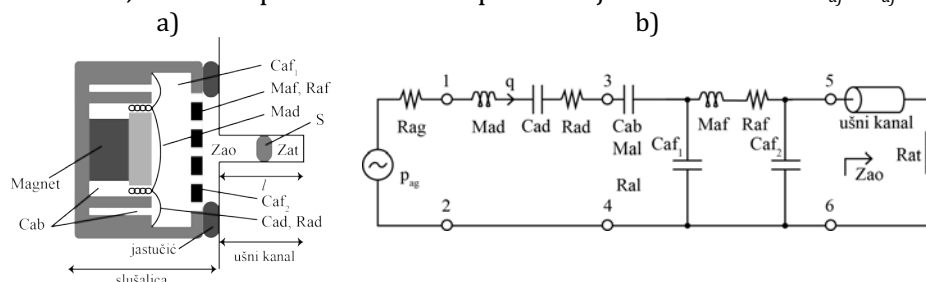


Slika 9.13 - Smanjenje ukupne promene reprodukcije niskih frekvencija usled lošeg naleganja jastučića: a) zatvorene slušalice, b) otvorene slušalice sa poroznim jastučićima i c) otvorene slušalice sa poroznom školjkom [7]

Ako se upotrebe porozni jastučići, slika 9.13b [7], curenje akustičke energije iz unurtašnjosti školjke (označeno sa R_2), a time i odziv na niskim frekvencijama, će se menjati u zavisnosti od njenog mehaničkog pritiska na uvo. Međutim, ukupne promene odziva su ipak nešto manje nego kod neporoznih jastučića, slika 9.13a. Ukupna promena odziva usled lošeg naleganja može se još smanjiti ako su jastučići neporozni a zid školjke se napravi poroznim, 9.13c [7], gde je curenje označeno sa R_2 i R_3 .

Postupkom uvođenja kontrolisanog curenja, značajno se smanjuje efikasnost sistema slušalice-uvo. Međutim, ovo smanjenje je u mnogim slučajevima prihvatljivo, jer se pad nivoa zvučnog pritiska na bubnoj opni može kompenzovati povećanjem jačine ulaznog audio signala, sve dok je pretvarački deo sistema u linearnom režimu rada.

Proširenje frekventijskog opsega slušalice prema višim frekvencijama postiže se dodavanjem akustičkih elemenata ispred membrane kao što je recimo mrežica sa otvorima prekrivenim poroznim ekranom za zaštitu od prašine, slika 9.14a. U analognom akustičkom kolu, slika 9.14b, mrežica i porozni ekran su predstavljeni elementima m_{af} i R_{af} .



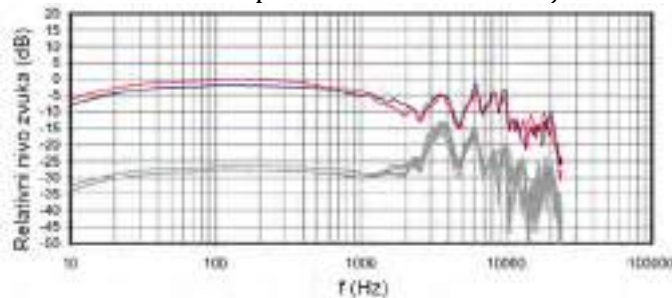
Slika 9.14 - Proširenje radnog opsega elektrodinamičke slušalice prema višim frekvencijama dodavanjem mrežice ispred membrane: a) skica preseka, b) ekvivalentno akustičko kolo

Komora ispred membrane je sada podeljena na dve, čije su kapacitivnosti označene sa C_{af1} i C_{af2} . Akustička induktivnost otvora mrežice M_{af} i kapacitivnost komore ispred mrežice C_{af2} formiraju rezonantno kolo čija se frekvencija rezonanse postavlja na gornju granicu potrebnog frekventijskog opsega. Faktor dobrote ovog kola na rezonansi se podešava akustičkom otpornošću ekrana za zaštitu od prašine R_{af} .

Elektrodinamičke slušalice se danas izrađuju u različitim varijantama: od veoma kvalitetnih za profesionalnu primenu kod snimanja i reprodukcije muzike visokog kvaliteta, do minijaturnih slušalice, relativno dobrog kvaliteta reprodukcije, koje se koriste uz različite prenosne uređaje.

Ove slušalice imaju kvalitetnu reprodukciju zvuka, veliku efikasnost, lake su za izradu i nisu skupe. Njihov kretni sistem ima relativno veliku

masu što se negativno odražava na reprodukciju tranzijenata. Magnetno polje u kojem se nalazi kalem se menja sa promenom položaja kalema, što kao rezultat ima nešto povećan iznos izobličenja.



Slika 9.15 -
Frekventijska
karakteristika
kvalitetnih
elektrodinamičkih
slušalica[28]

Membrana je konusnog ili kalotnog oblika i ponaša se kao klip samo na niskim frekvencijama. Na višim frekvencijama ona se deformiše i rezonanse membrane zajedno sa neprigušenim rezonansama komore uva i ušnog kanala stvaraju oštre premasaje i propade u frekventijskoj karakteristici ovih slušalica, slika 9.15 [28]. Donji grafik na slici 9.15 predstavlja frekventijsku karakteristiku slušalica (leve i desne) merenu na simulatoru glave i torza za po pet ponavljanja. Gornji grafik predstavlja usrednjene vrednosti (iz pomenutih pet merenja) za levu i desnu slušalicu, korigovane na referentno slobodno zvučno polje.

Membrana ovih slušalica je mala, pa zato imaju lošiju reprodukcija niskih frekvencija nego tipovi slušalica sa velikom membranom (elektrostatičke i planarne, na primer).

9.6 Elektrostatičke slušalice

Elektrostatičke slušalice su relativno proste konstrukcije. Sastoje se od tanke nategnute membrane izrađene od plastičnog materijala, fiksirane po obodu između dve perforirane metalne ploče (*electrode*), slika 9.16a.

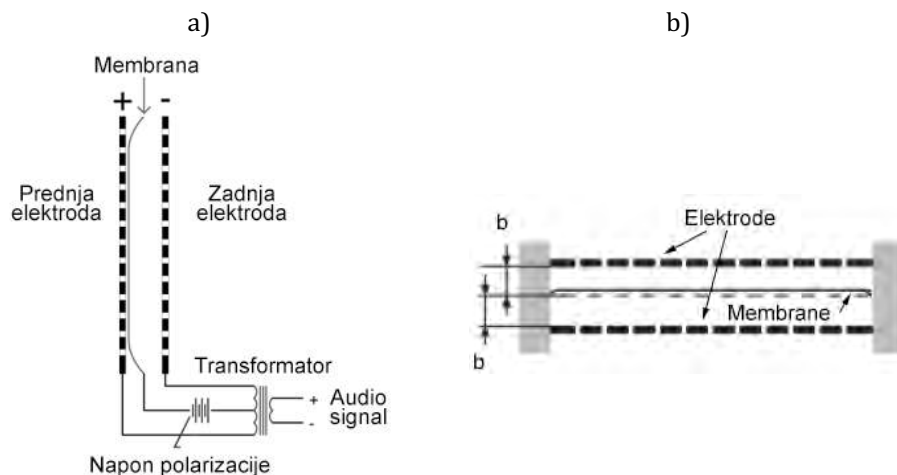
Između membrane i elektroda postoji polarizacioni jednosmerni napon, čija je vrednost reda nekoliko stotina volti, usled čega se u međuprostoru formira konstantno električno polje. Audio signal se preko prilagodnog transformatora dovodi na electrode, stvarajući između njih i membrane promenljivo električno polje koje se superponira sa konstantnim poljem jednosmernog izvora napajanja. Zavisno od polariteta polja na elektrodama, membrana se u ritmu audio signala pomera prema jednoj ili drugoj elektrodi, proizvodeći zvučne talase.

Privlačna sila koja se javlja između membrane i elektroda iznosi:

$$F = \frac{Q^2}{2 \cdot C \cdot b} = \frac{C \cdot E}{2 \cdot b} \quad (9.5)$$

gde je C - kapacitet kondenzatora koji čine membrana i elektroda sa vazдушnim prostorom između, slika 9.16b, E - napon polarizacije elektroda,

b – rastojanje između membrane i jedne od elektroda, Q – količina elektriciteta kojom je napunjen kondenzator.



Slika 9.16 - Elektrostatičke slušalice: a) princip rada, b) presek sklopa slušalice

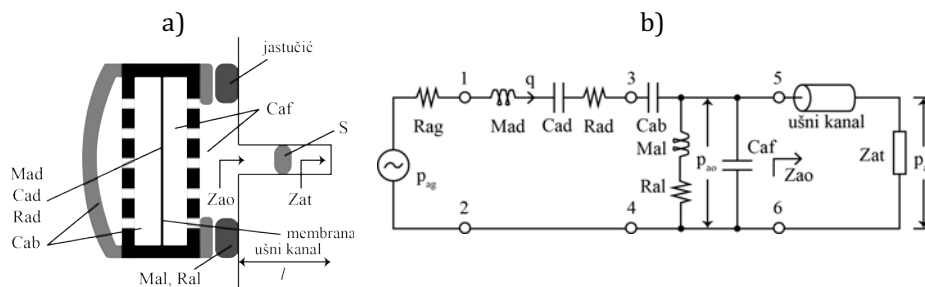
Dovođenjem audio signala na obloge kondenzatora menja se ukupni napon na njima za $\Delta E = e_g$, gde je e_g napon audio signala. Ove promene su male u odnosu na napon polarizacije elektroda ($\Delta E \ll E$), pa se iz jednačine (9.5) dobija da je promena sile između membrane i elektroda:

$$\Delta F = \frac{C \cdot E}{2 \cdot b} \Delta E = \frac{C \cdot E}{2 \cdot b} e_g \propto e_g \quad (9.6)$$

Drugim rečima, promena sile između membrane i elektroda je srazmerna naponu audio signala e_g na njima.

Elektrostatičke slušalice moraju za ispravan rad imati specifičan pojačavač i dosta visok napon za polarizaciju elektroda u odnosu na membranu.

Ako su otvori u elektrodama kroz koje membrana zrači dovoljno velike površine, slika 9.17a, ekvivalentno akustičko kolo elektrostatičke slušalice postavljene na glavu korisnika sa zatvorenom školjkom i dobrim naleganjem jastučića, izgleda kao na slici 9.17b. Kao što se može primetiti deo kola od tačaka 1-2 je istovetan kao kod elektrodinamičke slušalice, slika 9.9b. To je i logično, jer u ovom delu kola imamo elemente koji predstavljaju membranu (M_{ad} , C_{ad} i R_{ad}), prednju i zadnju komoru (C_{af} i C_{ab}), curenje ispod jastučića (M_{al} , R_{al}) i ušni kanal, koji su skoro identični kao i kod elektrodinamičke slušalice. Jedina je razlika u vrednosti parametara membrane pošto je kod elektrostatičke slušalice membrana znatno lakša, usled čega je njena rezonansa viša.



Slika 9.17 - Zatvorena elektrostatička slušalica, postavljena na uvo:
a) uprošćena skica, b) analogno akustičko kolo

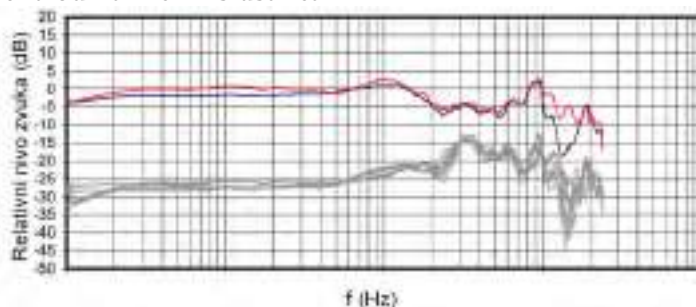
Tako, cela analiza o uticaju curenja akustičke energije i dodavanja prednje mrežice, na prenosnu funkciju, koju smo proveli kod elektrodinamičkih slušalica, može se i ovde primentiti. Jedina značajna razlika između analognih kola na slikama 9.9b i 9.17b je u elementima koji definišu elektromotornu silu (p_{ag}) i unutrašnju impedansu (Z_{ag}) generatora pritiska. Ove veličine su kod elektrostatičke slušalice date relacijama [13]:

$$p_{ag} = e_g \frac{C}{C_k} \quad (9.7)$$

$$Z_{ag} = -\frac{C_k^2}{C} \quad (9.8)$$

gde je C kapacitet kondenzatora koji formiraju membrana i elektroda, a C_k konstanta ($C_k = b/4E$). Ovde je interesantno naglasiti da je unutrašnja impedansa generatora pritiska negativna kapacitivnost, jednačina (9.8). Njen uticaj u ekvivalentnom kolu je takav da povećava njegovu ukupnu kapacitivnost i smanjuje osnovnu rezonansu sistema.

Veoma tanka i laka membrana omogućava da se frekvencijski opseg rada elektrostatičkih slušalica proteže i znatno iznad 20 kHz. Takođe, u frekvencijskoj karakteristici ovih slušalica, slika 9.18, na visokim frekvencijama, nema tako oštih premašaja i propada kao što je slučaj kod elektrodinamičkih slušalica.

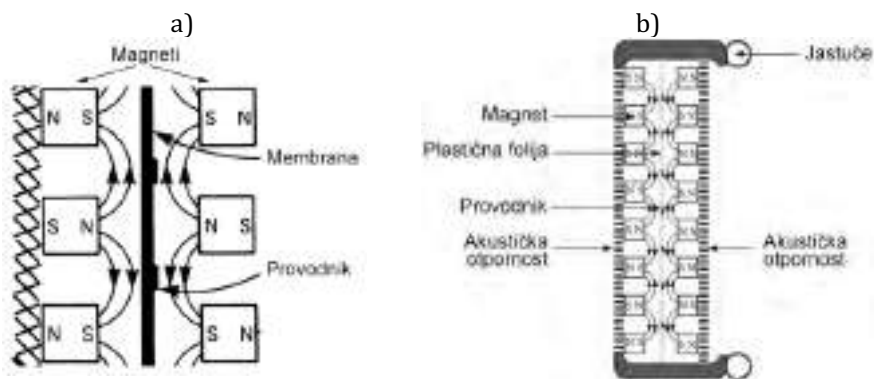


Slika 9.18 -
Frekvencijska
karakteristika
kvalitetnih
elektrostatičkih
slušalica [28]

Elektrostatičke slušalice su komplikovane za proizvodnju i veoma skupe, jer zahtevaju visok napon polarizacije između membrane i elektroda, kao i specifičan pojačavač. Zbog toga se ove slušalice ne mogu smatrati portabl-uređajem, koji je lako prenositi sa mesta na mesto. Njihova membrana je velika i laka i kreće se kao klip u homogenom elektrostatičkom polju. Usled toga dobro reprodukuju i najniže i najviše frekvencije, imaju mala izobličenja i izvanredan tranzijentni odziv. Ove slušalice imaju najverniju reprodukciju zvuka od svih tipova slušalica.

9.7 Planarne magnetne slušalice

Planarne magnetne slušalice su postale veoma popularne tokom poslednje dekade, iako je princip planarnih magnetnih pretvarača bio poznat mnogo ranije.

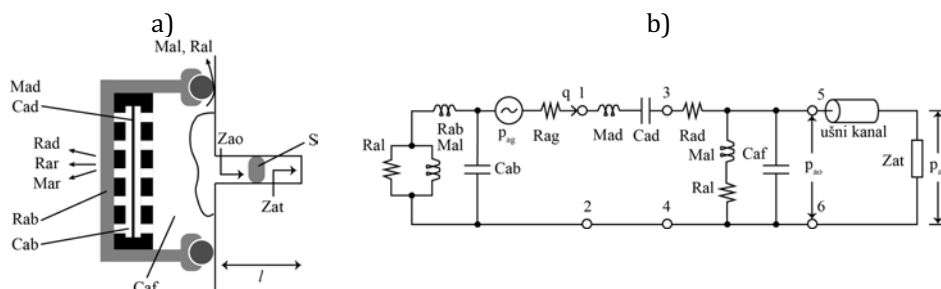


Slika 9.19 - Planarne magnetne slušalice: a) princip formiranja homogenog magnetnog polja, b) presek sa naznakom glavnih sastavnih elemenata

Ove slušalice možemo posmatrati kao neku vrstu hibrida između elektrodinamičkih i elektrostatičkih slušalica. Slično kao kod elektrodinamičkih, i kod planarnih magnetnih slušalica kao element koji pokreće membranu koristi se provodnik u magnetnom polju kroz koji protiče struja audio signala. Slično kao kod elektrostatičkih slušalica planarne slušalice imaju membranu u vidu tanke folije od savitljivog plastičnog filma. Zbog ove sličnosti sa elektrostatičkim nekada se planarne slušalice nazivaju magnetostatičkim. Membrana na sebi ima veoma tanke pljosnate električne provodnike, slika 9.19a, obično od alumijuma radi što manje mase kretnog sistema, koja je reda veličine 100 mg. Sa jedne i druge strane membrane nalazi se niz pravilno raspoređenih magnetnih šipki, namagnetisanih normalno na njihovu dužinu. Magneti su tako raspoređeni da dva susedna imaju suprotan smer magnetnog polja, a dva naspramna su okrenuta istim polovima jedan prema drugom, slika 9.19a. Pri ovakvim uslovima provodnici na površini membrane se nalaze u magnetnom polju

Kada kroz provodnike protiče struja magnetno polje koje ona stvara stupa u interakciju sa izodinamičkim poljem stalnih magneta, prouzrokujući kretanje provodnika a time i membrane u koju su integrisani. Provodnici su raspoređeni ravnomerno po celoj površini membrane tako da se svi delovi membrane, pod uticajem elektromagnetne sile, pomeraju u fazi. Ukupna dužina provodnika može da bude i do 10 m a njihova otpornost je reda nekoliko desetina pa do nekoliko stotina oma.

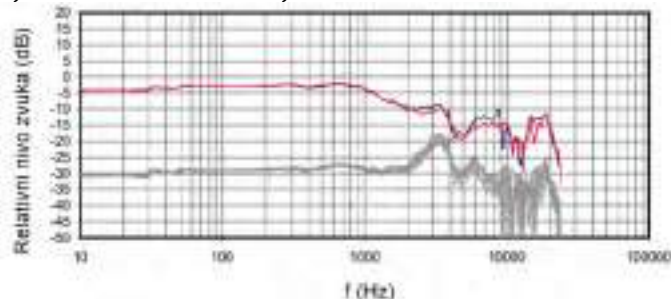
Jedina razlika je u tome, što je planarna slušalica otvorena sa zadnje strane, slika 9.20a, pa je analogno kolo prošireno elementima koji se odnose na akustičku energiju koja kroz zadnje otvore odlazi u okolni prostor. To su akustička otpornost zadnje mrežice R_{ab} i impedansa zračenja predstavljena paralelnom vezom otpornosti R_{ar} i induktivnosti M_{ar} , slika 9.20b.



Ostatak analognog kola, desno od tačaka 1-2, je istovetan onom na slici 9.12 i svi zaključci o uticaju pojedinih elemenata na prenosnu funkciju slušalica koji su tamo izvedeni važe i ovde.

Planarne magnetne slušalice imaju veoma mala izobličenja, izvanredan trenzijentni odziv, veoma čistu i tačnu reprodukciju zvuka. Imaju veliku membranu i dobru reprodukciju niskih frekvencija. Membrana je ravna, nalazi se u homogenom magnetnom polju i kreće se kao klip, što za

posledicu ima jako mala izobličenja i ravnu frekventijsku karaktersitiku do najviših audio frekvencija.

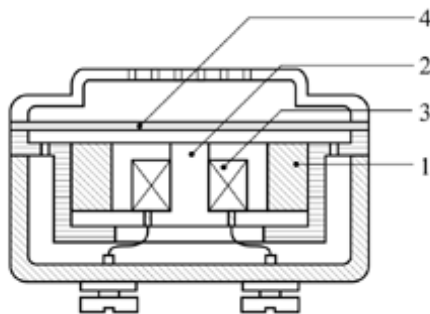


*Slika 9.21 -
Frekventijska
karakteristika
kvalitetnih
planarno-magnetnih
slušalica [28]*

Nedostatak im je mala efikasnost, pa ih je potrebno napajati jačim signalom da bi se dobio odgovarajući nivo zvuka. Usled svoje složenije konstrukcije planarne magnetne slušalice su većih dimenzija i mase od ostalih tipova slušalica.

9.8 Elektromagnetne slušalice

Na slici 9.22 prikazan je presek elektromagnetne slušalice sa konstrukcionim detaljima. Magnetni sklop čine stalni magnet (1), i centralni polni nastavak (2). Membrana (4), kružnog oblika, najčešće izrađena od feromagnetnog lima, debljine oko 0,25 mm, uklještena je po svom obodu i ujedno predstavlja kotvu magnetnog kola. Membrana može biti izrađena i od dielektričnog materijala kada je za nju fiksirano parče magnetnog materijala. Namotaj (3), cilindričnog oblika, obuhvata centralni polni nastavak magnetnog sklopa.



*Slika 9.22 - Detalji konstrukcije
elektromagnetne slušalice:
1) magnet, 2) polni nastavak,
3) namotaj, 4) membrana*

Pri proticanju struje kroz kalem naizmenični magnetni fluks koji ona stvara, superponira se sa magnetnim fluksom stalnog magneta. Ova promena magnetnog fluksa izaziva promenu sile kojom magnet deluje na membranu. Usled toga membrana vibrira u ritmu promena struje kroz namotaj stvarajući zvučne talase. Kako je membrana koja se pokreće izrađena od magnetnog materijala to se ove slušalice često nazivaju i

slušalice sa kretnim magnetom.

Otpornost namotaja, zavisno od namene slušalice, varira od nekoliko stotina oma do nekoliko hiljada oma. Rastojanje membrane od magnetnog sklopa je reda 1mm ili nešto manje.

Zvučni pritisak koji ova slušalica stvara u komori koja se nalazi između kapice slušalice i elemenata srednjeg uva, uključujući i ušni kanal, može se približno izraziti jednačinom [4]:

$$p = \frac{1}{S\omega C_{ma}} v, \quad (9.9)$$

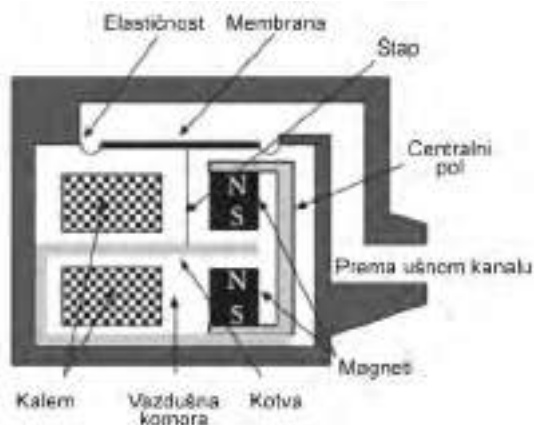
gde je S efektivna površina membrane slušalice, v brzina membrane sa C_{ma} mehanička elastičnost vazduha u komori.

Treba napomenuti da se ovde misli na srednju brzinu membrane po celoj njenoj površini. Inače brzine pojedinih delova membrane u stvarnosti su različite, s obzirom da je membrana uklještena po obodu i da se usled toga ne kreće kao klip.

Efikasnost elektromagnetne slušalice je nekoliko paskala pri snazi od 1 mW.

Elektromagnetne slušalice su se mnogo koristile u starim telefonskim aparatima, pre svega, zbog svoje robusnosti i čvrstoće i velike efikasnosti. Tada su imale zatvorenu zadnju stranu i formirane su kao supraauralne slušalice bez jastučića.

Danas se elektromagnetne slušalice uglavnom koriste kao slušni elementi prilagođeni za postavljanje u ušni kanal ili kao emiteri zvuka u slušnim aparatima za nagluve. Radi potrebe za smanjenjem izobličenja i minijaturizacijom, ove slušalice se izrađuju kao balansirani sistemi, odnosno sistem sa tzv. „balansiranom kotvom“, čija je jedna verzija prikazana na slici 9.23[17]. Ovakva slušalica se često naziva i slušalica sa promenljivom reluktansom.



Slika 9.23 - Konstrukcioni detalji magnetne slušalice sa „balansiranom kotvom“ [17]

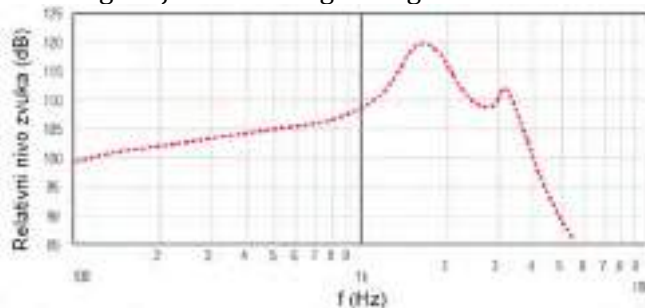
Savitljiva kotva od magnetnog materijala je postavljena simetrično između para magneta, koji sa kotvom i centralnim polom formiraju

jedinstven magnetni sklop, slika 9.23. Pri tome, kotva prolazi kroz centar stacionarnog kalema na koji se dovodi napon audio signala. Kotva je dalje pomoću krutog štapa povezana sa membranom slušalice koja je elastično vezana za kućište. Sa druge strane membrane je tunel koji vodi prema slušnom kanalu.

Sila koja deluje na kotvu može se predstaviti izrazom[17]:

$$F = \frac{2\Phi_0 N}{d} i \quad (9.10)$$

gde je: Φ_0 - magnetni fluks koji kroz magnetno kolo stvaraju stalni magneti, N - broj zavoja kalema, i - struja kroz namotaj i d -rastojanje između slobodnog kraja kotve i magnetnog kola.



Slika 9.24 -
Frekvencijski odziv
tipične slušalice sa
balansiranom
kolvom [18]

Slušalice sa balansiranom kolvom mogu se optimalno podesiti za odgovarajući frekvencijski opseg, manjih su dimenzija, imaju brži odziv i bolju reprodukciju visokih frekvencija od odgovarajućih elektrodinamičkih slušalica. Loša im je reprodukcija niskih frekvencija, što se može videti sa slike 9.24.

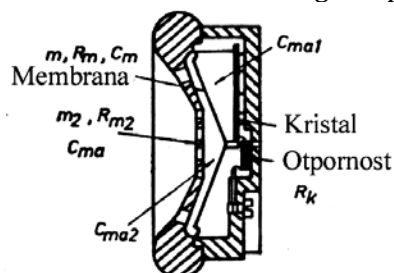
9.9 Piezoelektrične slušalice

Kao što je rečeno u odeljku 6.11, kada se na bimorf formiran na bazi piezoelektričnih materijala dovede napon on se deformiše. Ova njegova osobina se upravo koristi za pretvaranje električnog signala u akustički kod piezoelektričnih, ili kako se još nazivaju, kristalnih slušalica. Slično, kao i kod mikrofona, slika 6.37, bimorf se učvršćuje za kućište slušalice, preko jedne ili više podloški, tako da mu jedan kraj ostane slobodan, slika 9.25. Slobodni kraj se spaja sa membranom direktno ili preko štapića izrađenog od lakog metala ili plastike. Membrana je konusnog oblika radi veće čvrstoće. Izrađuje se od metalne folije ili plastike.

Ispred membrane se postavlja zaštitna rešetka koja u akustičkom smislu predstavlja rednu vezu akustičke induktivnosti i otpornosti. Ovi elementi zajedno sa akustičkom kapacitivnošću komore u koju slušalica zrači predstavljaju rezonantno kolo koje proširuje frekvencijsku karaktersitiku prema višim frekvencijama.

Piezoelektrične slušalice imaju relativno nizak kvalitet zvuka, veliku ulaznu otpornost i veliku osetljivost. Bile su u masovnijoj upotrebi 1960-tih godina uz tranzistorske radio prijemnike i slušne aparate.

Nemaju primenu u modernim multimedijalnim prenosnim uređajima zbog niskog kvaliteta reprodukovanog zvuka, koji je posledica relativno malih pomeraja membrane, velikih izobličenja pri jačim signalima i brojnih rezonansi mehaničkog sklopa u radnom frekvencijskom opsegu.



Slika 9.25 - Izgled piezoelektrične slušalice u preseku

Zbog svoje velike ulazne otpornosti i osetljivosti, pogodne su za korišćenje uz kristalne radio prijemnike (vrsta veoma prostih radio prijemnika, sa jako slabim korisnim signalom, bez spoljašnjeg napajanja).

9.10 Slušalice za redukciju buke

Slušalice za redukciju buke se koriste u više različitih oblasti čovekovog rada i delovanja. To su industrija, komunikacije, prevozna sredstva, zabava, audiometrija itd. U industrijskim postrojenjima ovakve slušalice se koriste za zaštitu sluha radnika, svakodnevno izloženih visokim nivoima buke. Kod slušalica namenjenih komunikaciji zvučna izolacija je istog reda važnosti kao i bilo koja druga njihova osnovna karaktersitika. Što je veća vrednost akustičke izolacije, to je bolja razumljivost govora sa ovim slušalicama. U sredstvima prevoza (naročito avionima) putnici koriste slušalice za redukciju buke pri slušanju audio materijala za zabavu. Slične slušalice u kombinaciji sa savremenim prenosnim uređajima služe za ugodnije slušanje muzike. Ovakve slušalice su takođe od velike pomoći pilotima aviona i helikoptera koji, uprkos veoma jakoj buci u kabinama, moraju da čuju govor i zvuke upozorenja. Takođe, ove slušalice su veoma korisne u audiometriji za dijagnostiku nedostataka uva i problema sa govorom.

Slušalice za redukciju buke mogu doprineti smanjenju umora tokom putovanja koji nastaje usled izlaganja buci niskih frekvencija u dužem periodu vremena. One se mogu nositi i u slušajevima kada korisnik ne namerava da sluša bilo koji drugi audio signal, već prosto samo da se zaštiti od prekomerne buke. Tada umesto o slušalicama govorimo o zaštitnicima sluha, koji nisu predviđeni i za reprodukciju korisnog signala kao što su muzika, govor ili različite vrste signala upozorenja.

Kao što ćemo dalje videti ovakvim slušalicama je moguće ne samo oslabiti buku u širokom opsegu frekvencija, nego i selektivno, čime se ostavljaju neoslabljeni željeni zvukovi poput signala govora i upozorenja.

Redukcija buke kod slušalica se ostvaruje pasivnim ili aktivnim postupcima. Pod pasivnim postupkom redukcije buke podrazumeva se uticaj samih slušalica, kao prepreka, na smanjenje buke koja stiže u ušni kanal korisnika. Aktivna redukcija buke podrazumeva primenu elektronskih i elektroakustičkih elemenata za redukciju buke na ulazu ušnog kanala korisnika.

Iskustva u korišćenju slušalica za redukcijom buke govore da su u ovom pogledu najefikasnije zatvorene slušalice. Međutim, zatvorene slušalice nisu pogodne za nošenje na glavi, naročito ako se radi o takvim zahtevima gde se moraju nositi neprekidno u dugim vremenskim intervalima. Toplota koja se generiše u prostoru ispod školjki slušalica i pritisak koji nosač školjki vrši na glavu korisnika preko jastučića stvaraju prilično veliku nelagodu.

Za razliku od njih, kod otvorenih slušalica nema navedenih problema, međutim ove slušalice nemaju nikakvu pasivnu izolaciju od buke visokih frekvencija. Pored toga kod njih tokom korišćenja nastaju velike promene na akustičkom delu prenosnog puta signala između slušalice i mernog mikrofona, što otežava stabilnost sistema aktivne regulacije buke i smanjuje njegovu efikasnost. Iz ovih razloga je razumljivo da je moguća redukcija buke kod otvorenih slušalica značajno manja nego kod zatvorenih.

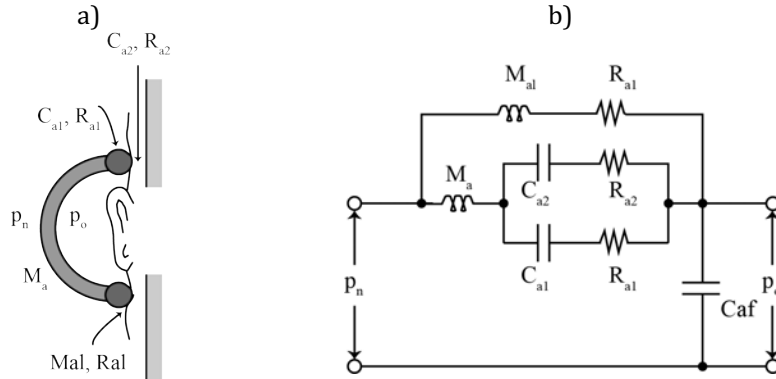
Iz prakse je poznato da se neki korisnici žale da slušalice za redukciju buke smanjuju kvalitet korisnog zvuka, do čega, moguće, dolazi usled redukcije jačine uobičajenih zvukova ambijenta. Takođe se zna da postoje žalbe nekih korisnika da pri korišćenju ovih slušalica osećaju promenu atmosferskog pritiska, iako školjke slušalica imaju predviđene cevčice za izjednačavanje pritiska u spoljašnjem i unutrašnjem prostoru.

9.10.1 Pasivna redukcija buke slušalica

Tehnički gledano, svaki tip slušalica može da doprinese, u određenoj meri, pasivnoj redukciji buke. Materijali od kojih su izrađene školjke slušalica blokiraju prolaz zvučnih talasa, iz okolnog prostora, prema ušnom kanalu i bubnoj opni, naročito na višim frekvencijama. Najveće pasivno slabljenje buke imaju okoušne zatvorene slušalice sa relativno teškim školjkama i dobrim naleganjem jastučića oko ušiju korisnika.

Prolazak zvučnih talasa iz spoljašnjeg prostora u komoru ispod školjke, slika 9.26a, odvija se putem dva mehanizma: curenjem akustičke energije između jastučića i glave korisnika, i prolaskom strukturalnih zvučnih talasa kroz materijal same školjke. Curenje akustičke energije se može svesti

na minimalnu meru izborom mekanih i fleksibilnih jastučića, koji omogućavaju dobro oklapanje i čvrsto zaptivanje unutrašnjeg prostora.



Slika 9.26 - Pasivna akustička izolacija okoušnih slušalica: a) detalj školjke slušalice koja se oslanja na jastučice i tkivo glave, b) ekvivalentno akustičko kolo sklopa pod a)[7], [14]

Sa druge strane, školjke slušalice oslonjene na elastične jastučice i tkivo glave vibriraju pod uticajem spoljašnjih zvučnih talasa, zračeći zvuk u svoju unutrašnjost. Ovo zračenje dovodi do slabljenja izolacije na niskim frekvencijama. Da bi ovaj mehanizam sagledali detaljnije zadržaćemo se na slici 9.26a, gde je šematski prikazana školjka okoušnih slušalica postavljena na glavu koisnika. Spoljašnji pritisak je označen sa p_n a unutrašnji (ispod školjke), sa p_o . Curenje akustičke energije ispod jastučića predstavljeno je elementima M_{al} i R_{al} . Elastičnost i gubici u jastučićima su predstavljeni sa C_{a1} i R_{a1} a elastičnost i gubici u tkivu glave ispod jastučića sa C_{a2} i R_{a2} . Komora ispod školjke predstavljena je akustičkom kapacitivnošću C_{af} . Ekvivalentno akustičko kolo za ovaj sklop prikazano je na slici 9.26b[14]. Prenosna funkcija kola sa slike 9.26b, za sinusnu pobudu, data je izrazom:

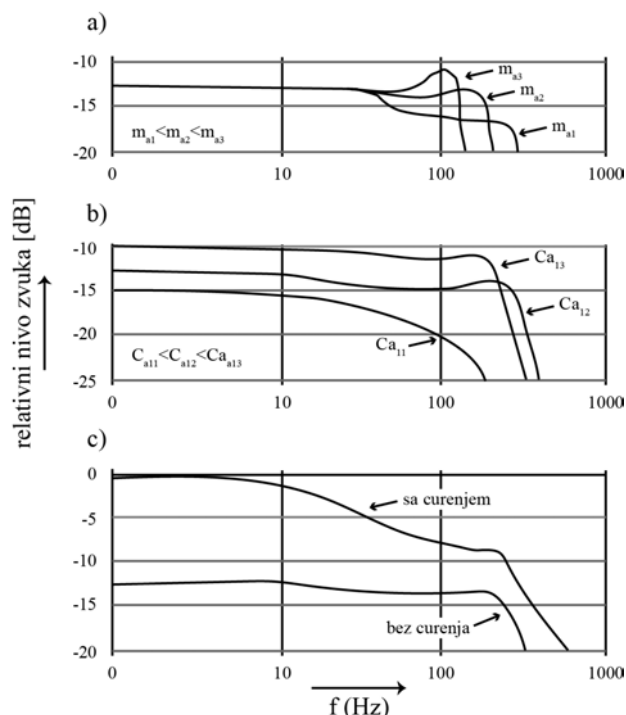
$$F(j\omega) = \frac{p_o(j\omega)}{p_n(j\omega)} \quad (9.11)$$

Ako za početak zanemarimo gubitke usled curenja akustičke energije (M_{al} i R_{al}), može se pokazati [14] da ovo kolo predstavlja filter propusnik niskih frekvencija drugog reda, čija je frekvencija rezonanse data relacijom:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{M_a \cdot C_{ae}}} \quad (9.12)$$

gde su: M_a – akustička masa ili induktivnost a C_{ae} – ukupna akustička kapacitivnost kola.

Amplitudska karakteristika ovog kola iznad frekvencije rezonanse opada brzinom od 12 dB/oktavi. Uticaj pojedinih elemenata kola na njegovu amplitudsku karakteristiku prikazan je na slici 9.27 [14].



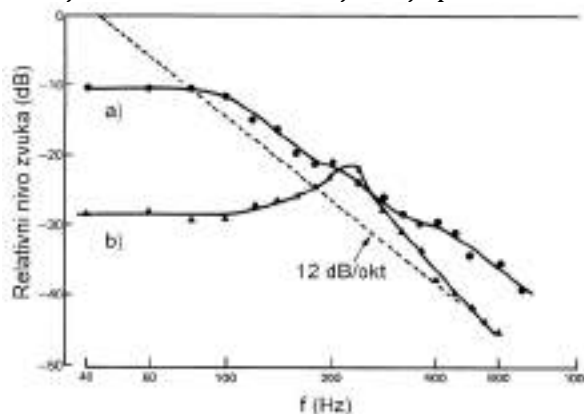
Slika 9.27 - Promena akustičke izolacije školjke sa slike 9.26a kada se menja:
a) akustička masa školjke m_a ,
b) elastičnost jastučića C_{a1} , c) curenje ekustičke energije između jastučića i glave korisnika (M_{a1} , R_{a1} ; prilagođeno prema rezultatima datim u [14])

Kako se vidi sa dijagrama označenog sa a) na ovoj slici, povećanjem mase školjke (predstavljena sa m_a) smanjuje se frekvencija rezonanse i povećava izolacija na frekvencijama iznad nove rezonanse. Međutim školjke suviše velike mase nisu pogodne za nošenje na glavi.

Smanjenjem elastičnosti jastučića (C_{a1}), dijagram b), povećava se frekvencija rezonanse kao i izolacija na niskim frekvencijama. Odatle bi se moglo zaključiti da bi izolaciji najviše doprineli sasvim kruti jastučići. Međutim, sa povećanjem krutosti jastučića, ne samo da slušalice postaju neugodne za nošenje, nego se smanjuje i mogućnost dobrog zaptivanja između jastučića i glave korisnika, što ne dozvoljava dalje poboljšanje izolacije slušalica na niskim frekvencijama. Ako iz bilo kojih razloga postoji curenje akustičke energije ispod jastučića školjke, izolacija slušalica slabi, i u krajnjem slučaju se svodi na zanemarljivu vrednost, slika 9.27c.

Pored toga treba imati u vidu da i elastičnost tkiva glave (C_{a2}), počev od određene vrednosti, eliminiše dalji pozitivan uticaj smanjenja elastičnosti jastučića. Uticaj elastičnosti tkiva glave na ograničenje izolacije slušalica na niskim frekvencijama veoma se jasno vidi sa dijagrama na slici 9.28 [7]. Na ovom dijagramu je prikazana akustička izolacija koju daje školjka od aluminijuma sa jastučićima ispunjenim vodom u dva slučaja; kada se postavi na čoveče uvo (kriva a) i kada se postavi na ravnu i čvrstu podlogu (kriva b). Kao što se vidi, kada je eliminisan uticaj tkiva glave ispod jastučića,

izolacija na niskim frekvencijama je povećana za skoro 20 dB.



Slika 9.28 - Akustička izolacija koju daje školjka od aluminijuma sa jastučićima ispunjenim vodom: a) kada se postavi na čovečje uvo, b) kada se postavi na ravnu i čvrstu podlogu [7]

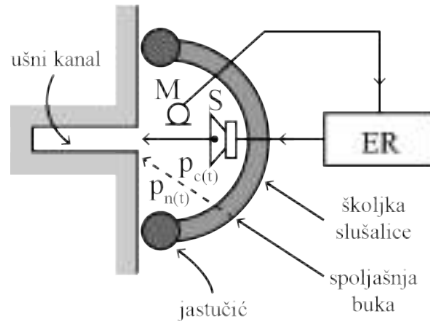
Na pasivnu izolaciju slušalica utiču i karaktersitike držača školjki. Njihova zategnutost i pritisak kojim deluju na glavu korisnika svakako ima veliki uticaj na veličinu curenja akustičke enrgije u prostor ispod školjki slušalica. Veća zategnutost držača školjki takođe smanjuje elastičnost jastučića pa se i iz tog razloga povećava izolacija kako je prethodno rečeno. Nažalost, pretereana zategnutost držača školjki brzo postaje neugodna za korisnika i takve slušalice neće biti prihvaćene u praksi, bez obzira na njihovu izolaciju i/ili kvalitet reprodukcije zvuka.

Kao što se vidi sa dijagrama na slikama 9.27 i 9.28, i kao što mnoga merenja pokazuju [28], [29], izolacija zatvorenih okoušnih slušalica je sasvim dobra na frekvencijama iznad 1000 Hz, dok je relativno slaba na niskim frekvencijama, i retko kada prelazi vednost od 15 dB ispod 200 Hz. Ovo u mnogim praktičnim slučajevima nije dovoljno, pa se tada primenjuje aktivna redukcija buke.

9.10.2 Aktivna redukcija buke slušalica

Primenom postupaka aktivne redukcije buke moguće je u značajnoj meri popraviti izolaciju slušalica na niskim frekvencijama, bez pogoršanja komfora korisnika prilikom njihovog nošenja. Aktivni postupci redukcije buke su kompatibilni sa pasivnim, i kombinacijom ove dve tehnike, moguće je postići osetno smanjenje buke, u ušima korisnika, u skoro celom opsegu audio frekvencija.

Aktivna redukcija buke zasniva se na principu destruktivne interferencije između dva zvučna polja, jednog koje potiče od primarnog izvora buke, i drugog koje generiše sekundarni izvor zvuka, recimo zvučnik ili slušalica tj. slušni uložak. Pri tome, sekundarni izvor zvuka treba da proizvodi zvučno polje iste amplitude i suprotne faze (*antizvuk*) u odnosu na neželjeno zvučno polje.



Slika 9.29 - Princip rada aktivnog sistema za redukciju buke slušalice

Aktivna redukcija buke daje najbolje rezultate kada se radi o zvukovima niskih frekvencija gde su talasne dužine zvuka velike u poređenju sa prostorom u kojem treba oslabiti buku. U takvom slučaju, antizvuk je približno u kontra fazi sa primarnim zvukom u celokupnom prostoru. Zatvorena šupljina ispod školjke slušalice je upravo takav prostor, koji je mali u poređenju sa talasnom dužinom zvuka na niskim frekvencijama, gde je pasivno slabljenje buke malo i gde je moguće uspešno primeniti aktivno slabljenje buke.

Princip rada aktivnog sistema za redukciju buke, primenjenog na slušalice, prikazan je na slici 9.29. Mikrofon M, koji se nalazi u blizini ili u unurtašnjosti školjke slušalice, prima signal buke dat relacijom:

$$p_n(t) = p_n \cdot \cos \omega t \quad (9.13)$$

Ovaj signal se dalje pojačava i obrađuje u elektronskom sklopu – regulatoru (ER), tako da se dobije signal antibuke:

$$p_c(t) = -p_c \cdot \cos(\omega t + \theta) \quad (9.14)$$

gde je θ iznos fazne greške.

Signal $p_c(t)$ se reprodukuje preko slušnog uloška (slušalice u užem smislu reči), pri čemu između njega i signala buke na ulazu u ušni kanal dolazi do destruktivne interferencije. Slabljenje signala buke u prisustvu signala antibuke može se izračunati iz izraza:

$$\Delta L_n = 10 \log \left(\frac{p_n(t)}{p_n(t) + p_c(t)} \right)^2 = 10 \log \frac{1}{\left(1 - 2 \frac{p_c}{p_n} \cos \theta + \frac{p_c^2}{p_n^2} \right)} \quad (9.15)$$

odakle se vidi da je, u idealnom slušaju kada je $p_n = p_c$ i $\theta = 0$, njegova vrednost beskonačno velika. Drugim rečima, tačnost amplitude i faze signala generisane antibuke određuje stepen slabljenja buke koji je moguće postići. Na primer, za slabljenje buke od $\Delta L_n = 20\text{dB}$, fazna greška između signala buke i antibuke istih amplituda mora biti manja od 6° ; dok greška amplitude (ako su u kontrafazi) ne sme biti veća od 10%.

Elektronski sklopovi ili elektronski regulatori koji se koriste u postupcima aktivne redukcije buke mogu biti realizovani u analognoj ili digitalnoj tehnologiji, ili u njihovoj kombinaciji. Ako su realizovani u analognoj tehnologiji onda su njihove karaktersitike fiksne i ne menjaju se u vremenu zavisno od uslova korišćenja slušalica. Digitalna tehnologija pruža mogućnost da se realizuju regulatori sa promenljivim tj. adaptivnim karaktersitkama.

Za napajanje elektronskoih regulatora koji generišu signal antibuke koriste se baterije, koje se zajedno sa regulatorima smeštaju u kućište slušnog uložka tj. školjku slušalica.

Ovde treba napomenuti da slušalice kod kojih je potrebno smanjiti spoljašnju buku aktivnim postupcima, treba da reprodukuju elektronski generisani signal antibuke i korisni signal (govor, muzika, signali upozorenja i slično) koji ne sme ovim postupcima biti izmenjen.

Jedan od najvećih problema prilikom realizacije sistema za aktivnu redukciju buke jeste izbor odgovarajućeg slušnog uložka koji može da reprodukuje signal antibuke. On mora da bude dovoljno mali da bi se smestio u standardnu školjku slušalica, a da ima dobru reprodukciju niskih frekvencija. Takođe treba da ima takve karakteristike da može kvalitetno da reprodukuje korisne audio signale.

Situacija prilikom izbora mikrofona za prijem signala buke je mnogo povoljnija pošto na tržištu postoje minijturni elektretet mikrofoni koji su više nego adekvatni za ovu primenu.

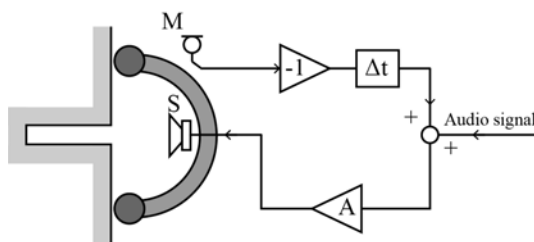
Analogni sistemi za aktivnu redukciju buke slušalica

Kada je u pitanju stacionarna buka i kada se radi o slušalicama za komercijalnu namenu uglavnom se koriste fiksni (analogni) regulatori koji su prostiji za realizaciju i jeftiniji od digitalnih. U primeni su dve vrste sistema za redukciju buke sa analognim regulatorima: sistemi sa otvorenom petljom i sistemi sa povratnom spregom.

Sistemi sa otvorenom petljom

U sistemima sa otvorenom petljom mikrofoni M se nalazi izvan školjke slušalica, slika 9.30. Prvi stepen elektronskog regulatora nakon mikrofona je mikrofonski pretpojačavač koji signal mikrofona pojačava na potreban nivo i obrće mu fazu za 180° . Ovaj signal se zatim mora zakasniti (elektronski blok označen sa Δt) da bi se kompenzovalo rastojanje koje buka treba da pređe od mesta merenja (pozicija mikrofona M) do mesta interferencije, ispred slušalice S.

Poslednji stepen u petlji obrade signala, označen sa A, je pojačavač koji omogućava podešavanje nivoa signala antibuke da bi rezultat destruktivne interferencije, u prostoru ispod školjke, bio što optimalniji.



Slika 9.30 - Sistem za aktivnu redukciju buke slušalica sa otvorenom petljom - principna blok šema

Korisni audio signal se u sistem regulacije uvodi neposredno ispred izlaznog pojačavača A, on ne trpi nikakve promene, i usled smanjenja nivoa buke na ulazu u ušni kanal, postaje čujniji i razumljiviji.

Sistemi sa otvorenom petljom su prosti ali ne daju tako dobru redukciju buke (oko 10 dB do 15 dB) kao neki složeniji sistemi o kojima će kasnije biti reči. Razlog tome je što se mikrofonski element nalazi izvan školjke tako da buka koju on prima nije potpuno identična sa bukom u unutrašnjosti školjke. Školjka, u određenoj meri, selektivno slabi spoljašnju buku a u prostoru ispod školjke dolazi do rezonansi, što dodatno menja spektar unutrašnje buke. Kao posledica ovoga, može se desiti da signal antibuke nema potrebnu amplitudu i fazu i da praktično "unos" buku u prostor ispod školjke.

Pored toga, sistemi sa otvorenom petljom nisu pogodni za različite korisnike, gde je potrebno individualno podešavanje iznosa antibuke da bi se dobili optimalni rezultati.

Sistemi sa povratnom spregom

Mnogo tačniji signal antibuke je moguće generisati ako se mikrofonski element postavi u unutrašnjost školjke, slika 9.31a. Na ovakav način se dobija sistem sa negativnom povratnom spregom.

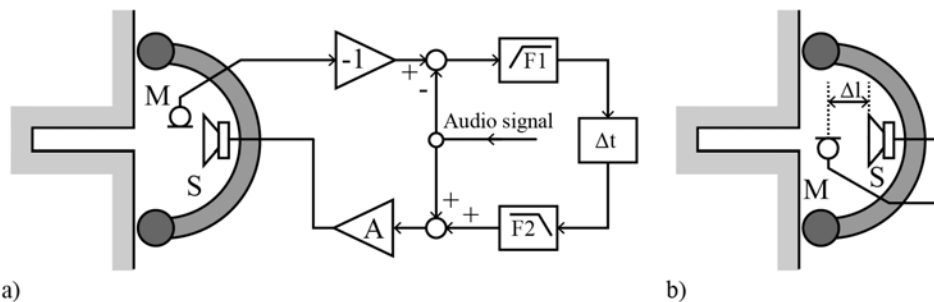
Iznos redukcije buke u ovom sistemu može se izračunati preko klasičnog izraza za pojačanje sistema u zatvorenoj petlji sa negativnom reakcijom:

$$\underline{H}_c = \frac{\underline{H}_c}{1 - \underline{H}_c \cdot \underline{H}_f} \quad (9.16)$$

gde je $\underline{H}_c$ prenosna funkcija školjke a $\underline{H}_f$ prenosna funkcija grane povratne sprege.

Što je veće H_f to je veća redukcija buke pod uslovom da je signal antibuke u kontra fazi sa signalom buke izvora. Mesto najvećeg slabljenja je na poziciji mikrofona. Da bi ovakav sistem bio stabilan potrebno je da kružno pojačanje $H_c H_f$ bude manje od 1. Ovakvi sistemi, sa povratnom spregom su skloni oscilovanju usled prevelike fazne razlike signala povratne sprege u odnosu na signal buke. Razlog tome je, u najvećoj meri, kašnjenje signala antibuke na putu Δl između slušalice i mikrofona, slika 9.31b, koje unosi dodatni fazni pomeraj između dva signala, koji se povećava sa frekvencijom.

Radi kompenzacije ovog kašnjenja, na put signala iz mikrofona postavlja se linija za kašnjenje Δt . Dovođenje faze i amplitude signala u granice koje obezbeđuju stabilan rad sistema na višim frekvencijama postiže se umetanjem filtra F2 propusnika niskih frekvencija, na put signala, što sa druge strane ograničava radni opseg ovakvog sistema na opseg nižih frekvencija.



Slika 9.31 - Sistem za aktivnu redukciju buke slušalice sa negativnom povratnom spregom: a) principna blok šema, b) akustički deo puta signala u zatvorenoj petlji

Svemu prethodnom se dodaje i filter F1 propusnik visokih frekvencija koji sprečava oscilacije na niskim frekvencijama do kojih može doći usled pomeranja glave korisnika i naglih promena uslova korišćenja slušalice.

Sistemi sa povratnom spregom dostižu vrednost redukcije buke i do 30 dB, ako se nalaze u školjkama sa dobrom pasivnom izolacijom.

Treba imati u vidu da je kod ovih sistema signal koji prima mikrofoni zbir preostalog signala buke i korisnog audio signala. Kada se ovom zbiru doda audio signal u kontrafazi u njemu ostaje samo signal buke. Na kraju, u izlaznom stepenu se remiksuju korisni audio signal i generisani signal antibuke da bi bili reprodukovani preko slušalice.

Većina današnjih komercijalnih slušalice za aktivnu redukciju buke poseduje upravo analogni sistem sa povratnom spregom.

Digitalni adaptivni sistemi za aktivnu redukciju buke slušalice

U praktičnoj primeni često postoji potreba da se karakteristike sistema prilagode promenjenim uslovima korišćenja slušalice kao što su: promena karakteristika buke okoline, promena korisnika, gde postoje individualne razlike u anatomiji glave i uva, i promena naleganja slušalice. U svim ovim slučajevima rešenje su digitalni adaptivni sistemi sa mogućnostima samopodešavanja i prilagođavanja. Moguće ih je realizovati u digitalnoj tehnologiji sa regulacijom unapred ili unazad (sa povratnom spregom). U osnovi to su adaptivni digitalni filtri, čiji se koeficijenti mogu menjati po datom algoritmu.

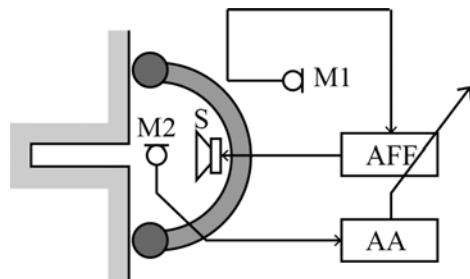
Digitalni adaptivni sistemi su složeniji i skuplji, ali su efikasniji od analognih, naročito u slučajevima kada se radi o promenljivoj buci, stacionarnoj uskopojasnoj buci i buci sa izrazito tonalnim karakteristikama.

Adaptivni sistemi sa regulacijom unapred

Ovakvi sistemi imaju dva mikrofona, od kojih se jedan nalazi izvan školjke slušalica (M1 ili referentni) a drugi u njenoj unutrašnjosti (M2 ili mikrofona greške), slika 9.32. Signal referentnog mikrofona se dovodi do procesora signala koji u ovom slučaju predstavlja adaptivni filter (AFF), gde služi kao osnova za genresiranje signala antibuke. Drugim rečima, signal referentnog mikrofona sadrži podatke o buci koje adaptivni filter tako obradi da se dobije odgovarajući signal antibuke. Rezultat ove obrade je utoliko tačniji što je stepen informacije o buci (koju treba redukovati), koji sadrži referentni signal veći.

Ako se radi o periodičnim signalima buke koje stvaraju različite mašine i uređaji, onda se umesto referentnog mikrofona može koristiti neki drugi senzor, kao što je recimo, tahometar.

U sistemima sa regulacijom unapred može nastati akustička povratna sprega između referentnog mikrofona i slušnog uloška koji reprodukuje signal antibuke. Ova pojava je posebno izražena kada se radi o otvorenim slušalicama, gde postoji značajna akustička sprega između slušnog uloška i referentnog mikrofona. Ovaj nedostatak je moguće umanjiti elektronski, uz određeno usložnjavanje sistema regulacije.



Slika 9.32 - Adaptivni sistem za aktivnu redukciju buke slušalica sa regulacijom unapred - principijska blok šema

Mikrofon greške M2, prima preostali signal (nakon početnog dejstva signala antibuke), koji služi kao ulazni podatak za adaptivni algoritam (AA), na bazi kojeg se vrši adaptacija, tj. promena koeficijenata filtera koji obrađuje referentni signal, težeći da se signal greške svede na minimalnu moguću meru.

Da bi se optimizirao signal greške koriste se različite vrste filtera (transverzalni, FIR, IIR, ...) i primenjuju različiti algoritmi, čije detaljnije objašnjenje zahteva više prostora i izlazi iz obima ove knjige.

Kod ovog sistema regulacije je veoma važno da vreme obrade signala bude manje od vremena propagacije akustičkog signala od referentnog

mikrofona do slušnog uložka (emitera antibuke). Ovakvo ograničenje ne postoji ako se radi o periodičnim signalima buke.

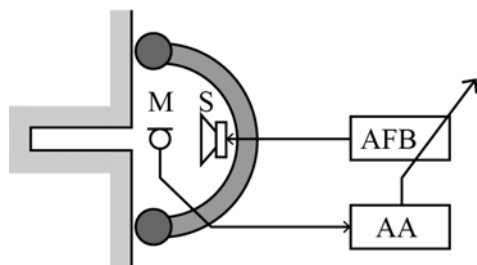
Kontrolni signali koji se generišu u adaptivnim sistemima sa regulacijom unapred ne stupaju u interferenciju sa bilo kojim korisnim audio signalom, koji ne prima referentni mikrofonski. Audio signal se uvodi u regulacioni sistem neposredno pre izlaznog pojačavača koji napaja slušni uložak.

U poređenju sa analognim sistemima sa povratnom spregom sa kojima se postiže solidno slabljenje širokopojasne buke, adaptivni digitalni sistemi sa kontrolom unapred, omogućavaju veće slabljenje promenljive, uskopolasne i tonalne buke.

Adaptivni sistemi sa regulacijom unapred u praksi pokazuju veću robusnost od adaptivnih sistema sa povratnom spregom, o kojima će biti reči u narednom odeljku.

Adaptivni sistemi sa povratnom spregom

Adaptivni sistemi sa regulacijom unazad, ili sa povratnom spregom, kao elektromski regulator koriste adaptivni filter (AFB) i odgovarajući algoritam (AA). Kod ovih sistema mikrofonske greške, koji se nalazi u školjci slušalice, slika 9.33, prima signal buke. Ovaj signal se dalje obrađuje u adaptivnom filteru (AFB) pod nadzorom adaptivnog algoritma (AA) radi generisanja signala antibuke, kojim se napaja slušni uložak. Adaptivni algoritam prati stanje signala greške, i sa njegovom promenom menja težinske koeficijente adaptivnog filtera tako da se signal greške minimizira.



Slika 9.33 - Adaptivni sistem za aktivnu redukciju buke slušalice sa povratnom spregom - principijska blok šema

Nedostatak ovog sistema (kao i svih sistema sa povratnom spregom) je njegova moguća nestabilnost na višim frekvencijama ili pri brzim promenama uslova korišćenja slušalice, kada fazna karakteristika nije lako kontrolisati, i kada povratna sprega može preći u pozitivnu.

Pomenuti problemi sa pozitivnom povratnom spregom se mogu do izvesne mere držati pod kontrolom ako se pojačanje elektronskog sklopa svede u prihvatljive granice, što sa druge strane pogoršava karakteristike sistema u pogledu stepena redukcije buke. Drugo rešenje je da se, visoke frekvencije u ulaznom signalu, koje se na drugi način ne mogu kontrolisati, ograniče odgovarajućim filtriranjem. Zbog toga ovakvi sistemi nisu efikasni

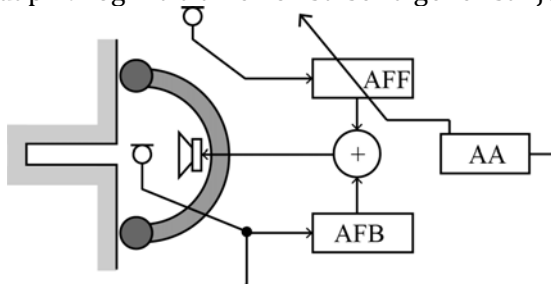
na višim frekvencijama počev od opsega (1-2) kHz, kao što su sistemi sa regulacijom unapred.

Međutim, karakteristike adaptivnih sistema sa regulacijom unapred veoma zavise od kvaliteta referentnog signala, i u mnogim slučajevima adaptivni sistemi sa povratnom spregom mogu imati iste ili bolje performanse. Njihove karakteristike, kada se radi o širokopojasnoj buci, su najvećim delom određene kašnjenjem signala u petlji povratne sprege. Ako želimo postići što bolje performanse mora se kašnjenje u povratnoj sprezi kod ovih sistema svesti na najmanju moguću meru. Izvesno poboljšanje je moguće postići što većim približavanjem mikrofona greške izvoru antibuke (slušni uložak).

Kod sistema sa povratnom spregom je potrebno preduzeti određene mere da se korisni audio signal sačuva od neželjenih promena.

Hibridni sistemi za aktivnu redukciju buke slušalica

Aktivni sistemi za kontrolu buke u kojima su kombinovane tehnika kontrole unapred i tehnika povratne sprege nazivaju se hibridni sistemi, slika 9.34. Kod ovih sistema se koriste i referentni i signal greške da bi se formirao kontrolni signal, tj. signal antibuke. Ovde je korisno uočiti razliku između hibridnih sistema i sistema sa kontrolom unapred koji takodje imaju dva mikrofona, i dva ulazna signala. U ovom drugom slučaju se signal greške koristi samo kao podatak algoritmu da prilagodi težinske koeficijente adaptivnog filtra a ne koristi se za generisanje signala antibuke.



Slika 9.34 - Hibridni sistem za aktivnu redukciju buke slušalica sa regulacijom unapred i povratnom spregom - principna blok šema

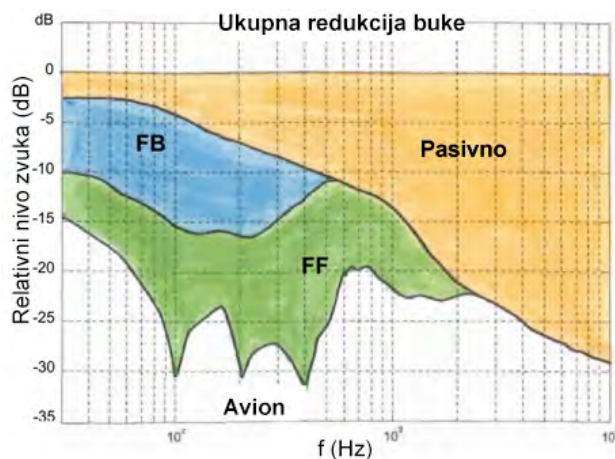
Hibridni sistemi objedinjavaju prednosti sistema sa regulacijom unapred i sistema sa povratnom spregom. Njihovo delovanje se, u odnosu na svaki pomenuti pojedinačni system, proširuje na širi opseg frekvencija, adaptabilni su i nisu suviše osetljivi na način na koji korisnik nosi slušalice. Kod njih je moguće primeniti manje pojačanje u povratnoj sprezi bez degradacije ukupnih performansi, čime se povećava margina stabilnosti.

Sa hibridnim sistemima je moguće ostvariti slabljenje kako širokopojasne stacionarne, tako i promenljive, uskopojasne i tonalne buke. Moguće ih je primeniti i na zatvorenim i na otvorenim slušalicama. Realizuju se u potpuno digitalnoj, slika 9.34, ili kombinaciji digitalne i analogne

tehnologije, zavisno od vrste buke i uslova primene. Poznato je da svi digitalni regulatori, usled vremena potrebnog za obradu signala, unose dodatno sopstveno kašnjenje, koje postaje problematično kada se radi o širokopojasnoj buci. Zato su analogni regulatori, sa povratnom spregom, još uvek, ekonomičnije rešenje u slučajevima kada je širokopojasna buka u pitanju. Međutim, kada se radi o promenljivoj uskopojasnoj buci onda su digitalni adaptivni regulatori efikasnije i ekonomičnije rešenje. Osnovni nedostatak hibridnih sistema za aktivnu redukciju buke slušalica je njihova relativno visoka cena.

9.10.3 Zajedničko dejstvo pasivne i aktivne redukcije buke kod slušalica

Učinak pasivnog i aktivnog prigušenja buke kod slušalica su komplementarni; pasivno daje dobre rezultate na višim frekvencijama a aktivno na nižim. Najbolji rezultati, u širokom opsegu frekvencija, se postižu delovanjem pasivnog prigušenja sa dodatkom aktivnog, hibridnog, realizovanog u čisto digitalnoj ili mešavini analogne i digitalne tehnologije.



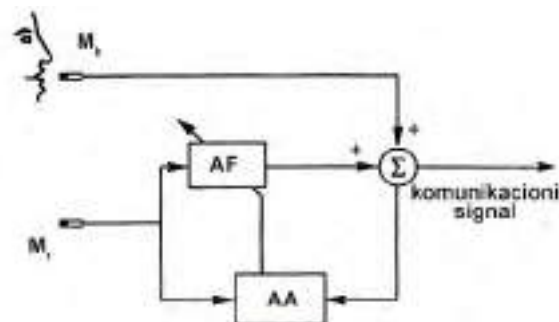
Slika 9.35 - Ukupna redukcija buke slušalica, predviđenih za korišćenje u avionima, primenom pasivnog i aktivnog postupka [32]

Na slici 9.35 je prikazan dijagram ukupne redukcije buke kod slušalica namenjenih za komunikaciju pilota aviona i helikoptera [32]. Pasivnim postupkom postiže se redukcija od oko (5 – 15) dB u opsegu frekvencija od (100 - 1000) Hz, i (20-30) dB iznad 2000 Hz. Dodatni doprinos hibridnog aktivnog sistema koji predstavlja kombinaciju sistema sa povratnom spregom, (polje označeno sa FB), i regulacijom unapred, (polje označeno sa FF) jasno je vidljiv u opsegu frekvencija od 30 Hz do 2000 Hz. Na dijagramu je primetno izrazito veliko slabljenje tonalnih komponenti buke na 100 Hz, 200 Hz i 400 Hz. Može se zaključiti da ukupno slabljenje buke na frekvencijama iznad 60 Hz prelazi 20 dB.

9.10.4 Slabljenje buke u komunikacionom kanalu naglavnih kombinacija

Naglavnu kombinaciju (*head set*) čine slušalice sa mikrofonom postavljenim na odgovarajućem prilagodljivom nosaču, tako da se može pozicionirati neposredno ispred ustiju korisnika. Kada se ovakva kombinacija koristi za komunikaciju u sredinama sa visokim nivoom buke uobičajeno je da mikrofonski signal bude usmeren, sa velikom osetljivošću u pravcu ose i potiskivanjem okolne buke iz ostalih pravaca. Kao dodatak ovome obično se na putu mikrofonskog signala postavlja automatski prekidač (*gate*) koji potpuno prekida kolo ukoliko nivo mikrofonskog signala padne ispod odgovarajućeg praga. Veza se uspostavlja samo u slučajevima kada postoji signal govora.

Međutim, sve navedeno nije dovoljno u određenim situacijama kada je okolna buka izuzetno jaka (recimo u kabinama aviona ili helikoptera) pa se mora dodatno primeniti redukcija šuma u komunikacionom kanalu na čijem je ulazu mikrofonski signal M_k , slika 9.36.



Slika 9.36 - Princip poništavanja neželjenog šuma u komunikacionom kanalu [8]

Kao što vidimo ovde se radi o adaptivnom sistemu sa regulacijom unapred [8] gde kao referentni mikrofonski signal M_r , može da se koristiti isti mikrofonski signal koji je sastavni deo sistema za redukciju buke slušalica.

9.11 Razlike i sličnosti između slušalica i zvučnika

Slušalice i zvučnici su u osnovi istovetni elektroakustički pretvarači. Međutim, njihovo prilagođavanje različitim načinima korišćenja uslovljeno je nastankom određenih razlika, kako u pojedinim sastavnim delovima, tako i u ukupnim karakteristikama.

I slušalice i zvučnici stvaraju zvučne talase koji na kraju završe u slušačevim ušima, gde počinje čitav proces slušanja. Međutim, zvuk slušalica stiže direktno do slušnog kanala dok zvuk zvučnika prethodno prođe kroz okolni prostor, gde može doći do njegove značajne promene. Usled toga se u praksi, gde je kvalitet reprodukcije jako važan, prave posebne

prostorije za slušanje reprodukovano materijala sa zvučnika. Upotreba slušalica je jednostavnija, jer ne treba voditi računa o akustici prostora u kojem se koriste. Međutim, zbog anatomske razlike u građi uva, isti par slušalica može različito zvučati kod različitih korisnika.

Muzika se u osnovi miksuje tako da dobro zvuči pri dvokanalnoj stereo reprodukciji (preko dva prostorno odvojena zvučnika). Kada slušamo zvučnike (stereo par), oba uva u svakom trenutku primaju zvuk i levog i desnog kanala, a zvučna slika se formira ispred slušaoca.

Reprodukcijom istog signala preko slušalica jedno uvo dobija samo polovinu stereo informacije, a mozak informacije od oba uva integriše u jednu zvučnu sliku. Slušalice zvučnu informaciju prenose do ušnog kanala direktno bez ikakvih promena ili preslušavanja. Usled toga pri slušanju sa slušalicama ima se utisak da zvuk stiže iz glave umesto iz okolnog prostora, što je slučaj kada se sluša preko zvučnika.

Ova pogrešna percepcija pozicije zvučnog izvora kod slušanja sa slušalicama, dovodi do znatnog gubitka prostorne reprodukcije u odnosu na slušanje pomoću zvučnika. Smatra se da je smanjenje ili uklanjanje ranih refleksija i reverbaracije razlog odvajanja zvučne slike iz spoljašnjeg konteksta i njeno smeštanje u poziciju glave slušaoca. Drugim rečima, korektna lokalizacija zvučne slike zahteva postojanje informacije o prostoru, njenoj živosti, zvučnim izvorima i njihovim lokacijama. Iz navedenog razloga, čak i veoma dobre slušalice mogu postati sasvim zamorne pri dužem vremenu slušanja.

Ovaj utisak je danas moguće u određenoj meri ispraviti korišćenjem odgovarajućih procesora zvuka, koji šalju deo signala sa jednog kanala na drugi i obrnuto, čineći da zvuk slušalica više liči na zvuk reprodukovano zvučnicima.

Slušalice mogu da reprodukuju potreban intenzitet zvuka bez bilo kakvih poteškoća, kao i da daju izvanredan kvalitet muzike bez obzira na akustičke karakteristike prostora u kojem se sluša. Pri tome ipak treba imati u vidu da su membrane slušalica mnogo manjih dimenzija od membrana zvučnika usled čega slušalice nikada ne mogu proizvesti tako snažne basove kao zvučnici. Kako membrane slušalica akustičku energiju zrače u mali prostor ušne školjke i slušnog kanala, u ušima se mogu čuti basovi istovetni onima koje stvaraju zvučnici, ali telo ne oseća vibracije koje nastaju pri reprodukciji niskih tonova preko snažnih zvučnika. Tu razliku pri slušanju sa slušalicama nikako nije moguće prevazići.

Sa druge strane, slušalice su u stanju da proizvedu mnoge detalje muzičkog signala, što ne mogu zvučnici. Refleksije i mešanje zvuka koje nastaje u prostoru pri reprodukciji preko zvučnika maskiraju pojedine detalje koji se mogu čuti samo preko slušalica.

Pored toga, slušalice mogu značajno da oslabe nivo ambijentalne buke koji postoji u prostoru u kojem se sluša, povećavajući na taj način dinamički opseg korisnog signala, bez bilo kakvih dodatnih ograničenja.

Zvučnici se mogu koristiti za grupno slušanje dok se slušalice koriste individualno. Za isti kvalitet reprodukcije zvučnici su mnogo skuplji nego slušalice, i manje su mobilni od njih.

Na kraju treba reći da među slušaocima muzike ne postoji konsenzus koji način reprodukcije daje bolje rezultate, i to se obično svodi na lični izbor.

Karakteristike slušalica namenjenih reprodukciji muzike, gde je subjektivni utisak jedan od glavnih kriterijuma kvaliteta, se značajno razlikuju od slušalica koje se koriste u komunikacijama i audiometriji. Pre svega, željeni frekventijski opseg, kod ove druge dve grupe slušalica je često uži. Takođe i drugi aspekti ljudskog sluha, kao što su: efekat okluzije, slabljenje ambijentalne buke, koštana provodljivost, interauralno slabljenje i osetljivost na curenje akustičke energije, mogu postati važni kod slušalica namenjenih telekomunikacijama i audiometriji.

9.12 Pitanja za proveru znanja

1. Koji su osnovni delovi slušalica?
2. Koje su osnovne karakteristike slušalica?
3. Koje su osnovne oblasti primene slušalica?
4. Koje vrste slušalica razlikujemo s obzirom na oblik nosača slušnih uložaka i načine naleganja na uvo?
5. Koje vrste slušnih uložaka razlikujemo s obzirom na način pretvaranja električnog signala u zvučni pritisak?
6. Šta je prenosna funkcija glave?
7. Objasniti šta je optimalna frekvencijska karaktersitika slušalica.
8. Kako se meri frekvencijska karakteristika slušalica?
9. Šta su otvorene, a šta zatvorene slušalice, objaniti njihove prednosti i nedostatke?
10. Objasniti princip rada elektrodinamičkih slušalica.
11. Objasniti princip rada elektrostatičkih slušalica.
12. Objasniti princip rada planarnih magnetnih slušalica.
13. Objasniti princip rada elektromagnetnih slušalica.
14. Objasniti princip rada piezoelektričnih slušalica.
15. Gde se koriste slušalice za redukciju buke?
16. Objasniti šta je pasivna a šta aktivna redukcija buke kod slušalica.
17. Objasniti analogne sisteme za aktivnu redukciju buke slušalica.
18. Objasniti digitalne adaptivne sisteme za aktivnu redukciju buke slušalica.
19. Objasniti hibridne sisteme za aktivnu redukciju buke slušalica.

20. Objasniti zajedničko delovanje pasivne i aktivne redukcije buke slušalica.
21. Objasniti način redukcije šuma u komunikacionom kanalu naglavnih kombinacija.
22. Navesti osnovne razlike i sličnosti između slušalica i zvučnika.

9.13 Literatura

- [1] L.L. Beranek, *Acoustics*, McGraw-Hill, 1954.
- [2] H.F. Olson, *Acoustical Engineering*, D.Van Nostrand Company, Inc., 1957.
- [3] J. Merhaut, *Theory of Electroacoustics*, McGraw-Hill, 1981.
- [4] H.Š. Kurtović, *Osnovi tehničke akustike*, Naučna knjiga, Beograd 1982.
- [5] F.E. Toole, „The Acoustics and Psychoacoustics of Headphones, *AES 2nd Intrenational Conference*, Paper C1006, May 1984.
- [6] G. Theile, "On the Standardization of the Frequency Response of High-Quality Studio Headphones," *JAES*, Vol.34, No.12, December 1986.
- [7] C.A. Poldy. *Chapter 14 Headphones*, Loudspeaker and Headphone Handbook. Ed. J. Borwick. Focal Press, Third Edition, 2001.
- [8] C.H. Hansen, *Understanding Active Noise Concellation*, Taylor & Francis, 2001.
- [9] B. Rafaely, "Active noise reducing headset – an overview", *The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, August 2001*.
- [10] L. Håkansson, S. Johansson, M. Dahl, P. Sjösten, and I. Claesson, "Noise Canceling Headsets for Speech Communication", chapter 12 in book: G. M. Davis, editor, *Noise Reduction in Speech Applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2002.
- [11] ISO 11904-1:2002, Acoustics — Determination of sound immission from sound sources placed close to the ear — Part 1: Technique using a microphone in a real ear (MIRE technique).
- [12] ISO 11904-1:2004, Acoustics — Determination of sound immission from sound sources placed close to the ear — Part 2: Technique using a manikin (manikin technique).
- [13] C. Poldy, „Headphone fundamentals“, *AES 120th Conv.*, Tutorial 48, May 2006.
- [14] M.R.Avis and L.J.Kelly, "Principles of headphone design – a tutorial review", *Audio at home – AES 21st UK conference*, 2006.
- [15] P.Pravica, D. Drinčić, *Elektroakustika*, VIŠER, Beograd, 2008.
- [16] IEC 60318-4:2010 Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 4: Occluded-ear simulator for the measurement of earphones coupled to the ear by means of ear inserts.
- [17] IEC 60268-7:2010, Sound system equipment - Part 7: Headphones and earphones.

- [18] IEC 60318-7:2011, Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 7: Head and torso simulator for acoustic measurement of hearing aids.
- [19] Recommendation ITU – T57. 2011, Artificial ears.
- [20] T. Hertsens, „How Planar Magnetic Headphones Work“ Inner Fidelity, may 2011.
- [21] S. Thomas, J. Finn and B. Jörg, „*Measuring HRTFs of Brüel & Kjær Type 4128-C, G.R.A.S. KEMAR Type 45BM, and Head Acoustics HMS II.3 Head and Torso Simulators*“, Technical University of Denmark, 2011.
- [22] L.L. Beranek and T.J. Mellow, *Acoustics, Sound Fields and Transducers*, Elsevier, 2012.
- [23] M. Kleiner, *Electroacoustics*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012 .
- [24] Acoustic interface design Guide, Knowles, 2012.
- [25] Recommendation ITU – T58. 2013, Head and torso simulator for telephonometry.
- [26] C. Struck, „Free Plus Diffuse Sound Field Target Earphone Response Derived From Classical Room Acoustics Theory“, *AES 135th Conv.*, Paper 8993, October 2013.
- [27] S. E. Olive, T. Welti, and E. McMullin, „Listener Preferences for In-Room Loudspeaker and Headphone Target Responses“ *AES 135th Conv.*, Paper 8994, October 2013.
- [28] T. Hertsens, „Headphone Measurement Datasheets“, *Inner Fidelity*, 2016.
- [29] T. Hertsens, „Headphone Measurements Explained“, <http://www.innerfidelity.com/headphone-measurements-explained> (preuzeto: dec. 2016.).
- [30] Brüel & Kjær, Artificial Ears — Types 4152 and 4153, Product Data.
- [31] Brüel & Kjær, Head and Torso Simulator Types 4128-C and 4128-D Handset Positioner for HATS Type 4606.
- [32] Sennheiser electronic GmbH & Co., S1 digital - noisegard™ .

Muzička akustika

10.1 Uvod

Muzička akustika je deo akustike koji se bavi proučavanjem načina rada i analizom zvučanja muzičkih instrumenata, kao i analizom muzičkih tonova i tonskih sistema. Takođe, muzička akustika prati istorijski razvoj muzičkih instrumenata i muzike kao estetizovane forma zvuka, pružajući informacije koje se mogu koristiti u svakodnevnoj inženjerskoj i snimateljskoj praksi. U sledećem poglavlju će biti obrađeni osnovni pojmovi muzičke akustike, istorijski razvoj i podela klasičnih muzičkih instrumenata, kao i osnove razvoja i strukture muzičkih skala.

10.2 Istorija razvoja muzičke akustike

Starogrčki filozof Pitagora (oko 570 – 500 p.n.e.) se, po zvaničnom tumačenju razvoja savremene nauke, smatra prvim misliocem koji je čvrsto držao do uverenja da ključevi razumevanja prirode i harmonije leže u odnosima muzičkih intervala i prirodnih brojeva. Ovakav stav je bio utemeljen i u Arhimedovom pogledu na svet, koji je postao baza razvoja sveukupne zapadne naučne misli.

Muzika je predstavljala veoma važan deo života u Staroj Grčkoj. Smatra se da su svi građani imali neko muzičko obrazovanje i da su bili u mogućnosti da uzmu učešće u muzičkom životu koji je pratio javne događaje u gradu. Platon je muzici dodelio istaknutu ulogu u obrazovanju, tvrdeći da muzika doprinosi izgradnji neke vrste unutrašnje harmonije kod čoveka.

Nažalost, danas nemamo tačna saznanja o tome kako je zapravo zvučala muzika u kojoj su uživali Stari Grci. Umesto toga, ostao je zabeležen njihov doprinos teoriji muzike.

Počeci teorije muzike se vezuju za pomenutog grčkog matematičara Pitagoru i njegove sledbenike, pitagorejce. Polazeći od rezultata koje su dobili izučavajući harmonijske odnose u muzici, oni dolaze do zaključka da je u osnovi svega postojećeg, pa tako i muzike – broj. Smatrali su da su principi matematike principi prirode kao celine i da se harmonija univerzuma zasniva na harmoničnim odnosima među brojevima. Početna tačka tog prilično generalnog verovanja bila je otkriće tzv. zakona malih celih brojeva koji na matematički način opisuje razliku između našeg osećaja konsonantnosti (harmonije) i disonantnosti.

Pitagorin zakon malih brojeva kaže da su dva tona konsonantna ako im frekvencije stoje u odnosu malih prirodnih brojeva. Pitagora je do tog zakona došao polazeći od rezultata eksperimenata sa zategnutim žicama različitih dužina ili staklenim sudovima u kojima se nalaze različite količine vode. Ako krenemo od žice određene debljine, onda visina tona koju ona proizvodi zavisi od njene dužine: što je žica kraća, to je ton viši. Ako žicu skratimo na njenu polovinu (odnos 1:2), ton će se povisiti za oktavu, ako je skratimo za jednu trećinu (odnos 2:3), ton će skočiti za kvintu, a ako žicu skratimo za jednu četvrtinu (odnos 3:4), ton će biti viši za kvartu. Skraćivanjem dužine žice povećavamo frekvenciju tona koji ona proizvodi, dok mi na subjektivan način procenjujemo odnose visina tako proizvedenih tonova kao odnose koji nam zvuče harmonično (konsonantno) ili disharmonično (disonantno).

Pitagorejci su, dakle, otkrili da je odnos frekvencija između nekog tona i tona koji je za oktavu viši 1:2, između tona i njegove kvinte 2:3, između tona i njegove kvarte 3:4, itd. Prirodno je zapitati se kako je i zašto naš subjektivan osećaj harmonije (konsonantnosti) povezan sa odnosima 1:2, 2:3, 3:4,...? Zašto su upravo ti odnosi prijatni za nas i da li postoji neko racionalno i naučno objašnjenje ovog fenomena? Pitagora i njegovi sledbenici su kao objašnjenje ponudili sveobuhvatnu teoriju harmonije koja je prirodno dovela do potrebe da se izučavaju pre svega prirodni brojevi i njihovi odnosi.

Interesantno je da su Pitagorejci od otkrića iracionalnosti broja došli izučavajući jedan prirodan „muzički problem“. Znajući da oktavi odgovara odnos 1:2 između dužina odgovarajućih zategnutih žica, kao logično se postavilo pitanje kolika je dužina žice čiji ton deli oktavu na dva jednaka dela? Ako tu nepoznatu dužinu označimo sa x , dolazimo do sledeće jednačine; tj. . Ovaj broj Pitagorejci nisu mogli napisati kao odnos dva prirodna broja (je iracionalan broj), što se potpuno kosilo sa njihovom osnovnom pretpostavkom da se svi bitni muzički intervali mogu izraziti odnosima malih prirodnih brojeva . Ovo otkriće da već tako jednostavno definisan muzički interval (polovina oktave) ne može biti opisan kao odnos dva prirodna broja, prouzrokovalo je pravu krizu u pitagorejskoj teoriji i jedno vreme je strogo čuvano kao tajna. Pa ipak, ovakva božanska, čisto matematička veza između muzičkih intervala i ljudskog osećaja za lepo se održala sve do kraja XVI veka, doba renesanse, preporoda i ubrzanja u razvoju nauke.

Rene Dekart (Rene Decartes, 1596. – 1650.), jedan od najvećih mislilaca svoga doba, svojim postignućima na polju matematike, prirodnih nauka i filozofije ostavio je neizbrisiv trag u razvoju kompletne naučne misli tokom vekova koji su ga nasledili. Nešto manje je poznata činjenica da njegovo intelektualno zaveštanje podrazumeva i jasan doprinos na polju

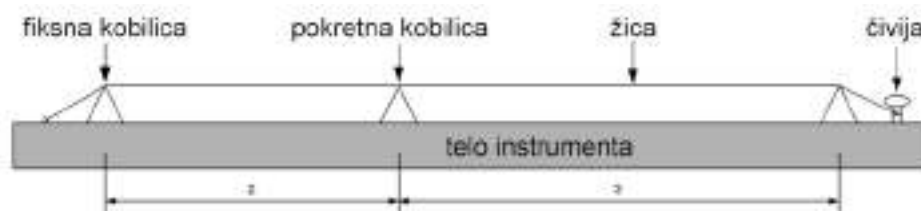
razumevanja muzike. Upravo ovoj temi posvetio je svoje prvo do kraja zaokruženo delo pod imenom *Compendium Musicae*, koje je napisao u 21. godini života. U trinaest poglavlja ovog traktata, Dekart je stigao da se pozabavi gotovo svim aspektima muzičke teorije: analizom procesa slušanja i strukturom ljudskog čula sluha, prostiranjem zvuka, muzičkim intervalima, pojmovima konsonance i disonance, tonalnim sistemima i melodijom, učenjem sviranja i komponovanja, kao i estetikom muzike.

Dekartovo bavljenje ovom temom svakako treba posmatrati u kontekstu aktuelnih dostignuća u razvoju ljudske misli na prelazu iz XVI u XVII vek. Aristotelijanstvo, kao dominantna naučna dogma srednjevekovne Evrope, podrazumevalo je jasnu distinkciju između matematike i fizike, tj. sveta nebeske nepromenljivosti (matematika) i zemaljske nestalnosti (fizika). Dekart, kao jedan od pionira nove filozofske misli, jasno je naglašavao da razumevanje prirode zahteva upotrebu matematike na nov način, pri čemu je u ovakvu „duhovnu avanturu“ zakoračio upravo kroz kraljevstvo zvuka i muzike. Starogrčki, pitagorejsko-matematički pogled na muziku, ovu pojavu je smeštao u sferu božanskog, nedodirljivog, ni na jedan način je ne povezujući sa zemaljskim i fizičkim. Stoga nije teško shvatiti koliko je za to vreme napredno zvučala misao kojom je Dekart ovaj traktat započeo, a koja za muziku kaže da je „objekat zvuka“. Ovo zbilja jeste prava naučna revolucija u pogledu na muziku, koja je iz domena božanske sile po prvi put prevodi u materijalni fenomen. Sa Dekartom muzika počinje da biva analizirana kao fizička stimulacija čula sluha, koja „zadovoljava i pobuđuje različite emocije“, koje su empirijska, merljiva stanja, čiji je intenzitet u direktnoj srazmeri sa isto tako merljivom magnitudom pobude čula. Ova pobuda proizvodi osećaj zadovoljstva koji nije ništa drugo do „neka vrsta proporcije između objekta i osećaja sopstva“, i može se analizirati putem „razlika u trajanju ili u vremenu, kao i razlikama u tenziji, od visoke do niske“. Dekart konstatuje da muzika različitog tempa i ritma proizvodi različita osećanja: „Sporiji tempo uzdiže u nama tiša osećanja poput opuštenosti, tuge, straha ili ponosa, dok brža muzika proizvodi i brža osećanja, poput sreće i ushićenja“, dok „tročetvrtinski takt okupira čula više od dvočetvrtinskog, jer u njemu ima više stvari koje se mogu opažati“. Dekart, dakle, odlazi korak dalje, i po prvi put muziku smešta u trodimenzionalni prostor matematičko/fizičko/ psihološke realnosti, u kojem se ona i dan danas kreće i obitava.

Dekart je bio i prvi naučnik koji je izneo i svoje zapažanje o načinu na koji okidanje žice na lauti dovodi do vibriranja i svih onih žica koje su po štimu više za pravilan iznos terce ili kvinte, time ukazujući na fizičku vezu između muzičkih intervala. Upravo su ova njegova pionirska zapažanja dovela do otkrića onoga što se danas opisuje terminom harmonskog niza.

I dok su Dekartovi revolucionarni doprinosi filozofskim idejama o odnosu muzike i prirode ostali pomalo skriveni u prohujalim vekovima,

pravim kamenom temeljcem muzičke akustike kao nauke smatra se delo pod nazivom „O osećaju zvuka“ (Tonempfindungen, 1862.) znamenitog Nemačkog fizičara Hermana fon Helmholca (Hermann Von Helmholtz, 1821.-1894.). Helmholcovi radovi su utrli put akustici kao potpuno posebnoj grani unutar fizike i muzičkoj akustici kao disciplini sa specifičnim ciljevima i zadacima. Nakon što je Lord Rejli (Lord Rayleigh, 1842. – 1919.) objavio svoje delo „Teorija zvuka“ (Theory of Sound, 1877.), dolazi do prave lavine kako teorijskih, tako i eksperimentalnih doprinosa u ovoj sferi, koji su doveli do konačnog razumevanja fizičkih zakona koji stoje u osnovi nauke o zvuku.



Slika 10.1 – Šematski prikaz tipičnog izgleda prostog žičanog instrumenta monokorda (štimovan na interval kvinte)

Muzička akustika je grana akustike koja za cilj ima da objasni fenomen muzike, kako u smislu fizičkih zakona koji dovode do toga da muzički instrumenti mogu na adekvatan način da proizvode muzičke tonove, tako i u smislu pojašnjavanja muzičkih lestvica i intervala, te njihovog dovođenja u vezu sa ljudskim osećajem za harmoniju. Ovaj deo akustike je, dakle, izrazito multidisciplinaran, i ne može do kraja biti zaokružen bez međusobnog prožimanja fizike, matematike i psihoakustike, ali i nauke o materijalima, hemije i mehanike.

Svi akustični muzički instrumenti se dele u tri osnovne grupe:

- Žičani instrumenti
- Duvački instrumenti
- Perkusivni instrumenti

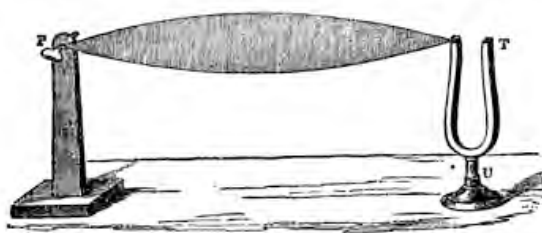
I dok se perkusivni instrumenti smatraju prvim tipom korišćenih instrumenata, koji se mogu sresti kod svih, pa i najprimitivnijih kultura, žičani instrumenti su, zbog svoje jednostavne konstrukcije i lakoće manipulacije, prvi bili analizirani naučnim metodama. Prvi nama poznati rezultati praktične analize rada muzičkog instrumenta su vezani za prost starogrčki žičani instrument monokord, koji je šematski prikazan na slici 10.1. Monokord se sastoji od rezonatorske kutije sa jednom zategnutom žicom i mostićem koji se mogao pomerati kako bi se dobijali tonovi različite visine. Monokord se u upotrebi zadržao sve do XVI veka u crkvenim školama i manastirima.

Ono što je Pitagora analizom ovog instrumenta ustanovio je da postoji direktna veza između visine tona i dužine žice koja se okida:

polovljenjem dužine žice visina tona proizvedenog njenim okidanjem se izdiže tačno za oktavu. Visina tona ne zavisi samo od njene dužine, već i od tenzije. Rezultate ovakvih eksperimenata koji u vezu dovode dužinu i tenziju žice sa periodom njenog oscilovanja je prvi, u formi zakona, do kraja formulisao Dekartov savremenik, francuski matematičar Mersen (Marin Mersenne, 1588. - 1648.) u svom delu *Harmonie Universselle* (1636.). Ovi, tzv. Mersenovi zakoni, glase:

- Kada se žica i tenzija žice ne menjaju, a menja se njena dužina, perioda vibracije je direktno srazmerna dužini žice. (Pitagorin zakon)
- Kada se žica i dužina žice ne menjaju, a menja se njena tenzija, frekvencija vibracije je direktno srazmerna kvadratnom korenu tenzije žice.
- Za različite žice iste dužine i tenzije, perioda vibracije je proporcionalna kvadratnom korenu težine žice.

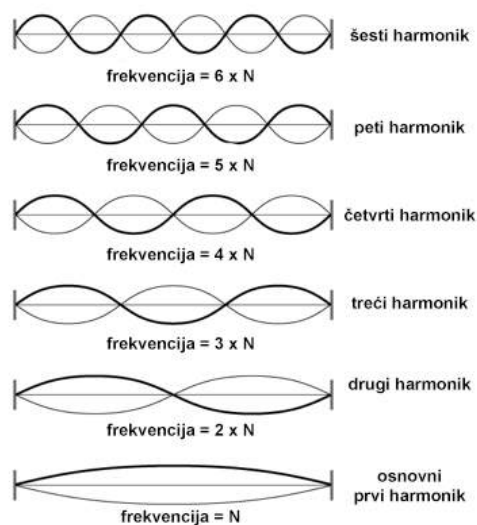
Ovako formulisani zakoni zaista precizno objašnjavaju vezu između visine tona odsviranog na žici i svojstava same žice koja se okida. Međutim, tek nekih dva veka kasnije fenomen oscilovanja žice biva do kraja objašnjen. Naime, nemački fizičar Melde (Franz Melde, 1832. – 1901.) je svojim čuvenim eksperimentom (1859.), slika 10.2, pokazao da pobuđena žica u istom trenutku osciluje različitim frekvencijama, pri čemu su sve te frekvencije celobrojni umnošci jednog istog broja – broja koji definiše tzv. osnovnu učestanost oscilovanja žice. Kako bi do kraja objasnio uočenu pojavu, Melde je u nauku uveo pojam stojećih talasa, kojim se opisuje ovakav način uvek i iznova istog ponašanja stacionarnog sistema koji se primorava na oscilovanje.



Slika 10.2 - Grafički prikaz osnovne postavke Meldeovog eksperimenta

Svaki od harmonika u ovako generisanom harmonskom nizu se može predstaviti prostim sinusnim tonom, slika 10.3. Dakle, svaki složen ton proizveden bilo kojim muzičkim instrumentom, može se predstaviti kao niz prostih tonova. Najniža učestanost oscilovanja, koja se naziva osnovni harmonik (fundament) definiše subjektivnu percepciju visine odsviranog tona.

Osim visine, kao bitna karakteristika muzičkog tona definiše se i njegova boja. Po boji razlikujemo instrumente različite vrste. Helmholtz je bio taj koji je na osnovu rezultata Meldeovog eksperimenta ustanovio da je boja zvuka određena međusobnim energetskim odnosima pojedinačnih komponenti u pobuđenom nizu frekvencija. Ovaj niz se naziva harmonski niz dok se pojedinačni elementi ovog niza zovu harmonici. Dakle, boja zvuka je određena odnosima u kojima se različiti harmonici čuju u harmonskom nizu.



Slika 10.3 – Grafički prikaz stojećih talasa – harmonika, koji se formiraju u žici koja osciluje osnovnom učestnošću N

Nakon razumevanja načina na koji osciluje žica, dalja analiza žičanih instrumenata se obavlja kroz analizu načina na koji se oscilacije žice prenose na telo rezonatora instrumenta, kao i samog zračenja na taj način pobuđenog rezonatora u okolni prostor. U formalnijem smislu, analiza svih muzičkih instrumenata se odvija kroz analizu sledećih komponenti koje učestvuju u procesu stvaranja zvuka:

- Izvor oscilacija, koji predstavlja inicijalnu silu koja dovodi do generisanja oscilacija (okidanje, prelazak gudalom ili udaranje žice, uduvavanje vazduha u cev duvačkog instrumenta, udaranje u membranu);
- Element koji osciluje;
- Rezonator – telo instrumenta;
- Zračenje akustičke energije rezonatora u okolnu sredinu.

U praksi se sreću tri osnovna elementa koji se pobuđuju na oscilovanje kod muzičkih instrumenata, na osnovu kojih je izvršena i podela na osnovne grupe instrumenata, i to:

- Žica – žičani instrumenti;

- Vazdušni stub – duvački instrumenti;
- Membrana – perkusivni instrumenti.

Svaki od ovih elemenata nakon pobude proizvodi veliki broj harmonika. Na koji će način tačno biti pobuđen oscilujući element, tj. kako će tačno izgledati harmonski niz koji se generiše, direktno zavisi od načina na koji se vrši pobuda, tj. od tehnike sviranja: okidanje žice gitare bliže vratu proizvodi drugačiji zvuk u odnosu na okidanje bliže kraju žice, pri čemu se dodatne varijacije postižu različitim načinima okidanja žice: sa ili bez trzalice, noktima, jagodicama prstiju i sl.; specifičnim načinima uduvavanja vazduha u cev instrumenta mogu se proizvesti različite boje istog tona na jednom istom instrumentu; udaranje membrane doboša bliže obodu ili centru membrane daje potpuno različite rezultate u boji konačnog zvuka. Dakle, pobuda elementa koji osciluje apsolutno nije jednoznačna, i samom muzičaru ostavlja veliki broj mogućnosti da krene u kreiranje svakog pojedinačnog tona.

Rezonatorske kutije, koje za cilj imaju da ovako generisane oscilacije pojačavaju, u zavisnosti od dizajna, oblika, veličine i vrste materijala određene harmonike ističu, a određene potiskuju. Dakle, na konačnu boju tona koji proizvodi neki muzički instrument utiču apsolutno svi elementi: od tehnike i načina sviranja pa sve do svih detalja prisutnih u njegovoj izradi, zaključno sa vrstama legura, lakova ili boja koje se koriste u završnoj obradi.

Žičani instrumenti se, po načinu pobude žice, dele u tri osnovne grupe:

- Gudački (violina, viola, violončelo, kontrabas);
- Trzani (gitara, harfa);
- Udarni (cimbalo, klavir).

Duvački instrumenti, naravno, imaju identične osnovne principe funkcionisanja, samo se za pobudu na oscilovanje ne koriti žica već vazdušni stub u cevi instrumenta. Da bi se vazdušni stub pokrenuo na oscilovanje neophodno je da inicijalna pobuda ima kvalitet treperenja vazduha i to frekvencijom u čujnom opsegu. Deo instrumenta gde se generiše ovakav tip pobude naziva se usnik. Postoje različite vrste usnika: usnici koji se stavljaju između usana, usnici na koje se prisanjaju usne, kružni, sa trskom, sa dve trske. U odnosu na materijal od kojeg su izrađeni, duvački instrumenti se dele na:

- Drvene duvačke instrumente: flauta, pikolo flauta, oboa, engleski rog, klarinet, fagot i saksofon (flauta, pikolo i saksofon se danas prave od plemenitih legura metala, ali su inicijalno izrađivani od drveta, najčešće abonosovine)
- Limene duvačke instrumente: truba, trombon, tuba i horna.

Kao posebno izdvojene instrumente koji proizvode zvuk oscilovanjem vazduha, ali se u njih vazduh ne uduvava, možemo posmatrati orgulje, harmonijum i harmoniku.



Slika 10.4 - Struktura simfonijskog orkestra

Kod perkusivnih instrumenata, osnovna podela je na instrumente sa određenom i neodređenom visinom tona. Dodatna podela je na:

- Opnozvučne, kod kojih udarac prima opna, odnosno membrana. U ovu vrstu spadaju različiti timpani, razne vrste bubnjeva i sl.
- Metalozvučne, kod kojih se zvuk proizvodi udarcem palice u metalne cevi, pločice ili šipke. U ovu vrstu spadaju: metalofon, vibrafon, trijagi, razni zvončići, činele, gongovi i sl.
- Drvozvučne, kod kojih se zvuk proizvodi udarcem palice u drvene štapove, kutije ili pločice. U ovu vrstu spadaju: klaves, marimba, kastanjete, ksilofon i sl.

Muzički instrumenti su se kroz istoriju razvijali na različite načine, prilagođavajući se po izgledu i konstrukciji zahtevima muzike, muzičkih kompozitora i izvođača. Današnji izgled i zvučanje muzičkih instrumenata je posledica viševjekovnog razvoja i usavršavanja, a rezultat svega toga se najbolje može videti u sagledavanju strukture simfonijskog orkestra, slika 10.4, koji u svom stalnom, ili povremenom sastavu, okuplja praktično sve klasične akustične instrumente koji su danas u upotrebi.

10.3 Muzičke skale

Kao što je teško definisati šta je matematika, do sličnog problema dolazimo i kada treba definisati muziku. Muzika je za mnoge ljude neverbalna forma komunikacije koja dotiče ljudski intelekt i može da izazove duboke, pa čak i burne emocije.

Drugi smatraju da je muzika pre svega fenomen prirode, rezultat principa fizike i matematike, a da su ljudi samo otkrili, prepoznali i naučili da manipulišu s njom. Možemo takođe reći da je muzika kombinacija zvukova koji su organizovani u tri dimenzije: ritam, melodija i harmonija. No, u tom slučaju isključujemo neke savremene muzičke forme, poput muzičkih eksperimenata Džona Kejdža i drugih savremenih kompozitora. Po nekim slobodnijim definicijama, muzika je bilo koja kombinacija zvukova koju neko negde uživa i sluša.

Osim analize načina na koji muzički instrumenti „rade“, muzička akustika se bavi i analizom muzike i muzičkih instrumenata sa aspekta frekvencijskog sadržaja, opsega dinamike, ritmičke i melodijske strukture, teorije muzike i sl. Kao što su se razvijali muzički instrumenti, tako se razvijala i muzika, u smislu njenog načina komponovanja, sviranja i zapisivanja. Razvoj muzičkih skala je tekao kroz vekove, imao je više različitih tokova i etapa u razvoju, da bi se u našem vremenu, u onome što se označava terminom „zapadna muzika“, zadržao u strukturi tzv. temperovane muzičke skale.

Skala je niz više uzastopnih tonova koji se penju od jednog tona do drugog, kao po nekoj lestvici. Ovakvo slaganje i kombinovanje tonova se u principu može realizovati na mnogo različitih načina. U različitim kulturama širom sveta koriste se različite skale, koje često mogu zvučati i veoma čudno u odnosu na ono što smo navikli svakodnevno da slušamo. Strukture skala koje koriste različite kulture daju osnovnu atmosferu kojom zrači njihova muzika, jer se note tih skala koriste kao osnov za kreiranje melodija i harmonija.

U osnovi zapadne muzičke kulture nalaze se tzv. dijatonske skale. Sve one koriste tonove jedne oktave koju čini 12 polustepena. Postoje razne skale koje su izgrađene od različitih kombinacija polustepena i celih stepena koji grade opseg jedne oktave. Najpoznatije su durska (jonska) i molska (eolska) skala. Obe ove skale možemo pronaći još kod Starih Grka.

Svi tonovi tzv. Hromatske (Pitagorejske) skale mogu se dobiti jednostavnim matematičkim postupkom koji se bazira na korišćenju dve osnovne činjenice: da se frekvencije osnovnog tona i tona koji je za oktavu viši odnose kao 1:2, a tona i njegove kvinte kao 2:3. Drugim rečima, ako osnovni ton ima frekvenciju f , onda gornja kvinta tog tona ima frekvenciju $(3/2)f$, a oktava iznad frekvenciju $2f$. Kad se popnemo u sledeću oktavu, možemo se vratiti u nižu množeći datu frekvenciju sa $\frac{1}{2}$. Ako frekvenciju

tona „C” uzmemo kao osnovnu tj. kao broj 1, za ostale tonove u hromatskoj skali dobijamo odnose frekvencija u odnosu na tu početnu kako je dato u tabeli 10.1.

Tabela 10.1 – Međusobni odnosi tonova u jednoj oktavi tzv. pitagorijske hromatske skale

C	D	E	F	G	A	H	C
1	9/8	81/32	4/3	3/2	27/16	243/128	2

Istim postupkom možemo dobiti i odnose svih polutonova u skali (crne dirke na klavijaturi), a od svakog od tih tonova možemo izgraditi dursku odnosno molsku skalu.

Pitagorejska skala je matematički perfektna u odnosu na početni ton od koga smo krenuli u njeno formiranje, ali ima svoje nedostatke čim za notni centar uzmemo neki drugi ton, tj. čim pokušamo da promenimo tonalitet. Taj nedostatak su muzičari u XVII veku ispravljali tako što su svaki put kada su trebali da sviraju u drugom tonalitetu, štimeri istrčavali na scenu i ponovo naštimovali instrumente, sada u tom novom tonalitetu. Ovakav „haos” koji proizilazi iz striktne primene matematičke harmonije na praktične principe štimovanja instrumenata i formiranja muzičkih skala, jednostavno nije bio održiv.

Da bi se prevazišli ovi problemi, predlagana su različita rešenja. Među njima je bio i predlog jednako temperovanu skale, već pomenutog Marina Mersena. U ovoj skali svaki sledeći polustepen u svakoj oktavi ima konstantan odnos frekvencije prema prethodnom (dvanaesti koren iz 2). Koristeći ovako temperovanu skalu kompozicije su se mogle transponovati („transilirati”) iz jednog tonaliteta u drugi, a da pri tome odnos između tonova ostane isti.

Naravno, cena ovakvog rešenja postoji: intervali između tonova nisu više idealni i do kraja matematički perfektni, onako kako ih je shvatio i objasnio Pitagora (možda je to razlog što muzičari nisu odmah prihvatili jednako temperovanu skalu). Ova odstupanja, dakle, postoje, ali je činjenica da su toliko mala da vrlo mali broj ljudi uopšte primećuje razliku. Dobitak koji je ovakvim formiranjem lestvice ostvaren - da se na istom instrumentu bez ponovnog štimanja mogu svirati kompozicije u bilo kom od 12 durskih ili 12 molskih tonaliteta, je bio prevelik da bi tek tako bio prenebregnut.

Johan Sebastijan Bah je bio toliko oduševljen ovakvim načinom štimovanja klavira, da je napisao svoje dve čuvene zbirke kompozicija za „Dobro temperovani klavir” (1722), sa po 24 preludijuma i fuga, svaka u različitom tonalitetu.

10.4 Pitanja za proveru znanja

1. Objasniti pitagorejski odnos prema muzici.
2. Koje su tri osnovne grupe muzičkih instrumenata?
3. Objasniti način oscilovanja žice.
4. Koja je uloga rezonatorske kutije kod muzičkih instrumenata?
5. Podela žičanih instrumenata.
6. Kako se dele duvački instrumenti prema materijalu od kojeg su napravljeni?
7. Koja je osnovna podela perkusionih instrumenata?
8. Koje grupe instrumenata se prepoznaju u savremenom simfonijskom orkestru?

10.5 Literatura

- [1] H. F. Olson, *Music, Physics and Engineering*, Dover Publications, Second edition, 1967.
- [2] S. J. Jeans, *Science and Music*, Dover Publications, 1968.
- [3] A. Chaigne, J. Kergomard, *Acoustics of Musical Instruments*, Springer-Verlag New York, 2016.

Ultrazvuk

11.1 Uvod

Termin ultrazvuk se koristi da opiše akustičke talase čije frekvencije oscilovanja premašuju gornju granicu čujnosti ljudskog čula sluha. Dakle, svaki akustički talas frekvencije više od 20.000 Hz se može smatrati ultrazvukom. Iako ljudi nisu osetljivi na ovu vrstu akustičkih talasa, činjenica je da mnoge životinje imaju mogućnost da čuju i oseću njihovo prisustvo. Čujni opsezi za neke od životinja koje su osetljive na vibracije u ultrazvučnom opsegu navedene su u tabeli 11.1.

Tabela 11.1 – Čujni opsezi životinja osetljivih na vibracije u ultrazvučnom opsegu

Vrsta	Čujni opseg [Hz]	Vrsta	Čujni opseg [Hz]
Pas	67-45 000	Hrčak	100-60 000
Mačka	45-64 000	Jež	250-45 000
Krava	23-35 000	Rakun	100-40 000
Konj	55-33 500	Oposum	500-64 000
Ovca	100-30 000	Slepi miš	2 000-110 000
Zec	360-42 000	Kit	1 000-123 000
Pacov	200-76 000	Morsko prase	75-150 000
Miš	1 000-91 000	Delfini	100-150.000

Iako za ljude nečujan, zvuk iz ovog opsega frekvencija ima svoju veoma značajnu primenu u svakodnevnom životu, medicini, tehnici i sl. Iz tog razloga ćemo se u nastavku ove glave upoznati sa osnovnim karakteristikama ultrazvuka, pre svega u smislu tehnika njegovog generisanja i primena.

11.2 Generatori ultrazvuka

Za dobijanje ultrazvuka koriste se ultrazvučni generatori. Po samoj svojoj definiciji, to su uređaji-pretvarači energije izvora napajanja u ultrazvučnu energiju. Osnovni element ultrazvučnog generatora predstavlja mehanički sklop koji pretvara dovedenu energiju u ultrazvučnu, čije se ime označava terminima poput ultrazvučni pretvarač, glava, vibrator i sl.

Za sve generatore ultrazvuka odnosno ultrazvučne vibratore, karakteristično je da proizvode ultrazvučne talase u nekoj sredini mehaničkim treperenjem u za te svrhe pogodnog elastičnog sistema. Pri tome se, radi boljeg iskorišćenja, odnosno pretvaranja pogonske energije u ultrazvučnu, vrlo često koristi rezonansa.

Prema vrsti energije koja se neposredno pretvara u ultrazvučnu, generatori ultrazvuka se dele na:

- mehaničke,
- elektronske.

Mehanički generatori koriste kinetičku energiju gasova i tečnosti, a elektronski koriste elektromagnetnu energiju oscilatornih kola.

Elektronski generatori se prema efektu koji se koristi za proizvođenje ultrazvuka dele na piezoelektrične i magnetnostriktivne. Kod piezoelektričnih generatora za generisanje ultrazvuka koriste se piezoelektrični materijali, čije su osobine detaljnije opisane u odeljku 6.11.

Za gradnju ultrazvučnih generatora se koriste četiri vrste kristala, od kojih se jedino kvarc nalazi u prirodi (kvarc je najstariji poznati piezoelektrični materijal – upravo na njemu je 1880. godine otkriven piezoelektrični efekat). Ostale tri vrste (Senjetova so, amonijum dihidrogen fosfat (ADP) i litijum sulfat (LH)) se veštački prave.

Za ove potrebe se takođe koristi, kao i kod mikrofona keramički materijal barijum-titanat. Kristal kvarca i barijum-titanat imaju široku primenu skoro u svim oblastima ultrazvuka.

Radi postizanja većeg intenziteta ultrazvuka, kod generatora sa kvarcnom pločicom ponekad se primenjuje postupak koncentrisanja ultrazvučnih talasa u jednu tačku. Po analogiji sakupljanja svetlosnih zraka u žižu konvavnog sočiva, prave se kvarcne pločice u zakrivljenom obliku. Ovim načinom može se postići i do 150 puta veći intenzitet ultrazvuka u jednoj tački, u poređenju sa intenzitetom koji ista pločica proizvodi u blizini svoje površine.

Pobuđivanje piezoelektričnih vibratora se vrši visokofrekvencijskim strujama odgovarajućih učestanosti iz elektronskih oscilatora, odnosno generatora. Tu se javljaju dva osnovna problema: električno prilagođavanje na izlazno kolo visokofrekvencijskog generatora i dovođenje visokog napona na elektrode piezoelektričnog vibratora. Prvi problem se rešava pomoću spregnutih oscilatornih kola. Rešavanje drugog problema zavisi od konkretnih uslova rada i vrste vibratora.

Magnetostriktivni materijali, vrlo slično piezoelektričnim, ispoljavaju korisnu međuvezu magnetnih i mehaničkih osobina. Naime, pod uticajem magnetnog polja oni se deformišu (direktni magnetostriktivni efekat), a pod pritiskom menjaju magnetne osobine (indirektni magnetostriktivni efekat).

Materijali koji se koriste za magnetostruktivne vibracije dele se na dve grupe: metalne i keramičke. U prvu grupu spadaju: nikl i različite legure metala, dok u drugu grupu spadaju feritne keramike, poput nikl-cink-ferita, nikl-ferita i sl.

Magnetostruktivni vibratori mogu biti različitog oblika. Element od feromagnetskog materijala može biti šipka ili cev. Magnetostruktivni vibratori se prave i u obliku limova koji podsećaju na limove za transformatore. Ovi limovi se koriste da bi se smanjili gubici usled vrtložnih struja. Osim u pravougaonom obliku, limovi se rade još u obliku prstena. Ovakvi vibratori zrače ultrazvučne talase u svim pravcima.

Glavna prednost magnetostruktivnih vibratora leži u jednostavnosti i ekonomičnosti njihove izrade. Njima se mogu proizvesti znatne količine ultrazvučne energije nižih učestanosti.

Pored piezoelektričnih i magnetostruktivnih generatora za proizvođenje ultrazvuka koriste se i drugi principi pretvaranja. Dobar primer za to je gasni ultrazvučni generator, poznatiji kao Hartmanov generator. Ovo je tip generatora kod kojeg se kinetička energija gasova koristi za prizvodjenje ultrazvučnih talasa, i koji se pre svega koristi u situacijama kada je ultrazvučni talas potrebno proizvesti direktno u vazduhu. Princip rada Hartmanovog generatora počiva na pojavi da pri isticanju gasova pod visokim pritiscima kroz uzak otvor u slobodan prostor brzine vrtloženja gasa mogu premašiti brzine zvuka u vazduhu. Ukoliko se u na ovaj način generisano zvučno polje (tzv. nestabilno polje), postavi akustički rezonantni sistem (Helmholcov rezonator), doći će do pojave izuzetno brzog punjenja i pražnjenja rezonatora, što dovodi do generisanja ultrazvučnih talasa u vazduhu.

Za direktno generisanje ultrazvuka u tečnim sredinama je iskorišćena praktično ista fizička pojava kao kod Hartmanovog gasnog generatora. Naime, opisani princip generisanja ultrazvuka u gasovima predstavlja specijalan slučaj vrtloženja koji se uvek javlja kod isticanja nekog fluida pod pritiskom kroz uzak otvor. Pošto se sa tečnostima ne mogu postići brzine isticanja veće od brzine prostiranja zvuka, pojava vrtloženja tečnosti je iskorišćena na drugi način. U blizinu otvora iz kojeg ističe tečnost pod odgovarajućim pritiskom postavlja se metalna ploča sa oštrim ivicama koje seku mlaz. Ploča je učvršćena tako da može slobodno oscilovati na osnovnoj rezonantnoj učestanosti, čime postaje izvor željene ultrazvučne vibracije. Ovakvo dobijanje ultrazvuka u tečnostima se često naziva pištaljkom za tečne sredine, ili ultrazvučnim uređajem tipa Janovski-Pohlman, po naučnicima koji su ovaj princip pretvaranja prvi sproveli u praksi.

Ultrazvuk se može dobiti i pomoću ultrazvučnih sirena. One predstavljaju mehaničke generatore sa kojima se mogu postići velike akustične snage u vazduhu. Vrlo su pouzdane i fleksibilne u radu (lako se mogu menjati radne učestanosti u skladu sa potrebama).

11.3 Osobine i dejstva ultrazvuka

Primena ultrazvuka u svakodnevnoj praksi velikim delom počiva na njegovom dobrom prostiranju kroz guste sredine, tečnosti, metale i sl. Drugi deo primene ultrazvuka u industriji i drugim granama, pre svega u medicini i biologiji, počiva na iskorišćavanju energije ultrazvučnih talasa. Postoje tri energetska dejstva ultrazvuka:

- dejstvo kavitacije,
- dejstvo koagulacije,
- termičko dejstvo.

Kavitaciono dejstvo se ispoljava naročito u tečnim sredinama, a u manjoj meri u čvrstim sredinama. Sve primene ultrazvuka na bazi iskorišćenja energije u tečnostima, zasnivaju se na dejstvu kavitacije. Pod kavitacijom u hidrodinamici se podrazumeva obrazovanje mehurića usled vrtloženja i zagrevanja. Međutim, pojava kavitacije se opaža i pod dejstvom ultrazvučnih talasa. Postoji fizička analogija između pojava kod ključanja tečnosti i kavitacije usled dejstva ultrazvuka. Pod dejstvom ultrazvuka u tečnostima se dešavaju slične pojave kao i kod zagrevanja. Interesantan primer primene efekta kavitacije je tzv. oksidaciono dejstvo ultrazvuka, pri kojem dolazi do uništavanja mikrobioloških organizama u tečnostima, i koje ima primenu u sterilizaciji mleka i drugih prehrambenih artikala.

Koagulacija predstavlja prikupljanje sitnih delića raspršenih u gasovima ili tečnostima u veće celine kojima se može lakše manipulirati. Ovo dejstvo ultrazvuka iskorišćeno je za prečišćavanje gasova iz fabričkih postrojenja. Prečišćavanje gasova ultrazvukom se prvenstveno koristi kod onih isparenja kod kojih su čestice tako male da se običnim filterskim sistemom ne mogu efikasno očistiti.

Termičko dejstvo ultrazvuka se javlja i u tečnim i u gasovitim sredinama. U ovim sredinama mogu da nastupe znatna povišenja temperature usled delovanja ultrazvučnih talasa. Povišenje temperature potiče od apsorpcije energije ultrazvučnih talasa, koja se pretvara u toplotu u sredini delovanja.

11.4 Primena ultrazvuka

11.4.1 Ultrazvuk u medicinskoj terapiji

Ultrazvuk, kao i svaki talas, prenosi energiju koju sredina može da apsorbuje uz prateće efekte koji zavise od intenziteta ultrazvuka. Ultrazvuk odgovarajućeg intenziteta i frekvencije može da se koristi za razbijanje kamena u žuči ili za uništavanje kancerogenih tkiva prilikom operacija. Ovako primenjen ultrazvuk uništava individualne ćelije tako što menja propustljivost njihove membrane usled čega protoplazma počinje da

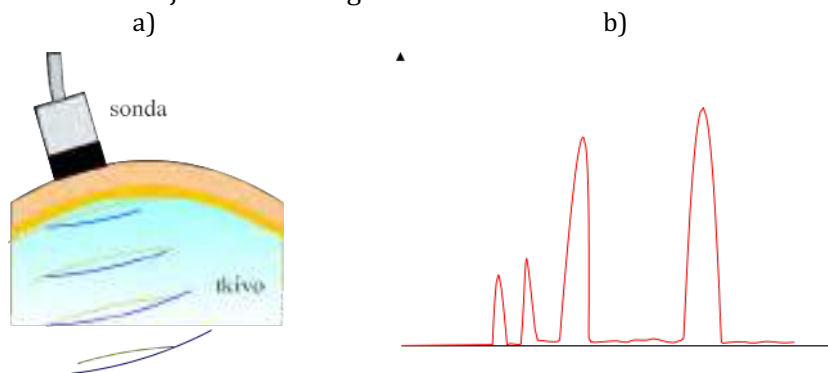
izlazi iz njih. Ultrazvuk može da otvori zidove ćelija i već pomenutim efektom kavitacije.

Veći deo energije koju sadrži ultrazvuk visokog intenziteta se u tkivu transferiše u toplotnu energiju. Ultrazvuk visokog intenziteta se stoga često koristi u fizikalnoj terapiji za dubinsko zagrevanje tkiva u procesu koji se naziva ultrazvučna diatermija. U tu svrhu se koristi zvuk frekvencija od 0,8 do 1 MHz.

11.4.2 Ultrazvuk u medicinskoj dijagnostici

Primena ultrazvuka u medicinskoj dijagnostici je izuzetno rasprostranjena, jer daje odlične rezultate pri čemu je, koliko je do sada poznato, reč o potpuno neškodljivom postupku. Intenzitet zvuka koji se koristi u dijagnostici je toliko mali (oko 10^{-2} W/m²) da ni na koji način ne može da izazove toplotna oštećenja tkiva. Princip rada je baziran na delimičnoj refleksiji ultrazvučnih talasa od tkiva različitih gustina.

Brzina zvuka u različitim tkivima je približno ista. To znači da je vreme potrebno svakom odbijenom talasu da se vrati direktno proporcionalno rastojanju od površine refleksije do izvora talasa. Takva jednostavna zavisnost od rastojanja daje mogućnost da se, na primer, odredi debljina različitih slojeva tkiva u organizmu.



Slika 10.1 – a) Princip ultrazvučnih pregleda b) Grafik intenziteta odbijenog ultrazvuka u zavisnosti od vremena

U ovakvim sistemima se konačna slika dobija tako što se sonda, koja istovremeno emituje i prima reflektovani ultrazvučni talas, prislanja na telo, talas emituje u raznim pravcima i „hvata“ njegov odjek nastao odbijanjem od analiziranog organa, slika 11.1. Sonda u sebi sadrži više izvora ultrazvuka, tako da u toku rada dolazi do konstruktivne interferencije u izabranom pravcu. Na osnovu registrovanog reflektovanog ultrazvučnog talasa, se može odrediti mesto sa koga je reflektovan kao i njegova dubina. Kompjuter zatim na osnovu toga konstruiše sliku sa oblikom i gustinom unutrašnjih struktura od kojih se ultrazvuk odbio.

Koliko male delove analiziranog tkiva će ovakav uređaj moći da razlikuje, zavisi direktno od talasne dužine upotrebljenih talasa. Za pregled abdomena se obično koristi ultrazvuk frekvencije 7 MHz, a kako je brzina zvuka kroz ljudska tkiva oko 1540 m/s, talasna dužina ovakvog talasa je $\lambda = c/f = 0.22 \text{ mm}$.

Na osnovu ovakvog podatka se može reći da je veličina objekata koje ultrazvučni aparat može da razlikuje reda milimetra. Ultrazvučni aparati koji koriste više frekvencije mogu da daju više detalja ali nemaju tako dobru prodornu moć kao oni koji rade na nižim frekvencijama. Približna dubina do koje može da prodre ultrazvučni talas je oko 500λ , pa je tako za ultrazvuk frekvencije 7 MHz, dubina do koje se može doći oko $500 \times 0,22 = 0,11 \text{ m}$. Više frekvencije su prema tome pogodne samo za pregled manjih organa, poput oka.

Druga značajna primena ultrazvuka u medicinskoj dijagnostici je za detektovanje kretanja i određivanje njegove brzine, koja se realizuje korišćenjem Doplerovog efekta. Ovakav princip rada dijagnostičkih uređaja se obično koristi za praćenje rada srca fetusa, merenje brzine protoka krvi i detektovanje začepljenja u krvnim sudovima.

11.4.3 Primena ultrazvuka u industriji i drugim oblastima

Osim medicinske, ultrazvuk ima i brojne druge primene. Tako na primer, u mašinskoj industriji je pri postupcima varenja metala česta potreba za detektovanjem naprslina i šupljina. Varovi koji nemaju nikakvih grešaka u formi šupljina vrlo dobro propuštaju ultrazvuk, a svaka šupljina ispunjena vazduhom ga gotovo potpuno reflektuje.

Za ultrazvučno čišćenje se tela potapaju u tečnost i izlažu ultrazvuku frekvencije uglavnom oko 40 kHz. Intenzitet ultrazvuka je toliki da izaziva kavitaciju usled koje dolazi do skidanja masnih naslaga i prljavštine.

U hemiji i metalurgiji se koriste sonde koje emituju ultrazvuk velike energije koji usled efekta kavitacije može da promeni unutrašnju strukturu date materije. Na takav način ultrazvuk se može iskoristiti za homogenizovanje smeše supstancija koje se inače slabo ili nikako mešaju, tj. za dobijanje emulzija i legura. Ultrazvuk pri dodiru sa kristalnim supstancama, može pri određenim uslovima da raskine jedan broj veza u kristalima, razbijajući ih na sasvim male delove. Ukoliko pak neki hemijski proces postavimo pod ultrazvučni talas, brzina reakcije se može povećati i do nekoliko desetina puta, pri čemu se on koristi kao jeftin katalizator.

U geologiji i arheologiji ultrazvuk služi za detektovanje različitih slojeva zemljišta, podzemnih voda, mikrostruktura stena ili za otkrivanje podzemnih arheoloških građevina.

U okeanografiji se koriste uređaji koji se nazivaju sonari. Njima se ispituje oblik morskog dna, otkrivaju perforacije na njemu, meri njegova dubina, sa bezbedne udaljenosti mogu da se pronalaze olupine potonulih brodova, jata riba i tome slično. Sonari rade uglavnom na frekvencijama u oblasti od 30 do 100 kHz. Sonari na osnovu analize refleksije ultrazvuka koji su emitovali određuju rastojanje i veličinu objekta o koji se talas reflektovao. Ukoliko se objekat i kreće, onda se na osnovu Doplerovog efekta može odrediti i njegova brzina.

Primene ultrazvuka u biologiji su brojne. Sonarima je moguće praćenje i pronalaženje jata riba, kolonija algi, većih morskih organizama. Ukoliko se ultrazvukom stvori sitna šupljina u ćelijskoj membrani kroz nju se u ćeliju može ubaciti medikament, ili npr. genetski lanac. Pri ekstrahovanju aroma iz biljaka potrebno je, najčešće mehanički, delovati pigmentima na biljne ćelije u cilju povećanja efikasnosti procesa. Izvor mehaničke sile u takvim slučajevima može biti pritisak sredine na koju se dejstvuje ultrazvukom. Ultrazvuk takođe može da paralizuje sitnije organizme jer deluje na nervne sinapse. U kombinaciji sa ultraljubičastim zracima njime se može vršiti sterilizacija mleka i medicinskih instrumenata. Kako je za čoveka nečujan ali ne i za sve životinje, ultrazvuk se koristi i za zaštitu od glodara, insekata i drugih štetočina.

11.5 Pitanja za proveru znanja

1. Šta je ultrazvuk?
2. Koje su dve osnovne vrste generatora ultrazvuka?
3. Šta su i na koji način rade piezoelektrični generatori ultrazvuka?
4. Šta su to magnetostriktivni materijali i koja je njihova uloga u generisanju ultrazvuka?
5. Koji je princip rada Hartmanovog generatora ultrazvuka?
6. Šta su ultrazvučne sirene?
7. Objasniti princip korišćenja ultrazvuka u medicinskoj dijagnostici.
8. Koja su tri osnovna energetska dejstva ultrazvuka, koja svoju primenu nalaze u tehnologiji i industriji?
9. Šta je sonar?
10. Kakva je mogućnost primene ultrazvuka u prehrambenoj industriji i poljoprivredi?

11.6 Literatura

- [1] H. B. Meire, P. Farrant, *Basic Ultrasound*, John Wiley & Sons, 1995.
- [2] S. K. Edelman, *Understanding Ultrasound Physics*, E S P, Incorporated, 2012.

Audio forenzika

12.1 Uvod

Pod forenzikom, u najširem smislu, podrazumevamo primenu različitih naučnih disciplina i tehnologija u situacijama u kojima je potrebno utvrditi istinu u nekom događaju. Audio forenzika se može definisati kao primena nauke o zvuku i audio tehnologija za otkrivanje i tumačenje materijalnih dokaza u istražnom i krivičnom sudskom postupku. Konkretnije rečeno, audio forenzika, koja se naziva i akustička forenzika ili forenzička akustika se bavi pribavljanjem, analizom i vrednovanjem audio snimaka koji se kao dokazni materijal koriste u službenoj istrazi ili na sudu [21].

U ovom poglavlju prvo ćemo se zadržati na nekim detaljima vezanim za istorijski razvoj audio forenzike a potom ćemo se upoznati sa osnovnim poljima njene primene, kao što su: utvrđivanje autentičnosti audio zapisa, poboljšanje audio zapisa radi povećanja razumljivosti govora i čujnosti slabih zvukova, tumačenje i dokumentovanje zvučnih zapisa gde spadaju prepoznavanje govornika, transkripcija dijaloga, analiza različitih zvučnih signala važnih za istragu itd.

Da bi materija iz nabrojanih oblasti bila razumljivija u prvom delu poglavlja su izloženi najosnovniji pojmovi o karakteristikama govornog signala, uključujući način njegovog nastajanja i percepcije.

Takođe ćemo se ukratko osvrnuti i na osnovne karakteristike laboratorija za audio forenziku.

12.2 Kratak istorijski pregled

Smatra se da počeci audio forenzike datiraju od pedesetih godina prošlog veka i da su povezani sa pojavom sistema za snimanje živog zvuka, van studija i prostora predviđenih za snimanje. U SAD se od početka 1960-tih godina koriste postupci za proveru autentičnosti snimaka i poboljšanje razumljivosti govora na njima.

Prvi zabeležen slučaj da se snimljeni razgovor koristio u sudskom postupku potiče iz 1958. godine [24]. Ovaj slučaj je važan i po tome što su tada definisani sedam zahteva koji treba da budu ispunjeni da bi se audio snimak prihvatio kao dokaz na sudu. Te zahteve i danas primenjuje veliki broj sudova u svetu i kod nas. Ukratko, pomenutih sedam zahteva govore o

tome kako audio forenzički materijal koji bi se koristio na sudu mora da se čuva, transportuje i koristi. Pri tom se mora voditi računa da ni na koji način ne dođe do njegove promene, a sve faze njegove analize moraju biti dokumentovane. Ovaj materijal mora da sadrži prepoznatljive govornike i druge izvore zvuka - ili moraju postojati svedoci snimanja koji mogu potvrditi njegovu verodostojnost.

Nekoliko kasnijih, široko publikovanih slučajeva primene audio forenzike u sudskim postupcima, su veoma doprineli oblikovanju procedura koje se koriste u praksi, i povećanju ugleda ove struke. Među njima valja pomenuti korišćenje audio forenzičkih dokaza u istražnim radnjama vezanim za atentat na predsednika SAD Džona Kenedija 1961. godine, ubistvo predsedničkog kandidata Roberta Kenedija 1968. godine, rasvetljavanje posledica nekoliko tadašnjih avionskih nesreća i terorističkih napada [24].

Najcitiraniji slučaj primene audio forenzike u istoriji njenog razvoja poznat je pod nazivom "afera Votergejt" (Watergate), čiji je glavni akter bio tada aktuelni američki predsednik Ričard Nikson (Richard Nixon) [24]. Magnetna traka sa audio zapisom je bila jedan od glavnih dokaza da je Predsednik zloupotrebio američke tajne službe kako bi pobedio na izborima, i da je od samog početka bio učesnik zataškavanja ovog skandala. Nakon ovakvog otkrića Predsednik je morao dati ostavku. Za audio forenziku je ovaj sudski proces jako važan po tome što je ekspertska grupa (panel) koju je sud formirao primenila specifičnu metodologiju za procenu autentičnosti audio snimaka, koja je kasnije široko prihvaćena u sudskoj praksi.

Upotreba identifikacije glasa u kriminalistici primenjuje se već dugi niz godina, i to u slučajevima kada je svedok čuo, ali nije video osumnjičenog. Međutim, tačnost identifikacije počinoca u ovakvim sličajevima zavisi od mnogih spoljnih uticaja, pa se često ne može uzeti u obzir sa velikom pouzdanošću.

Pronalazak telefona i opreme za snimanje zvuka otvorili su mnoge nove oblasti njihove primene. Između ostalih, razvijani su i novi alati pogodni za analizu govora. Ipak, prekretnicu u daljem razvoju audio forenzike predstavlja pronalazak sprektrografa. Ovaj uređaj je prvobitno bio namenjen za trening izgovora kod gluvih osoba (da prikaže govor kao sliku) i stranih studenata, ali tu nikada nije našao pravu primenu. Međutim kasnije, pa sve do naših dana, spektograf je postao i ostao veoma važna alatka za istraživanja u fonetici i primenu tih rezultata u audio forenzici.

Tokom proteklih 40 godina, audio forenzika je postepeno postajala priznata profesija. Pre postojanja digitalne obrade signala, najveći broj audio forenzičara radilo je isključivo sa analognom magnetnom trakom i osnovnim studijskim uređajima za snimanje zvuka i njegovu analizu kao što su: analogni filtri, uređaji za vremensku obradu i obradu dinamike audio

signala, uređaji za reprodukciju promenljivom brzinom, osciloskopi, mikroskopi, spektrografi itd.

Nagli razvoj informacionih tehnologija u novije vreme, učinio je da se u ovoj oblasti danas koriste veoma sofisticirani instrumenti i softverski paketi za digitalnu vizualizaciju i analizu podataka, spektrografsku analizu i analizu talasnih oblika, snimanje, editovanje i reprodukciju audio signala itd.

Na poslovima audio forenzike, pored akustičara i audio inženjera angažovani su i eksperti iz drugih oblasti, naročito oni iz oblasti lingvističkih nauka.

Audio forenzikom se danas bavi veliki broj eksperata i postoje dva njihova profesionalna međunarodna udruženja: IAFL (Međunarodno udruženje forenzičkih lingvista) i IAFPA (Međunarodno udruženje za forenzičku fonetiku i akustiku) i veliki broj regionalnih i nacionalnih udruženja. Pored toga audio forenzičari su aktivni i u okviru skoro svih međunarodnih udruženja audio inženjera i akustičara.

12.3 Osnovna polja primene audio forenzike

Osnovna polja primene audio forenzike su:

- utvrđivanje autentičnosti audio zapisa;
- poboljšanje audio zapisa radi povećanja razumljivosti govora i čujnosti slabih zvukova;
- tumačenje i dokumentovanje zvučnih zapisa, radi:
 - prepoznavanja govornika;
 - transkripcije dijaloga;
 - analize drugih (sem ljudskog glasa) za istragu važnih zvučnih signala (pucnji, eksplozije, škripa točkova, zvuci raznih mašina);
 - rekonstrukcije kriminalnih događaja ili nesreća;
 - utvrđivanja vremenskog redosleda pojedinih radnji u pomenutim događajima itd.

Pri tome se podrazumeva da se u radu koriste metode i postupci formiranja nalaza zasnovani na opšte prihvaćenoj praksi od strane profesionalnih naučnih i stručnih udruženja. Zahtev za forenzičku analizu (forenzičko veštačenje) može da sadrži pojedinačno svaku od prethodno navedenih radnji ili određenu kombinaciju više njih.

Poreklo audio forenzičkih snimaka koji se koriste kao dokazni materijal u sudskoj praksi je različito. Mogu nastati u audio sistemima tajnog nadzora, na osnovu prisluškivanih razgovora, u različitim sistemima za snimanje glasa, u sistemima za automatsko snimanje poziva, u sistemima za javni nadzor različite namene, u sistemima za komunikaciju, itd.

Odgovarajući audio snimak koji nadležni istražni organi ili sud dostave na forenzičku analizu treba da je na propisan način označen, zaštićen i upakovan. Uz njega se dostavlja odgovarajući dopis u kojem je naznačen tačan spisak svih uređaja opreme i pribora koji se uz predmetni snimak dostavljaju (ako takvih ima) i u kojem je precizno objašnjeno koja vrsta analize se traži (utvrđivanje autentičnosti snimka, transkripcija razgovora, prepoznavanje govornika i sl.). Prijem dokaznog materijala treba da bude evidentiran na propisan način, tako da postoje podaci kao što su: prijemna šifra (broj), predmet, datum i vreme prijema, način dopreme, stanje pakovanja za transport, tražena usluga, priroda slučaja, osoba odgovorna za prijem itd. [20].

Nakon potvrde autentičnosti, i eventualno potrebnog poboljšanja kvaliteta snimka, može se preći na neku ili više radnji iz domena tumačenja i dokumentovanja zvučnog zapisa na njemu, zavisno od toga šta je relevantno za istragu ili sud. Ako se radi o snimku govora, to dalje može da podrazumeva pripremu transkripta, identifikaciju govornika, tumačenje bilo kakvih pozadinskih zvukova koji mogu identifikovati okolnosti razgovora i slično. Kod određenih snimaka zahtevaju se analize za dokumentovanje svih zvukova i njihovog međusobnog vremenskog odnosa, koji bi mogli pomoći u otkrivanju pojedinih detalja ili rekonstrukciji celog događaja.

12.4 Govor kao sredstvo komunikacije

12.4.1 Jezik

Najvažniji oblik komunikacije među ljudima je jezik, koji u užem smislu predstavlja apstraktni sistem znakova i pravila koji koristi određena ljudska zajednica. Preciznije se može reći da je jezik višeslojna, hijerarhijski uslovljena struktura, u kojoj jedinice nižeg reda svojim kombinovanjem obrazuju jedinice višeg reda [8]. Pored komunikacione, jezik ima i mnoge druge funkcije, kao što su: kognitivna (preko jezika učimo i saznavamo o svetu), ekspresivna (preko jezika izražavamo svoje misli i osećanja), akumulativna (jezik čuva kulturno nasleđe, identitet i istorijske činjenice), estetska (izražavanje osećaja sklada i lepote) itd.

Da bi se ostvarila komunikacija pomoću jezika potrebno ga je učiniti dostupnim čovekovim čulima. Tako imamo dva vida ostvarivanja jezika: govorom – upućenim na čulo sluha i pismom – upućenim na čulo vida. Dakle, može se reći da je govor auditivni način ispoljavanja jezika, odnosno jedan od načina materijalizacije jezika kao apstraktnog sistema znakova. Govor je stariji i primarniji vid komunikacije nego pismo.

Najmanja jezička jedinica zove se fonema. Ona nema svoje značenje, ali ima distinktivnu (razlikovnu) funkciju. Foneme se definišu kao jedinice čijom se promenom u reči menja značenje reči. Drugačije rečeno, pod svakom fonemom podrazumevamo skup artikulaciono-akustičkih karakteristika koji se u jednom jeziku ne može zamenjivati drugim skupom bez promene značenja.

Princip koji leži u osnovi jezičke strukture je da se kombinacijom bazičnih jedinica za prenos informacija stvaraju sve veće jedinice. Kombinacijom fonema, koje se ne javljaju u jeziku pojedinačno, dobijaju se jedinice višeg reda, koje imaju značenje (morfeme, lekseme ili reči, sintagme, rečenice, diskursi itd.). Zahvaljujući tome u jeziku je moguće od relativno malog broja osnovnih elemenata stvoriti beskonačan broj rečenica, koje su odraz vrlo složenih misaonih operacija [34]. Standardni srpski jezik ima 30 fonema.

12.4.2 Pismo

Pisani znak za fonemu zove se slovo ili grafema. Prilikom navođenja u tekstu, foneme se stavljaju u kose zagrade: /m/, /i/, /r/, itd. Ukupnost pisanih znakova u nekom jeziku čini pismo tog jezika. Naš jezik ima alfabetsko pismo, koje može biti fonološko i nefonološko. Ako svakoj pojedinačnoj fonemi odgovara jedna (uvek ista) grafema, odnosno ako svaka grafema pokriva jednu (uvek istu) fonemu – onda je takvo pismo fonološko. Ako to nije slučaj i ako se jedna fonema ne beleži dosledno uvek istom grafemom, ili ako se fonema beleži sa više od jedne grafeme, takvo pismo nije fonološko [32]. Prema tome, srpska cirilica je fonološko alfabetsko pismo, a latinica nije, pošto u njoj postoje tri foneme koje se beleže sa po dve grafeme (lj, nj, dž).

12.4.3 Govorne jedinice

Najmanja govorna jedinica, odnosno najmanji segment govornog niza, je glas ili fon i on je fizička reprezentacija foneme. Glas se u tekstu označava sa uglastim zagradama: [o], [p], [k], ... U određenim slučajevima, zavisno od konteksta u govornom nizu, fonemu izgovaramo na drugačiji način. Te glasovne varijante jedne foneme nazivamo alofonima. Dakle, kada se radi o neutralnom glasovnom okruženju fonema se u govoru izgovara kao glas koji je njeno tipično ostvarenje, tj. /a/ se izgovara kao [a], /s/ kao [s], /t/ kao [t], itd. Kada okruženje nije neutralno, jedna ista fonema se može izgovarati kao više različitih glasova - njenih alofona, kao na primer: /z/ se može izgovoriti kao [z] u [zima], kao [s] u [bestebe], kao [š] u [beščega], i td. [1].

Dakle, svakoj fonemi odgovara skup fonetskih realizacija – glasova - alofona, uslovljenih kontekstom u govornom nizu. Zato u artikulacionoj bazi

svakog pojedinačnog jezika postoji mnogo više glasova nego fonema. Iz tog razloga, kada se govori o glasovnom sistemu, ne misli se na sve glasove koji se javljaju u artikulacionoj bazi, nego samo na glasove sa razlikovnom funkcijom, odnosno na konkretne realizacije apstraktnih jezičkih jedinica – fonema [33]. U tom smislu u srpskom glasovnom sistemu ima 30 glasova. Stoga ćemo, kao što se često čini u lingvističkoj literaturi, u daljem tekstu koristiti termin glas kao oznaku za zvučni segment koji predstavlja konkretnu realizaciju foneme, ali i termin fonema kada to kontekst zahteva.

Slog je najmanja i bazična jedinica izgovora. Ne može se izgovoriti ništa manje od sloga jer produkcija glasa izvan sloga ne pripada artikulisanom govoru. Vokal se može izgovoriti sam, kada predstavlja slog, ali se ostali glasovi mogu izgovoriti samo u slogu. Slog je glasovna jezička jedinica koja se ostvaruje jednim artikulacionim (izgovornim) zahvatom. Slogovi u srpskom jeziku mogu biti različitog oblika: Najčešći su oblika CV (konsonant-vokal) i čine preko 60% svih slogova, dok oni oblika V (vokal), CV (konsonant-vokal), CVC (konsonant-vokal-konsonant), CCV čine zajedno 90% ukupnog broja slogova.

Reči su govorne jedinice koje nose značenje, i sastavljene su od slogova. Govor je moguće rasčlaniti (segmentirati) na reči, reči na slogove a slogove na glasove. Ta hijerarhijska struktura je od suštinskog značaja za jezičku produktivnost koja omogućava da se od konačnog i relativno malog broja elemenata ostvari vrlo veliki broj različitih znakova – reči koje imenuju naše misaone predstave [34].

Lingvistika je nauka koja se bavi proučavanjem ljudskog jezika. Ona sadrži mnogo različitih oblasti od kojih je za nas ovde posebno interesantna fonetika. Fonetika se bavi proučavanjem stvaranja glasova (artikulacija), njihovih fizičkih (akustičkih) osobina, i njihovog prijema putem čovekovog auditivnog sistema. Tako razlikujemo artikulaturnu, akustičku i auditivnu fonetiku.

Napomenimo ovde i to da se jedna druga oblast lingvistike, koju nazivamo fonologija, bavi proučavanjem jezičke funkcije i ponašanja govornih jedinica tj. glasova kao fonema u procesu sporazumevanja. Zato se fonologija u lingvističkoj praksi naziva i *funkcionalna* fonetika.

12.4.4 Glas i govor

Čovek je u stanju da proizvede različite zvučne pojave kao što su: sviranje, aplaudiranje, govor, šapat, zviždanje, pevanje, smeh, plač, uzdasi, krikovi, imitacija prirodnih izvora zvuka itd. Kao što smo rekli u odeljku 3.9, zvučne pojave koje čovek generiše svojim vokalnim traktom, nazivamo jednim imenom - čovečji glas (dalje u tekstu - glas). Ovaj pojam ne treba

mešati sa pojmom glasa u fonetici kao tipičnim ostvarenjem foneme, o kojem je prethodno bilo reči.

Od svih zvučnih pojava koje nazivamo glasom, jedna je govor. Tačnije se može reći da je govor optimalna zvučna realizacija oblikovana ritmom rečenica, reči i slogova [1]. Tokom govora formira se govorni tok sa prekidima kada je neophodno udahnuti ili organizovati misli. Između prekida izgovara se jedna rečenica (u trajanju od nekoliko sekundi) u jednom izdisaju (ekspirijumu), tj. jednom izgovornom dahu ili jednom ekspiratornom ciklusu. Individualna energija kojom govornik raspolaže u generisanju govora u jednom izgovornom dahu naziva se fonetskim kapacitetom govornika.

12.4.5 Artikulacione karakteristike fonema

Pod artikulacijom (izgovorom) se podrazumeva čovekova sposobnost razgovetnog izgovaranja glasova, koja je neposredno povezana sa pokretima govornih organa koji stvaraju glasove. Pokretima govornih organa kontroliše se put vazdušne struje, koja se kreće slobodno ili savlađuje tesnace i prepreke, što se odražava na akustičke karakteristike nastalih glasova, o čemu je detaljnije bilo govora u odeljku 3.9.1. Kao što je tamo rečeno, sa artikulacione tačke gledišta sve glasove delimo prema mestu i načinu artikulacije i prema osobini zvučnosti. U artikulaciona obeležja glasova neki autori ubrajaju i kriterijum koji označava rezonator koji ušestvuje u njihovom formiranju (nazalni ili oralni). Tako razlikujemo tri nazalna glasa: [m], [n] i [nj], dok su svi ostali oralni.

12.4.6 Akustičke karakteristike fonema

Lingvistička identifikacija i razlikovanje fonema u jeziku, moguće je zahvaljujući njihovim akustičkim karakteristikama ili kako ih još nazivamo akustičkim znacima. Među njima razlikujemo skupinu *invarijantnih* i skupinu *tranzicionih* karakteristika. Prve definišu karakteristike fonema bez obzira gde se one nalaze u govornom lancu, dok druge zavise od konteksta, i predstavljaju prelazne forme između konsonanata i vokala ili vokala i konsonanata.

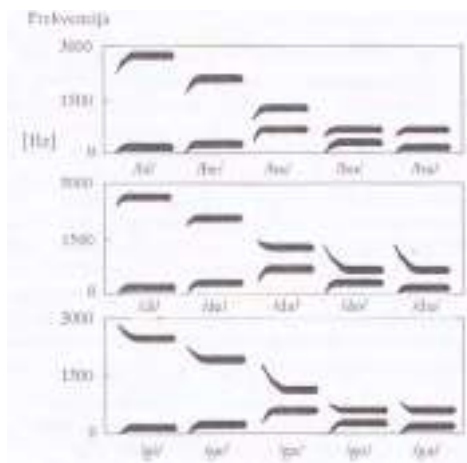
Invarijantne akustičke karaktersitike fonema se mogu jasno identifikovati u njihovim spektrogramima kako je ukratko opisano u odeljku 3.9.1, i detaljno objašnjeno u [5] i [32]. Najosnovnije među ovim karaketistikama za pojedine vrste fonema navedene su u tabeli 12.1.

U najznačajnije tranzicione karakteristike spadaju tranzicije formanata vokala, koji se u kontekstu nalaze ispred ili iza konsonanata. Kao primer ove pojave na slici 12.1 su prikazani položaji prvih i drugih

formanata svih vokala sa naznačenim tranzicijama u kontekstu kada se nalaze iza ploziva /b/, /d/ i /g/[5].

Tabela 12.1 – Osnovne invarijantne karakteristike fonema

Tip glasova - fonema	Osnovne invarijantne akustičke karakteristike
Vokali	Zvučnost, intenzitet, oblik spektra (formanti), trajanje
Frikativi	Intenzitet i raspodela šuma u spektru, zvučnost
Plozivi	Okluzije i nagle promene amplitude susednih fonema
Afrikati	Okluzivnost, amplituda, trajanje frikativnog spektra
Nazali	Rezonantna energija na niskim i odsustvo signala na visokim frekvencijama
Laterali	Poluformantna struktura
Vibrant /r/	Vibraciona priroda spektra
Poluvokal /j/	Poluformantna struktura, dva poluformanta veoma izražena



Slika 12.1 – Tranzicije formanta vokala kada se nalaze iza zvučnih ploziva [5]

12.4.7 Distinktivne karakteristike fonema

Međutim, akustičke karakteristike nisu dovoljne za potpunu identifikaciju fonema u svim slučajevima. U tu svrhu se koriste apstraktne lingvističke karakteristike koje nazivamo distinktivnim karakteristikama. Ima ih mnogo, ali se sve mogu svrstati u tri grupe: zvučnost, mesto artikulacije i način artikulacije. Ove karakteristike imaju binarnu formu, što znači da određeni fonem može da poseduje (+) ili da ne poseduje (-) datu karakteristiku, recimo zvučnost. Svaku distinktivnu karakteristiku, zavisno od konteksta, možemo dalje opisati različitim skupovima akustičkih karakteristika, tj. distinktivne karakteristike stoje prema akustičkim u odnosu 1:n [5]. Najčešće je slučaj da se svi glasovi opisuju sa deset

dinstiktivnih obeležja koja u njima mogu biti prisutna ili odsutna, a to su: vokalnost, šumnost, nazalnost, kontinualnost, kompaktnost, difuznost, stridentnost, gravisnost, napetost i zvučnost [32], tabela 12.2.

Tabela 12.2 – Dinstiktivne karakteristike glasova i njihova akustička manifestacija

Karakteristika	Manifestacija	Grupa glasova
Vokalnost	Bar dva jasno određena formanta	Vokali, vokalno [r]
Šumnost	Prisustvo šuma u spektru	Konsonanti
Nazalnost	Prisustvo nazalnog formanta	[m], [n], [nj]
Kontinualnost	Nema prekida u spektru, prelazi su postepeni	Vokali, frikativi, [l], [lj], [j]
Kompaktnost	Viša koncentraciju energije u relativno uskom centralnom delu spektra.	Prednjonepčani, zadnjonepčani, [a]
Difuznost	Raspršenost energije pri čemu je ona grupisana na vrlo visokim na vrlo niskim frekvencijama	Usni, zubni, alveolarni, [i], [u]
Stridentnost	Veća neujednačenost spektra, predominantan intenzitet energije na visokom frekvencijama	Frikativi, osim [h], [c], [š], [č],
Gravisnost	Predominantan intenzitet energije na niskim frekvencijama	Usneni, velarni, [u], [o]
Napetost	Oštro i jasno izraženo područje rezonanse	Bezvučni opstruenti, [i], [u], vokalno [r], [lj], [nj]
Zvučnost	Prisustvo periodičnih vibracija niske frekvencije	Zvučni

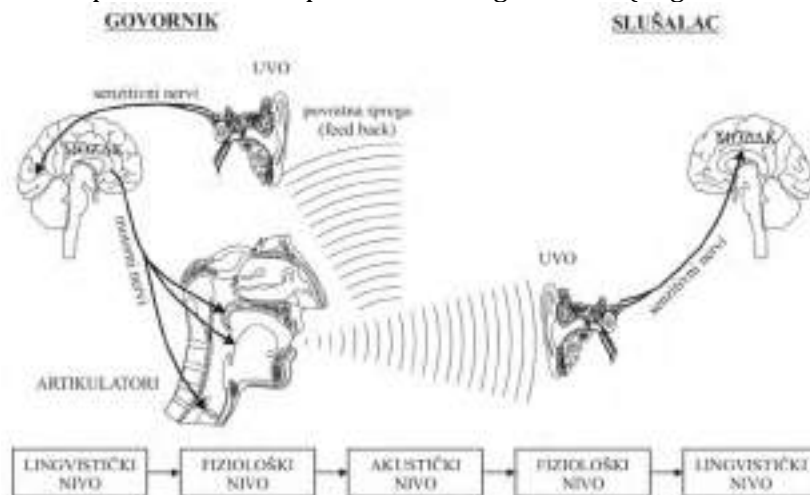
12.4.8 Govorna komunikacija

Pod komunikacijom podrazumevamo proces razmene informacija između dva ili više učesnika. Govorna komunikacija, kao najrasprostranjenije i najsavršenije sredstvo komunikacije, je omogućila čoveku sveukupan civilizacijski razvoj (društveni, stvaralački i intelektualni). Ona se ostvaruje veoma kompleksnim procesom transformacije informacije od govornika do slušaoca. Taj proces se odvija kroz tri faze (generisanje, prenošenje i prijem) i pet nivoa, od lingvističkog, preko fiziološkog i fizičkog (generisanje i prenošenje), do fiziološkog i lingvističkog na prijemu. Ceo ovaj proces se naziva govorni lanac, slika 12.2, [5], [17].

Kod govornika se generiše određena misao koja se transformiše u lingvističku formu kao što je reč, rečenica itd. (lingvistički nivo), na bazi koje se preko motornih nerava nervni impulsi prosleđuju do organa govornog mehanizma (fiziološki nivo). Govorni organi pod dejstvom nervnih impulsa generišu govor (govorni signal), koji se u formi zvuka prostire kroz okolni prostor (fizički odnosno akustički nivo).

Na prijemnoj strani, promene zvučnog pritiska izazvane generisanjem govora dovode do aktivnosti slušnog mehanizma slušaoca.

Kao rezultat ove aktivnosti nastaju nervni impulsi (stimulusi) u unutrašnjem uvu, koji se putem senzorskih nervnih vlakana prenose do mozga slušaoca (fiziološki nivo). Nervni impulsi se u mozgu slušaoca transformišu u lingvističku poruku odnosno polaznu misao govornika (lingvistički nivo).



Slika 12.4 – Govorni lanac, [5], [17]

12.4.9 Govorne tehnologije

Govorne tehnologije podrazumevaju široku lepezu tehničko-tehnoloških rešenja u naučnoj oblasti analize i obrade govora i govornog signala, kao što su: automatsko prepoznavanje govora (ASR), konverzija teksta u govor (TTS), prepoznavanje jezika, prevođenje sa govora na govor, prepoznavanje govornika, itd [35].

12.4.10 Akustičke karakteristike govora

Govorni signal je promenljivi akustički signal koji možemo okarakterisati sa velikim brojem akustičkih parametara ili obeležja. Među njima se najčešće koriste: intenzitet govora, visina (osnovna frekvencija) glasa, spektralna raspodela amplituda (kratkovremeni i dugovremeni spektar), formantne frekvencije i širine opsega, prediktorski koeficijenti, nazalna koartikulacija, spektralna korelacija, trajanje govornih segmenata i td. Njihovo ponašanje u vremenu ili neke od statistički usrednjenih vrednosti u dugo-vremenom intervalu su osnovni markeri koji se koriste u različitim aktivnostima u audio forenzici.

Intenzitet (jačina) govora je promenljiv u vremenu, percipira se kao glasnoća, a zavisi od amplitude vibriranja glasnih žica, subglotalnog pritiska i oblika vokalnog trakta. Zato promene intenziteta govora u funkciji

vremena predstavljaju značajan izvor informacija svojstvenih govorniku. Prilikom merenja intenziteta govora uzima se interval usrednjavanja u granicama od 10 ms do 30 ms. Pored merenja varijacija intenziteta kontinualnog govora, vrše se i merenja varijacija inteziteta pojedinih njegovih segmenata.

Visina glasa je povezana sa osnovnom frekvencijom F_0 vibracija glasnih žica. Merenje osnovne frekvencije se može obavljati u vremenskom ili frekvencijskom domenu. Vremenseke varijacije osnovne frekvencije predstavljaju važnu karakteristiku govora i pokazuje se da je ona pogodna za primenu u automatskom prepoznavanju govora.

Visina osnovne frekvencije je karakteristika govora koja zavisi od pola, uzrasta i situacije u kojoj se govornik nalazi. Njena srednja vrednost iznosi 120 Hz za muške glasove, 200 Hz za ženske glasove i 300 Hz za dečje glasove. Utvrđivanje osnovne frekvencije iz spektra govora zahteva pažljivu i detaljnu analizu koja se pouzdano može izvesti samo pomoću računara.

Oblik histograma (raspodele) osnovne frekvencije govora povezan je sa prozodijskim karakteristikama govora (akcenat, intonacija) ili psiho-emotivnim stanjem govornika.

Kratkovremeni spektar govora predstavlja raspodelu kratkovremene snage govornog signala. Prikazuje se u trodimenzionalnoj formi u obliku spektrograma, odeljak 3.91. Prilikom prikazivanja moguće je i korišćenje reljefnog predstavljanja trodimenzionalnog spektra u vremenu. Relativne varijacije ovog parametra u obliku histograma mogu ukazati na određeni tip govora, u smislu psiho-emotivnog stanja, ili pružiti informacije o fonetskom kapacitetu jednog govornika u odnosu na drugog, ali samo pod istim uslovima snimanja.

Dugovremeni spektar govora definiše boju glasa koja je određena rasporedom i veličinom viših harmonika, zavisi od oblika i dimenzija vokalnog trakta, i razlikuje se od govornika do govornika. To je perceptivna karakteristika koja glas čini prepoznatljivim tj. jedinstvenim i neponovljivim. Ukoliko su u spektru, na primer, zastupljene više frekvencije, reč je o piskavom glasu. Na boju glasa značajan uticaj imaju i artikulacione navike uslovljene socijalnim i regionalnim poreklom svakog pojedinca. Boja glasa se može menjati sa protokom vremena, a takođe i određeni zdravstveni ili emotivni razlozi mogu biti uzroci njenih promena.

Spektar galsa je parameter koji je izuzetno robustan na šum, klipovanje i ostale vrste izobličenja, a moguće ga je relativno jednostavno i brzo estimirati pomoću računara. Zato se on svrstava među primarne parametre u procesu identifikacije govornika. Međutim, pri korišćenju ovog parametra mora se imati na umu mogućnost imitiranja, što pri analizi iziskuje potrebu za što dužim segmentom govornog signala, dok su u praksi vrlo često ukupne dužine snimaka samo (10-20) s.

Formantne frekvencije i opsezi. Formantne frekvencije su definisane kao rezonantne frekvencije vokalnog trakta. One su karakteristike vokala i o njima je detaljnije bilo govora u odeljku 3.9.1. Formantne frekvencije su neposredno povezane sa oblikom i veličinom vokalnog trakta govornika.

Prediktorski koeficijenti. Analiza na bazi linearne predikcije (LP) predstavlja važan metod karakterizacije svojstava govora u vremenskom domenu. LP predstavlja proces gde se svaki odmerak talasnog oblika govornog signala predviđa na bazi sume linearno ponderisanih periodičnih odmeraka. Koeficijenti ponderisanja koji minimiziraju srednju kvadratnu grešku predikcije nazivaju se prediktorski koeficijenti. Obično je dovoljno 12 prediktorskih koeficijenata za adekvatno predstavljanje govora u frekventijskom opsegu do 5 kHz. Prediktorski koeficijenti variraju kao funkcija vremena i njihovo izračunavanje je dovoljno vršiti svakih 20 ms.

Nazalna koartikulacija. U kolokvijalnom govoru, zbog relativno sporih pomeraja artikulatora, oblik vokalnog trakta u bilo kom trenutku zavisi ne samo od glasa koji se trenutno izgovara već takođe i od njemu susednog glasa. Iz tog razloga glasovi se međusobno stapaju, odnosno preklapaju i ovaj fenomen je poznat kao koartikulacija. Zapaženo je da je njena priroda u datom kontekstu karakteristična za određenog govornika, naročito u slučaju generisanja nazalnih konsonanata. Akustička mera nazalne koartikulacije u kontekstu konsonant-vokal dobijena je određivanjem spektralne razlike između vrednosti spektra nazalnog konsonanta praćenog prednjim vokalom i istog konsonanta praćenog zadnjim vokalom.

Spektralna korelacija. Nađeno je da postoji značajan stepen korelacije između spektralnih komponenta kratkovremenog spektra. Primećeno je da ova korelisanost varira od govornika do govornika, Dobijanje stabilnog reprezentata takvih korelacija zahteva usrednjavanje na govornim materijalima dugim minimalno 30 sekundi.

Trajanje govornih segmenata ili brzina govora razlikuje se od govornika do govornika. Kod određivanja ovog parametra meri se efektivno trajanje kontinuiranih govornih segmenata i trajanje pauza između njih.

12.4.11 Kvalitet artikulacije

Kvalitet artikulacije određuje manja ili veća mišićna napetost artikulatora tokom produkcije govora. Tako se uslovno može govoriti o *čvrstoj* (intenzivnoj, artikulaciji sa jasnim nastupom), *tipičnoj* i *labavoj* (opuštenoj, nerazgovetnoj) artikulaciji. O kvalitetu artikulacije može se

govoriti kao o individualnoj karakteristici govornika koja odražava njegov temperament ili automatizovane navike.

Varijacije kvaliteta artikulacije kod istog govornika u značajnoj meri doprinose govornoj ekspresiji emocija, namera i stavova. Čvrstu artikaliciju imamo kada se radi o imperativnim i pretećim iskazima ili izrazima ljutnje. Labava ili opuštena artikulacija je pokazatelj izraza tuge. Kvalitet artikulacije direktno se odražava i na akustički kvalitet (boju) produkovanih segmenata govora.

12.4.12 Kvalitet glasa

Kvalitet glasa je višedimenzionalna karakteristika koja se može sagledavati iz raznih aspekata - kao stalno prisutno, tj. fundamentalno svojstvo govora koje identifikuje govornika kao pojedinca, i kao promenjiva kategorija tokom govornog procesa [26]. Na bazi fonatornih karakteristika, kvalitet glasa se opisuje kao: normalan, šaptav, zadihan, hrapav, sanjiv, kreštav, drhtav, šušlav, zvonak, grub, napet, opušten i sl.

Akustičkih korelata koji karakterišu kvalitet glasa ima mnogo, ali ćemo ovde nešto više reći o sledećima: džiter, šimer, tremor, NHR, SPI i VTI.

Džiter (jitter) predstavlja maksimalnu promenu periode osnovne frekvencije glasa, izražava se u procentima i govori o stepenu aperiodičnosti govornog signala. U normalnim uslovima je manji od 1%. Povišeni džiter označava glas lošijeg kvaliteta dok se manja vrednost džitera odnosi na kvalitetniji glas sa čistijom intonacijom.

Šimer (shimmer) predstavlja maksimalni iznos promene amplitude govornog signala u susednim periodima osnovne frekvencije. U normalnom govoru je manji od 0,35 dB. Velike vrednosti šimera su karaktersitične za promukli govor.

Tremor predstavlja nepoželjno i nepravilno podrhtavanje glasa (promena intenziteta i frekvencije osnovnog laringealnog tona). Frekvencijske modulacije su reda 4 Hz – 6 Hz a intenzitetske oko 9 dB i izrazito su nepravilne. Pojava tremora u glasu može značiti uticaj stresa ili nekog neurološkog obolenja.

NHR je parametar koji pokazuje kolika je razlika između prosečne vrednosti nivoa šuma u opsegu od 1500 Hz-4500 Hz, i nivoa harmonijskog dela spektra u opsegu od 70 Hz-4500 Hz (noise to harmonics ratio). Izražava se u decibelima i za normalni glas iznosi -10 dB do -12 dB. Što je vrednost manja, glas je kvalitetniji, a vrednosti iznad -10 dB ukazuje da u glasu ima suviše šuma i da se verovatno radi o nekom poremećaju glasa.

Indeks meke fonacije (SPI) predstavlja razliku nivoa harmonijskog spektra na niskim frekvencijama (70 Hz-1600 Hz) i nivoa harmonijskih komponenti na visokim frekvencijama (1600 Hz-4500 Hz). Veće vrednosti ukazuju na nedostatak potpunog zatvaranja glasnih žica prilikom fonacije.

Indeks turbulencije glasa (VTI) predstavlja razliku nivoa neharmonijskog spektra na visokim frekvencijama (1800 Hz-5800 Hz) i nivoa harmonijskih komponenti na niskim frekvencijama (70 Hz-4200 Hz). Veće vrednosti ukazuje na pojačan šum u glasu, (kao što pokazuju i manje vrednosti NHR), što je obično povezano sa nepotpunim zatvaranjem galsnih žica prilikom fonacije.

12.5 Percepcija govora

12.5.1 Percepcija fonema

Osnovno svojstvo govornog signala koje ga razlikuje od ostalih akustičkih (negovornih) signala jeste sadržaj informacije koju nosi sa sobom [5]. U procesu percepcije, koji ima više nivoa, slušalac u signalu govora prepoznaje lingvističku poruku koju mu je poslao govornik. Percepcija fonema podrazumeva integralno psihološko dejstvo svih njihovih akustičkih karakteristika (invarijantnih, tranzicionih i distinktivnih). Mnogi eksperimenti su pokazali da se percepcija govora ne zasniva na percepciji pojedinačnih fonema, već dolazi do paralelene percepcije konsonanata i vokala. Naime, u percepciji konsonanata od posebnog značaja su tranzicione karakteristike koje su i integralni deo vokala, tako da je definitivno utvrđeno da su slogovi tipa V (vokal), VC (vokal-konsonant) i CV (konsonant-vokal) osnovne perceptivne jedinice i da je njihovo trajanje oko 250 ms [5].

U prvom koraku procesa percepcije prepoznaje se minimalni segment govornog signala (perceptivna jedinica ili slog) u kojem je sadržana osnovna lingvistička informacija. Govor kao kontinualan proces možemo posmatrati kao niz perceptivnih jedinica koje se na višim perceptivnim nivoima integrišu u lingvističku poruku. Pri tome se percepcija svake prethodne perceptivne jedinice mora završiti pre nego počne percepcija naredne. U procesu percepcije svake perceptivne jedinice vrši se detekcija akustičkih karakteristika, njihovo akumuliranje i integracija, što zahteva izvesno vreme koje nazivamo trajanje perceptivne jedinice.

12.5.2 Percepcija prozodijskih karakteristika

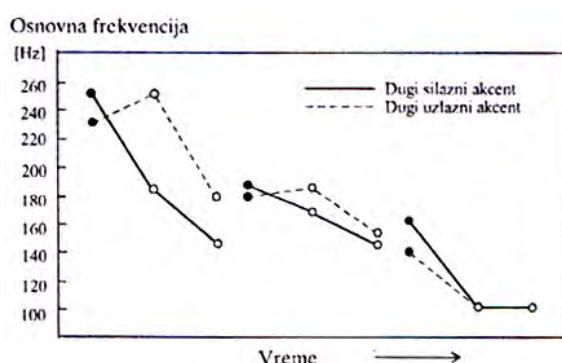
Upravo u pomenutim osnovnim segmentima govornog signala (perceptivne jedinice) se nalazi najveći deo govorne informacije. Ipak, deo obeležja govora je sadržan u prozodijskim karakteristikama koje se odnose na akcenat, intonaciju i vremenske karakteristike govora [5]. Prozodijske karakteristike se ne odnose na foneme već se protežu preko većih govornih celina kao što su slogovi, reči i rečenice.

Akcent reči, ili kraće akcenat, predstavlja isticanje, jačinom, visinom i trajanjem, jednog sloga u reči u odnosu na ostale slogove. Nosioci

slogova, ili slogovna jezgra, su uglavnom samoglasnici, pa promene koje unosi akcenat se odnose na njih.

U našem jeziku postoje četiri akcenta u kojima se kombinuje tonska priroda akcenta (uzlazni, silazni) sa dužinom samoglasnika u slogu (kratki i dugi). Tako imamo kratkouzlazni, kratkosilazni, dugouzlazni i dugosilazni akcenat. Akcenat ima i razlikovnu funkciju, jer se na osnovu njega može odrediti značenje reči.

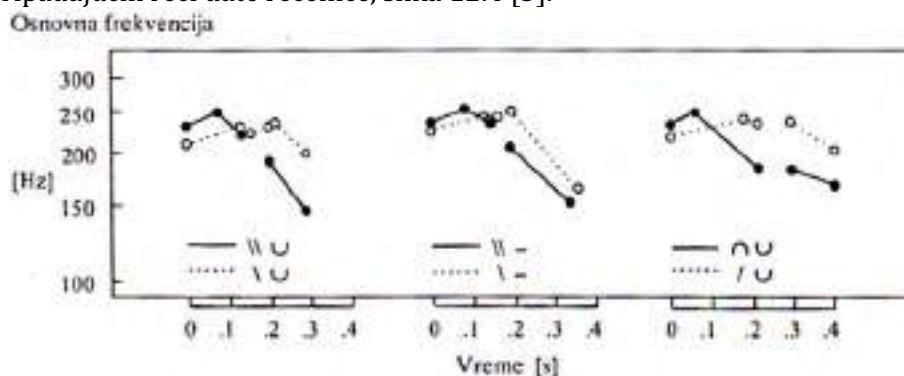
Utvrđeno je da se vrsta akcenta može najsigurnije prepoznati na bazi oblika krive promene osnovne frekvencije F_0 (kontura osnovne frekvencije F_0) slogovnog jezgra, slika 12.3 [5].



Slika 12.3 – Konture F_0 za nekoliko akcenatskih tipova dvosložnih reči [5]

Intonacija ili rečenični akcenat predstavlja naglašavanje reči na nivou rečenice, a manifestuje se kao melodijsko kretanje rečeničnog tona. Tako u zavisnosti od sadržaja rečenice, intonacija može biti uzlazna, silazna, ili ravna, Intonacija odslikava završenost ili nezavršenost poruke, i govori o tome da li poruka sadrži pitanje, izjavu, tvrdnju, uzvik i sl.

Ovde ćemo samo napomenuti da se i intonacija kao i akcenat može prepoznati iz kontura osnovne frekvencije svih slogova u okviru pripadajućih reči date rečenice, slika 12.4 [5].



Slika 12.4 – Promena osnovne frekvencije govora kao posledica intonacije rečenice sastavljene od tri trosložne reči [5]

Vremenske karakteristike govora na nivou rečenice opisuju se tempom i ritmom. Tempo podrazumeva brzinu izgovaranja rečenica koja zavisi od govornika i uslova u kojima se govori. Ritam predstavlja kombinaciju visine, jačine i tempa govora i određen je vremenskim rasporedom naglašenih i nenaglašenih slogova. Ritam možemo posmatrati i kao niz intervala koji nastaju između susednih naglašenih slogova.

Trajanje fonema u kontinualnom govoru zavisi od vrste akcenta i položaja u reči, a njegove prosečne vrednosti su: za zvučne foneme 87 ms, a za bezvučne oko 101 ms [5]. Slično je i sa trajanjem slogova koje zavisi od položaja reči u rečenici u kojoj se slog nalazi.

Dikcija podrazumeva pažljivo i jasno izgovaranje glasova uz odgovarajuću realizaciju svih elemenata prozodije (tonske visine glasa, intenziteta, trajanja i tempa), kako bi govor preneo sve misaono-emotivne sadržaje teksta koji mu je u osnovi.

12.5.3 Percepcija emocija u govoru

Poznato je da su informacije o emocionalnom stanju govornika utisnute u govorni signal i da ih slušalac sasvim dobro prepoznaje. Emocije se najčešće dele na primarne i sekundarne. U primarne spadaju: ljutnja, sreća, tuga, strah, gađenje i mržnja, dok u sekundarne spadaju: žaljenje, zabrinutost, ironija i iznenađenje [10]. Nosioци izražavanja emocija u govoru su varijacije pojedinih govornih obeležja (kvalitet glasa, kvalitet artikulacije i prozodijske karakteristike).

Tabela 12.3 – Osnovne invarijantne karakteristike fonema [5]

	Ljutnja	Sreća	Žalost	Strah	Gađenje	Tuga
Brzina izgovora	malo brža	brža ili sporija	malo sporija	mnogo brža	znatno sporija	znatno sporija
Srednja F_0	znatno veća	mnogo veća	malo niža	znatno veća	znatno niža	znatno niža
Opseg F_0	mnogo širi	mnogo širi	malo uži	mnogo širi	malo širi	znatno uži
Intenzitet	viši	viši	niži	normalan	niži	niži
Kvalitet glasa	zadihan, oštar ton	zadihan, razvikan	rezonantan	neregularna zvučnost	mumlanje, oštar ton	šaptav
Promena F_0	nagla, na naglašenom	blaga promena	promena naniže	normalna	široka finalna	duga blago opadajuća
Artikulacija	napeta	normalna	neprecizna	precizna	normalna	sa dugim pauzama

Prilikom govora sa emocionalnim sadržajem, modifikuje se artikulacioni deo vokalnog trakta (u odnosu na slučaj kada se radi o

neutralnom govoru), usled čega se menja položaj i širina formanata u izgovorenim glasovima. Manifestacija emocija u govornom izrazu ogleda se i u varijacijama prozodijskih karakteristika (tempo, glasnost, intonacija i ritam govora), u odnosu na neutralno govorenje (bez emocija). Slično je i sa kvalitetom artikulacije koji se menja u prisustvu emocija.

Može se reći da postoji korelacija između akustičkih karaktersitika u govornom signalu i opšteg psihološkog i emocionalnog stanja govornika, tabela 12.3 [5]. Međutim, kada se radi o pojedinačnim psihološkim i emocionalnim stanjima govornika, nije moguće utvrditi njihove pouzdane i validne akustičke korelate jer su isti podložni velikim individualnim razlikama.

Ipak, treba naglasiti da je osnova njihovog prepoznavanja multidimenzionalna i da je čine promene u prozodijskim karakteristikama kao i karakteristike koje definišu kvalitet glasa i kvalitet artikulacije.

12.6 Provera autentičnosti snimaka

Istraga u kojoj postoji audio materijal za forenzičku analizu može imati više pravaca i ciljeva. Međutim, kod svih njih je zajedničko to, da se prvo mora utvrditi autentičnost snimka, tj. mora se proveriti da li se radi o originalnom snimku. Pod originalnim snimkom se ovde podrazumeva prva pojava zvuka u obliku zapisa na magnetnoj traci, digitalnom nosaču zapisa, datoteci govorne pošte koja se čuva na serveru, optičkom disku ili u nekom drugom obliku, koji se može reprodukovati [37]. Audio forenzičar primenom naučne metodologije, specifične opreme, računarskih alata, iskustva i logičke interpretacije treba da utvrdi da li je snimak autentičan, ili je možda kopija, ili je na bilo koji način prepravljan ili doterivan posle originalnog snimanja (isecanje ili ubacivanje govornih segmenata, prepravka ili maskiranje pojedinih detalja u snimku i sl.).

Postupak za proveru snimaka radi utvrđivanja njihove autentičnosti se razlikuje od laboratorije do laboratorije, ali u većini slučajeva on sadrži više uobičajenih aktivnosti, kao što su [3], [20]:

- 1) fizički pregled;
- 2) izrada digitalne kopije;
- 3) priprema snimka za reprodukciju;
- 4) kritičko slušanje;
- 5) analiza talasnih oblika;
- 6) uskopojasna spektralna analiza;
- 7) spektrografska analiza;
- 8) analiza digitalnih podataka i
- 9) ostale specifične analize.

Tokom poslednjih dvadeset i nešto godina došlo je do brojnih novina u oblasti snimanja i reprodukcije zvuka, među kojima su najznačajnije: zamena analognog medija za upisivanje audio signala digitalnim, i usavršavanje softverskih programa za analizu i obradu audio signala. Ovo je dovelo do značajnih promena u mnogim delovima postupka za proveru autentičnosti audio snimaka, koji je korišćen ranije, u eri analognih tehnologija.

Ovde treba napomenuti činjenicu da se i pored nabrojanih novina još uvek u audio forenzici mogu sresti analogni snimci. Postupak za proveru analognih snimaka obuhvata deo prethodno navedenih aktivnosti, i to one pod rednim brojevima: 1), 4) – 7) i 9).

Važno je istaći da forenzičke snimke nije ni tako lako menjati a da to ne ostavi bar neke prepoznatljive tragove na njima. Ovi snimci obično sadrže visoke nivoe buke ambijenta, muziku, televizijske i radio emisije, saobraćajnu buku i druge zvuke; imaju ograničen odnos signal-šum i povećana izobličenja; sadrže artefakte kompresije, efekte skrivenih ili loše postavljenih mikrofona, zvuke kontakata odeće sa telom mikrofona, povećanu reverberaciju itd. Svaka izmena snimka ovakvih karakteristika neminovno ostavlja određene tragove, koje je moguće otkriti preslušavanjem i laboratorijskim analizama snimka, uz povećan napor i iskustvo ispitivača.

Zavisno od slučaja do slučaja provera autentičnosti audio snimaka ne mora uvek da prođe kroz sve faze navedenog postupka. Ali to ipak podrazumeva da je audio forenzičar u međuvremenu došao do zaključaka koji su nedvosmisleno potvrđeni određenim brojem laboratorijskih nalaza.

Pre nego što počne tehnički pregled, dostavljeni nosač audio zapisa treba na pogodan način obeležiti da se ne bi pomešao sa ostalim sličnim nosačima. Tokom procesa analize ispitivač vodi detaljne radne beleške, a po potrebi sastavlja i formalni laboratorijski izveštaj koji se dostavlja naručiocu analize [3].

12.6.1 Fizička provera

Audio forenzičar treba, pre svega, da utvrdi stanje i osnovna svojstva nosača audio zapisa koji je dostavljen na analizu. Ako se radi o magnetnoj traci potrebno je proveriti kućište da nije na bilo koji način oštećeno i da li odgovara tipu i veličini trake, proveriti da li na traci postoje bilo kakvi fizički spojevi koji bi mogli da upute na eventualne njene izmene ili popravke. Potom treba proveriti da li postoje oštećenja trake (nedostatak magnetnog oksida, istegnute ivice, ogrebotine, ostaci ferrofluida, mrlje od mastila i sl.). Ako je moguće treba uporediti navodni datum snimanja sa datumom proizvodnje trake, utvrditi proizvodni ili serijski broj i konfiguraciju tragova

na njoj. Na kraju korisno je utvrditi dužinu trake (mereći vreme reprodukcije na odgovarajućem laboratorijskom uređaju) [3].

Kada su u pitanju ostali nosači audio zapisa (ne magnetne trake) potrebno je, takođe, izvršiti opšti fizički pregled kućišta i utvrditi da nije napuklo ili slomljeno, proveriti površine nosača zapisa da nisu ogrebane ili oštećene, proveriti elektronske kontakte da nisu oštećeni itd.

Sva zapažanja prilikom ovog pregleda treba zabeležiti i, po potrebi, fotografisati ili snimiti kamerom.

12.6.2 Izrada digitalne kopije

Digitalni audio snimak je prvo potrebno otvoriti u odgovarajućem softveru za snimanje i analizu podataka da bi se na bazi definisanog algoritma utvrdio njegov jedinstveni numerički reprezent, tzv. kompozitni (hash) broj ili kompozitna vrednost. Kompozitna vrednost je kao digitalni otisak prsta za ogovarajući skup digitalnih podataka (fajl). Matematički se izračunava iz sadržaja datog skupa podataka i prikazuje se u obliku niza brojeva i slova. Postoji više algoritama koji se koriste za ovu namenu, a od onih koji se najščešće primenjuju u audio forenzici pomenućemo samo MD5 (Message Digest 5). Izmenom bilo kog podatka iz datog skupa, menja se njegova kompozitna vrednost, pa se ovaj reprezent koristi kao jedan od elemenata za garanciju autentičnosti analiziranog skupa podataka, u našem slučaju analiziranog audio snimka u digitalnoj formi.

Nakon utvrđivanja kompozitne vrednosti analiziranog digitalnog audio snimka treba napraviti njegovu kopiju, izračunati njenu kompozitnu vrednost i potvrditi da je istovetna sa kompozitnom vrednošću polaznog snimka. Posle toga, sve dalje analize treba raditi na ovoj kopiji [20].

12.6.3 Priprema snimaka za reprodukciju

Raspoloživi snimak je potrebno pripremiti tako da njegova reprodukcija bude što kvalitetnija tj. sa što manje nekorisnih produkata, da bi se kasnije, kritičko slušanje i druge provere obavili što uspešnije. Zato je prvo potrebno odrediti oblik podataka na raspoloživom mediju, a zatim identifikovati odgovarajuće uređaje ili softvere za reprodukciju, odnosno ako je potrebno, prvo za konverziju u drugi pogodniji format, pa potom za reprodukciju.

Digitalni audio snimci mogu se nalaziti na pokretnim (CD; DAT, Mini Disc, NT-2, DVD, Hard disc) ili nepokretnim (fleš memorije) nosačima zapisa. Najčešće se nalaze u obliku PCM (wavefile) ili MP3 formata. Snimci ovih formata mogu se otvoriti i pregledati na računaru uz pomoć standardnih audio softvera za reprodukciju ili editovanje. Pored pomenuta dva najčešća formata, mogu se snimci pojaviti i u nekom od specijalnih (zaštićenih) formata, u kom slučaju je potrebno obezbediti odgovarajuće uređaje ili

softverske pakete za njihovu reprodukciju, ili prvo uraditi konverziju u neki od uobičajenih formata, a potom ih reprodukovati preko raspoloživih uređaja.

Radi optimizacije uslova za reprodukciju analognih snimaka potrebno je voditi računa o formatu snimka, obliku i rasporedu tragova na traci, podešenosti glave za reprodukciju, brzini trake, nivou signala itd. Kada se sistem za reprodukciju podesi, potrebno je analogni signal snimiti u digitalnom nekomprimovanom formatu. Pri tome treba odabrati frekvenciju uzorkovanja i rezoluciju A/D konverzije koji će obezbediti kasniju kvalitetnu reprodukciju. Ovako dobijena digitalna kopija se koristi kao radna kopija za dalju analizu [20].

12.6.4 Kritičko slušanje

Pod kritičkim slušanjem se podrazumeva pažljivo preslušavanje celog snimka od strane iskusnog ispitivača i beleženje bilo kakve uočene izmene ili nepravilnosti. Testove kritičkog slušanja treba uvek izvoditi bez bilo kakvog filtriranja signala, koristeći visokokvalitetni sistem za reprodukciju sa oko-ušnim slušalicama na glavi. Procene do kojih se dođe tokom kritičnog slušanja, iako nisu konačne, pružaju značajne pokazatelje u pronalaženju mesta koja zahtevaju specifične analize ili dodatne preglede snimka. Zaključci o autentičnosti snimka se nikada ne donose samo na bazi kritičkog slušanja, već se u ovoj fazi formiraju hipoteze koje će biti testirane u kasnijim fazama objektivne analize zvučnog zapisa [20].

Kritičko slušanje treba započeti preliminarnim preslušavanjem radi upoznavanja sa sadržajem i osnovnim osobinama snimka. Potom je potrebno, sa posebnom pažnjom, analizirati: 1) detalje vezane za snimanje i editovanje materijala 2) pozadinske zvukove, i 3) osnovne informacije, odnosno informacije iz prvog plana snimka. Preliminarno preslušavanje je važan prvi korak, pošto ukazuje na delove snimka koje treba dalje ispitati, pomaže da se karaktersitični događaji na snimku kasnije brže pronađu, i generalno olakšava sve naredne korake analize.

U fazi analize snimanja i editovanja materijala treba evidentirati svaki nagoveštaj izmene snimka, spajanja različitih snimaka, pojave ma kakvog diskontinuiteta u snimku itd. Važno je uočiti tragove koji su mogli nastati tokom editovanja - dodavanja, brisanja, i kombinovanja fajlova. Potrebno je pažnju skoncentrisati na tonsku konzistentnost audio signala (govor), i pozadinske buke na snimku. Konzistentnost snimljenog audio signala je važna zato što audio snimci koji nisu autentični najčešće su, radi pokušaja prevare osobe koja će ih eventualno preslušavati, urađeni kao kombinacija dva ili više audio zapisa. Primetne promene u snimljenom

audio signalu ili u pozadinskoj buci su znaci koji upućuju na mogućnost da se audio zapis može smatrati lažnim tj. falsifikatom.

Svaki kompletan prekid ili neprirodan pojačani tranzijentni signal, u snimku treba da budu predmet dalje analize. Pri ovome posebno treba obratiti pažnju na: start i stop funkcije u snimku, na fluktuacije brzine reprodukcije, kao i na druge čujne varijacije u karakteru snimljenog materijala koje takođe zahtevaju dalju analizu.

Analiza pozadinskih zvukova odnosi se na opažanja kao što su: neprirodne promene ambijenta, očigledne razlike u nivou pozadinske buke, pojave signala određenih izvora buke sa uzastopnim ponavljanjem, pojave muzike, pojave šuma snimača ili trake, suptilne promene nivoa digitalnog šuma, pojave prekida pozadinskih razgovora, prisustva kratkotrajnih signala niskog nivoa nepoznatog porekla; pojave neusaglašenih zvukova rukovanja mikrofonom; pojave bruma ili zujanja mrežnog napona na baterijskim snimačima, odsustva očekivanih efekata sredine ili prenosnog kanala, odsustva reverberacije itd.

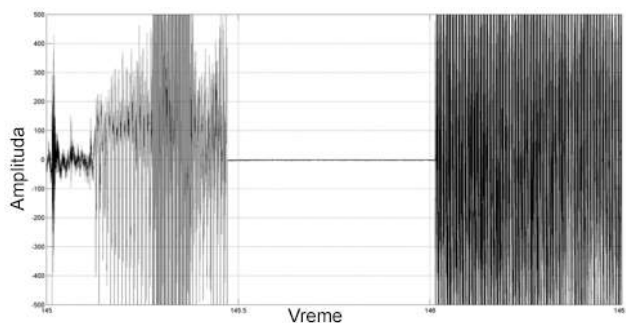
U poslednjoj fazi kritičkog slušanja potrebno je obratiti pažnju na informacije iz prvog plana za koje su potrebne dodatne analize a koje uključuju iznenadne, neprirodne ili lingvistički specifične promene u individualnom glasu ili kadenci, neusaglašenosti između vremena početka i završetka i stvarne dužine snimanja, nagle i neobjašnjive promene teme razgovora, itd.

Nakon završetka kritičkog slušanja ispitivač može dalje korake analize organizovati tako, da jednovremeno i sluša i posmatra snimak u realnom vremenu, čime se uspostavlja direktna audio-vizuelna korelacija pri praćenju konkretnog fenomena.

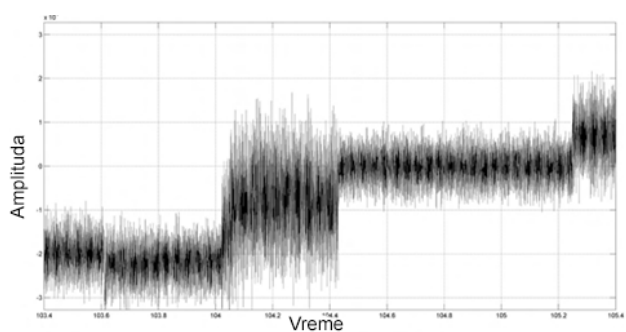
12.6.5 Analiza talasnih oblika signala visoke rezolucije

Analiza talasnih oblika audio signala u visokoj rezoluciji omogućava da se detaljnije, sada vizuelno, sagledaju pojedine čak i veoma male neuobičajene promene u vremenskom toku signala. Prateći amplitudu signala snimljenog zvuka u funkciji vremena moguće je utvrditi tačan vremenski redosled događaja identifikovanih tokom kritičkog slušanja. Ova analiza se može primeniti i na analogne i na digitalne snimke.

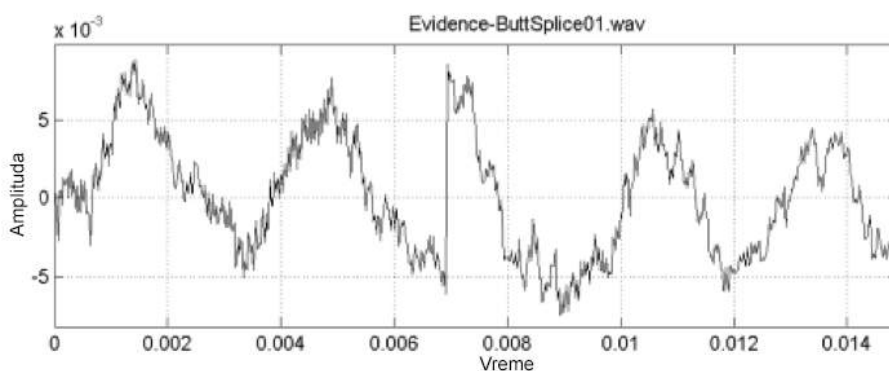
Prilikom analize moguće je primetiti prekide u snimku, slika 12.5 [20], što ukazuje na verovatno brisanje dela signala. Pojava promene nivoa jednosmerne komponente u signalu, slika 12.6 [18], ukazuje na promenu pojačanja signala prilikom snimanja ili na ubacivanje, na pojedina mesta u signalu, delova istog ili nekog drugog snimka. Ovom analizom moguće je uočiti delove signala sa izrazito brzim promenama, kao i pojave klipovanja vrhova signala, Takođe je moguće detektovati određene izmene u okviru jedne ili više reči, slika 12.7 [20], i sl.



Slika 12.5 – Prekid audio signala vidljiv u postupku analize visoke rezolucije [20].



Slika 12.6 – Promena jednosmernog nivoa audio snimka vidljiva u postupku analize visoke rezolucije [20].



Slika 12.7 – Primer izmene (editovanja) dela snimka vidljiv u postupku analize visoke rezolucije [20]

Ovom analizom je moguće odrediti razmak između glava za snimanje i brisanje, analizirati oblik i vremenski razmak signala različitih snimljenih događaja, izvršiti detaljniju analizu prekida snimanja, i tranzijentnih događaja i drugih pozadinskih zvukova u snimku [20]. Svi ovi nalazi bacaju novo svetlo i upotpunjuju sliku onoga što je na snimku primećeno u fazi kritičkog slušanja.

12.6.6 Uskopojasna spektralna analiza

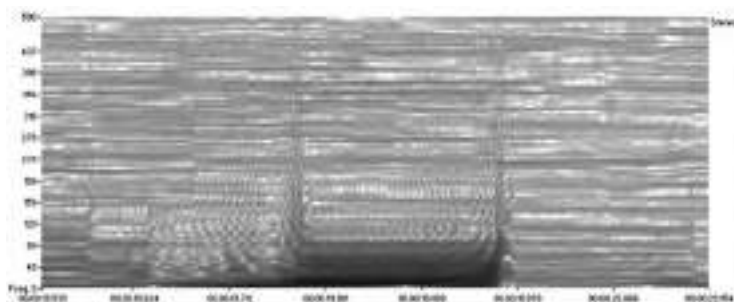
Ovom analizom se u osnovi proverava: postojanje preslušavanja (aliasing) prilikom konverzije signala, vrednost frekvencije uzorkovanja, postojanje pozadinskih zvukova, oblik konvolucionih i prenosnih karakteristika, i prisustvo komponenti frekvencije električne napojne mreže. Iz perspektive audio forenzičara efekti preslušavanja (aliasing) u ispitivanom snimku mogu nastati u originalnom procesu snimanja, tokom presnimavanja ili nepravilnom reprodukcijom konvertovanog ili obrađenog digitalnog fajla (datoteke). Isto tako, frekvencijski opseg snimljenog signala koji ne odgovara originalnoj frekvenciji uzorkovanja mogao je da nastane usled defekta snimača, procesa kopiranja ili nepravilnom reprodukcijom konvertovanog ili obrađenog digitalnog fajla.

Analize pozadinskih zvukova, i konvolucione i prenosne karakteristike se sprovode upoređivanjem frekvencijskih spektara događaja koji se pojavljuju na ispitivanom snimku sa poznatim zvukovima i karakteristikama sistema za snimanje. Ako na snimku napravljenom snimačem sa baterijskim napajanjem postoji ton frekvencije napojne mreže (obično 50 ili 60 Hz) ili jedan ili više njenih harmonika, verovatno se radi o uticaju šuma iz fluorescentne rasvete ili je smetnja nastala tokom procesa kopiranja snimka [20].

Kod analognih snimaka proverava se ukupna frekvencijska karakteristika i eventualno prisustvo diskretnih tonskih komponenti u snimku. Ova ispitivanja obuhvataju i analizu grešaka u brzini transporta trake, analizu pozadinskih zvukova, analizu karakteristika prenosnog kanala, analizu višestrukih komponenti preslušavanja iz električne napojne mreže itd [3]. Svaki od primenjenih pojedinačnih testova u okviru spektralne analize snimka može ispitivaču da pruži dodatne elemente na bazi kojih će sa više verovatnoće moći da potvrdi ili opovrgne autentičnost snimka.

12.6.7 Spektrografska analiza

Spektrografska analiza pruža grafičku prezentaciju delova audio zapisa, koja jasno ilustruje određene vrste događaja u fazi snimanja ili editovanja snimka, kao što je na primer aktivnost glave za brisanje prikazana na slici 12.8 [13]. Ovu vrstu analize ne treba koristiti kao zamenu, već kao dopunu analizi talasnih oblika visoke rezolucije i uskopojasnoj spektralnoj analizi, o kojima je prethodno bilo govora.



Slika 12.8 – Vidljivi trag aktivnosti glave za brisanje na analiziranom snimku [13].

12.6.8 Analiza digitalnih podataka

Analiza digitalnih podataka se vrši specijalizovanim softverima koji omogućavaju vizuelni pregled stvarnih bitova i bajtova koji se nalaze u sastavu audio i meta podataka datog snimka. Meta podaci sadrže administrativne informacije koje se odnose na audio podatke. Podaci se uobičajeno analiziraju u heksadecimalnom, ili ređe, ASCII formatu. Na ovaj način analizira se datoteka sa namerom da se utvrdi njena struktura s obzirom na lokacije audio i meta podataka, i da se potvrdi usklađenost strukture sa standardnim formatom. Ako je format podataka na neki način zaštićen, i nije u skladu sa standardnim, potrebna je detaljnija analiza radi utvrđivanja njegove stvarne strukture. Meta podaci se obično nalaze na početku ili na kraju datoteke, ali takođe mogu biti razdvojeni i locirani unutar samih audio podataka. Kod nekih digitalnih audio zapisa glavna datoteka sadrži samo audio podatke, dok se meta podaci nalaze u odvojenoj datoteci.

Kada se utvrdi struktura podataka, tada je moguće proveriti da li meta podaci sadrže sve potrebne informacije vezane za postupak nastajanja snimka, kao što su: datum i vreme početka i kraja snimanja, dužina snimka, konfiguracija kanala, frekvencija odabiranja, šema kvantizacije i kompresije, model i serijski broj snimača, informacije o kućištu nosača zapisa, informacije o vlasniku telefona i pozvanom telefonskom broju (ako je snimak napravljen u vezi sa telefonskim razgovorom) itd. Sa poznavanjem ovih podataka moguće je potvrditi pojedine nalaze dobijene u prethodnoj analizi, a meta podaci pružaju dodatne informacije u vezi sa snimkom, do kojih nije bilo moguće doći analizom zvučnog zapisa.

Analizom audio podataka, u čije detalje ovde nećemo ulaziti, moguće je otkriti eventualne izmene, brisanja ili dopune datoteke, što govori u prilog činjenici da se mora sumnjati u njenu originalnost.

12.6.9 Ostale specifične analize

Broj potencijalnih postupaka za analizu signala radi utvrđivanja autentičnosti snimaka je znatno veći nego što je ovde navedeno. Postojeće metode se stalno poboljšavaju i proširuju jer novi digitalni audio formati zahtevaju nove načine provere. U narednom odeljku ukratko ćemo opisati jednu takvu, relativno novu metodu, koja se bazira na analizi frekvencije električne napojne mreže. Takođe ćemo samo pomenuti i metode kao što su: vizualizacija tragova na digitalnoj magnetnoj traci bez korišćenja ferofluida i provera kontinuiteta faze snimljenog audio signala.

Tragovi fluktuacije frekvencije električne napojne mreže

Fluktuacije frekvencije električne napojne mreže, ($\pm 0,5$ Hz), se preslušavaju u sistem za audio snimanje koji se napaja preko naizmjenične struje (ili iz baterija ali je u neposrednoj blizini opreme napajane naizmjeničnom strujom), i završavaju kao nepoželjna smetnja u audio snimku. Ove podatke je moguće „izvući“ iz audio snimka, pa se kao takvi mogu uporediti sa bazom podataka poznatih za električnu mrežu. Iz ovog poređenja je moguće utvrditi da li snimak ima prekida ili promena kao i tačan datum i vreme njegovog snimanja [20], [24].

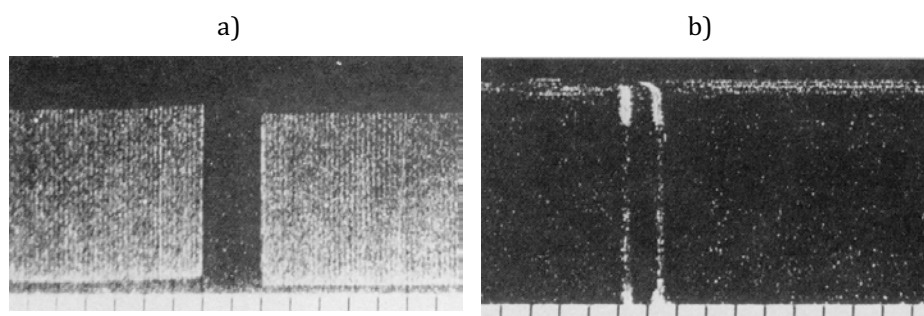
Nažalost, ovaj postupak se ne može uvek primeniti, jer postoje slučajevi dobro zaštićene opreme za snimanje kada je preslušavanje iz napojne mreže minimalno, ili kada se oprema za snimanje napaja preko baterija i udaljena je od zone uticaja kablova napojne mreže. Problem, za sada, tako je može biti i nepostojanje pouzdane arhive relevantnih podataka o stanju napojne mreže [21].

Vizualizacija strukture tragova na magnetnoj traci

Kod analognih snimaka na magnetnoj traci često je potrebno utvrditi poziciju i konfiguraciju snimljenih tragova. Ovo se postiže vizualizacijom magnetnih tragova tehnikom tzv. „magnetnog razvijanja“, pri čemu se na „oksidnu“ stranu trake nanosi razblaženi rastvor odgovarajućeg ferofluida. Pri ovome tečnost iz ferofluida ispari a feritne čestice, veličine (0,01-3) μm , ostanu pravilno raspoređene u zonama veće magnetizacije, praveći mozaik koji predstavlja sliku informacija zapisanih na traci. Čestice su svetlije boje dok je osnova trake tamnija pa se detalji njihovog rasporeda mogu jasno videti pod mikroskopom. Tragovi snimljenog zvuka se vide kao paralelne vertikalne linije normalne na ivicu trake, slika 12.9a [3], dok otisci glava za snimanje i brisanje na prelazima iz pojedinih režima rada snimača (stop-

start, snimanje-pauza itd.) ostavljaju praznine i diskontinuitete, slika 12.9a i 12.9b [3].

Otisci glava za reprodukciju i brisanje su različiti na originalnom snimku i njegovoj kopiji, čak i kada je kopija napravljena na istom snimaču, pa ju je tako moguće sigurno prepoznati. Postupkom opisane analize se mogu utvrditi i neke druge karaktersitike snimaka o čemu ovde dalje neće biti govora.



Slika 12.9 – Primena magnetnog razvijanja za identifikaciju aktivnosti glava za: a) snimanje (stop/start) i b) brisanje (stop/start). Vremenski markeri uz donje ivice su na rastojanju od 0.25 mm [3]

12.7 Poboljšanje kvaliteta forenzičkih audio snimaka

Kvalitet forenzičkog audio snimka spornog i/ili nespornog glasa je širi pojam od kvaliteta govornog signala snimljenog na njemu. Kvalitet snimka se ogleda i u dodatnim karakteristikama kao što su: dužina snimka, jezički sadržaj, zdravstveno i emotivno stanje govornika i potencijalne manipulacije glasom (simuliranja, imitacije) [35].

Kada se radi o karakteristikama govornog signala na snimku, najbitnijim smatramo kvalitet govora i njegovu razumljivost. Pod kvalitetom govora podrazumevamo perceptivnu ocenu slušaoca kako se čuje ono što je na snimku, tj. kakva je *prirodnost glasa, prepoznatljivost govornika, prijatnost za slušaoca, karakteristike maskirajućih smetnji* [35], itd. Pod razumljivošću govora podrazumevamo stepen sa kojim je slušalac razumeo šta je rečeno.

Treba imati u vidu da na ovakvim snimcima nije uvek moguće jednovremeno poboljšati i kvalitet govora i njegovu razumljivost [23], [28]. Stoga se uvek daje prioritet razumljivosti, i ne treba je smanjivati kako bi se dobio veći kvalitet govora.

Najčešći razlog za poboljšanje forenzičkih audio snimaka je poboljšanje razumljivosti govora radi dešifrovanja dijaloga u svrhu izrade transkripata i/ili prepoznavanja govornika. Pored toga, često postoji potreba da se sporni i nesporni snimak dovedu na što približniji nivo po

kvalitetu, kako bi poređenje glasova bilo što pouzdanije. To se postiže različitim formama filtriranja signala čime se sa snimaka uklanjaju pojedine vrste izobličenja i signala smetnji [35]. Uklanjanjem smetnji sporni snimak postaje prijatniji za slušanje što smanjuje zamor slušaoca eksperta prilikom njegovog pažljivog i često dugotrajnog preslušavanja. Na ovakvom snimku je takođe moguće jasnije prepoznati druge zvukove važne za istražne radnje ili sudske procese.

Sve radnje na poboljšanju snimka izvode se na njegovoj kopiji koju treba na početku napraviti da se original ne bi izmenio ili ošteti. Pored toga, svaki korak od prijema do vraćanja snimka naručiocu analize neophodno je pažljivo pratiti i dokumentovati. Pretpostavlja se da je prethodno izvršena provera autentičnosti snimka.

12.7.1 Uzroci niskog kvaliteta govornog snimka u audio forenzici

Uzroci niskog kvaliteta govornog snimka i slabe razumljivosti govora u audio forenzici su šum i izobličenja. Razlog pojave ovih smetnji u snimku je činjenica da se snimanje relevantnog razgovora često obavlja tajno preko skrivenog mikrofona. Tajnost sistema za snimanje dovodi do veoma suženog izbora mogućih pozicija mikrofona u odnosu na učesnike. Pored toga česte su smetnje nastale od različitih zvukova iz okruženja, preterane reverberacije prostorije u kojoj je snimano ili trenja mikrofona o odeću sa kojom dolazi u kontakt. Kvalitet snimljenih telefonskih razgovora takođe je po pravilu niskog nivoa, zbog uticaja ambijentalne buke u okruženju sagovornika, veoma različitih načina držanja telefona tokom razgovora, uticaja šuma iz prenosnog kanala, uticaja interferencije stranih elektromagnetnih polja itd. Svi ovi uzroci, pojedinačno ili u grupama, dovode do promena u snimku govora koje nazivamo distorzijama govornog snimka.

Generalno se distorzije govornog snimka mogu podeliti u dve grupe: distorzije tehničke prirode (prouzrokovane sistemom snimanja, nastale neadekvatnom upotrebom ili rukovanjem sistemom snimanja i nastale maskiranjem govornog signala raznim vrstama smetnji) i distorzije subjektivne (individualne) prirode (nastale usled varijacija u kvalitetu glasa, tempu i ritmu govora i sl.) [23].

Smetnje tehničke prirode prema načinu svog delovanja na signal govora mogu biti dvojake: aditivne ili konvolucione. Aditivne smetnje možemo pripisati izvorima buke kao što su: saobraćaj, pozadinska muzika, šum mikrofona, šum prenosnog kanala, buka ambijenta itd. One se dodaju govornom signalu. Konvolucione smetnje (koje nastaju kao posledica reverberacije i akustičkih rezonansi) su rezultat delovanja akustičnog okruženja na signal govora. Njihov uticaj se ogleda u vremenskim i spektralnim modifikacijama govornog signala.

Prisustvo smetnji u audio snimku dovodi do pojave novih komponenti u frekvencijskom spektru i maskiranja pojedinih deonica korisnog tj. govornog signala. Smetnje ujedno utiču i na smanjenje dinamičkog opsega korisnog signala. Ako nivo smetnji nije suviše visok, i dalje je moguće percepirati korisne informacije koje su ugrađene u govornom signalu ali to zahteva više pažnje i dovodi do zamora pri slušanju ovakvog signala. Pri još većem nivou smetnji govor postaje slabo razumljiv. Da bi takav snimak mogao da nađe primenu u forenzičkoj praksi neophodno ga je poboljšati.

12.7.2 Načini poboljšanja forenzičkih audio snimaka

Poboljšanje snimka obavlja se potiskivanjem različitih vrsta šuma sa njega, i uklanjanjem drugih oblika smetnji, pri čemu je važno istaći da ne postoje univerzalni postupci obrade, već se pojedine metode obrade biraju prema tipu i karakteru uočenih nedostataka. U nekim slučajevima pogodno je da se privremeno izoluju segmenti snimka koji sadrže šum visokog nivoa, određeni glas ili druge prepoznatljive smetnje, da se tako izolovani poboljšaju i ponovo vrate nazad.

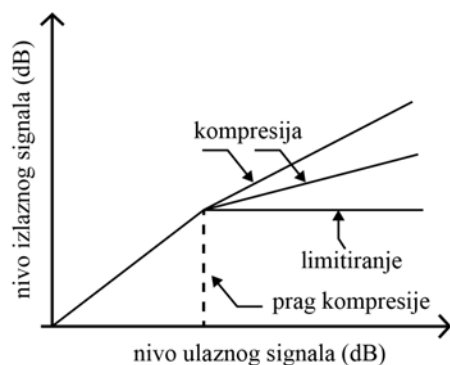
Poboljšanje kvaliteta snimaka se postiže tehnikama u vremenskom (automatska regulacija pojačanja) i frekvencijskom (različite vrste digitalnog filtriranja) domenu. Alati za ovu namenu danas su uglavnom realizovani kao softverski programi (plug-ins) prilagođeni za korišćenje na računarima. Zasnovani su na matematičkim algoritmima iz teorije obrade signala, i s obzirom na brzinu i mogućnosti savremenih računara, predstavljaju efiksna sredstva za poboljšanje forenzičkih audio snimaka.

Automatska regulacija pojačanja

Poboljšanje u vremenskom domenu obično podrazumeva korekciju pojačanja radi normalizacije anvelope snimljenog audio signala [15]. To se u praksi svodi na primenu automatske kontrole pojačanja tj. kompresije i graničenja (limitiranja), slika 12.10, kako bi se održao relativno konstantan nivo signala tokom reprodukcije. Tako, delovi snimka sa signalom male amplitude se pojačavaju, a delovi sa glasnim signalom se slabe ili ostaju nepromenjeni.

Kompresija i graničenje signala nalaze osnovnu primenu kada u snimku postoje razlike u nivou signala sagovornika ili kada delovi signala imaju izrazito veliku amplitudu. Korisnik ima mogućnost da menja prag i stepen kompresije (nivo signala iznad kojeg se dešava kompresija i odnos

kompresije) kao i vremena reakcije i otpuštanja (trajanje prelaznih stanja kod početka i kraja delovanja kompersora).



Slika 12.10 – Automatska regulacija pojačanja

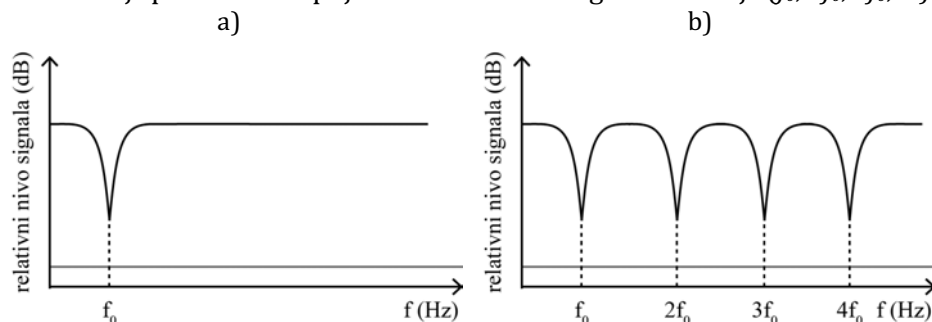
Digitalno filtriranje

Osnovni pojmovi o električnim filtrima su izneseni u odeljku 8.2 ove knjige. Kao što je već rečeno filtre je moguće realizovati u analognoj ili digitalnoj formi. Ne ulazeći u detalje jednog i drugog oblika realizacije filtera, ovde ćemo samo napomenuti da današnji alati za forenzičko poboljšanje audio snimaka koriste digitalne filtre [23]. Osnovni elemenat digitalnih filtera je procesor signala (DSP) koji obavlja numeričke operacije na uzorcima audio signala. Procesor može da bude procesor opšte namene kao što je PC računar, ili specijalizovani DSP čip (elektronsko kolo). Takođe je važno napomenuti da su digitalni filteri fleksibilniji i raznovrsniji od analognih, kada se imaju u vidu mogući načini obrade signala. Neke vrste digitalnih filtera imaju sposobnost da se prilagode promenama u karakteristikama signala (adaptivni filteri) ili da pored klasičnog razdvajanja signala po frekvencijama, poprave ili restauriraju signale koji su na određeni način izobličeni [23].

U forenzičkom poboljšanju audio snimaka koristi se veliki broj različitih vrsta digitalnih filtera koji mogu biti stacionarni (ne menjaju parametre sa promenom karakteristika signala) i adaptivni (čiji se parametri menjaju prema datom algoritmu u vezi sa promenom nekog svojstva signala). Među njima razlikujemo frekvencijski selektivne filtre (propusnici niskih, visokih i opsega frekvencija itd.), ekvalizere (specifične vrste filtera koji određeni opseg frekvencija mogu da oslabe ili izdignu) i restauratore signala (filteri za eliminaciju impulsnih smetnji, eliminaciju klipovanih delova signala i sl.). Detaljniji prikaz načina primene digitalnih filtera u procesu poboljšanja forenzičkih audio snimaka izlazi iz obima ove knjige, ali ćemo radi ilustracije, u narednim redovima u najprostijoj formi objasniti par karakterističnih primera.

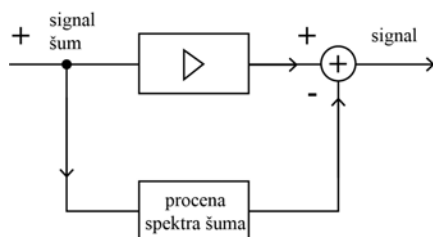
Uskopojasne smetnje. U ovom slučaju primenjuje se filter nepropusnik opsega učestanosti, slika 12.11a, koji potiskuje uskopojasnu

smetnju. Tom prilikom potiskuje se i uzani deo spektra govornog signala, ali to ne smanjuje razumljivost govora budući da je taj deo spektra već bio maskiran uskopojasnom smetnjom. Ukupan efekat je poboljšanje kvaliteta govora. Ako je uskopojasna smetnja harmonijske prirode (signal brujanja preslikan iz napojne mreže i sl.), onda se koristi grupa ovakvih filtera, tzv. češljasti filter, slika 12.11b, čije su centralne frekvencije maksimalnog potiskivanja podešene na pojedine harmonike signala smetnje ($f_0, 2f_0, 3f_0, \dots$).



Slika 12.11 – Eliminacija uskopojasnih smetnji: a) uskopojasni filter nepropusnik opsega, b) češljasti filter

Širokopojasne smetnje. Za ovaj slučaj razvijen je niz algoritama koji u pauzama govora vrše procenu spektra šuma (snaga šuma u funkciji frekvencije), i ovaj podatak koriste za njegovo potiskivanje. Jedna metoda koja se zasniva na ovom principu je tzv. *spektralno oduzimanje* [15], [23], [36]. Pošto se formira procenjeni spektar šuma, potrebno ga je oduzeti od spektra šuma koji postoji u ulaznom signalu, slika 12.12. Efikasnost spektralnog oduzimanja zavisi od pouzdanosti procene spektra šuma. Kada su u pitanju stacionarni ili sporo promenljivi šumovi (saobraćajna buka, pozadinska buka, buka ventilatora, ujednačen zvuk motora i sl.) dobijaju se prihvatljivi rezultati, međutim kada se šum brzo menja moraju se primeniti sofisticiraniji algoritmi.



Slika 12.12 – Principijska blok šema sistema spektralnog oduzimanja za eliminaciju širokopojasnog šuma

Impulsne smetnje. Algoritam za filtraciju impulsa (krckanje, pucketanje, udarci, pucnjava i sl.) prisutnih u audio snimku je tako podešen da se prvo u digitalnoj povorci odbiraka signala detektuje impuls. U sledećem koraku on se menja sa impulsom čija se amplituda procenjuje na

bazi vrednosti amplituda susednih odbiraka [15]. Detekcija samog impulsa se zasniva na činjenici da algoritam automatski prepoznaje razliku u veličini odbiraka koji pripada impulsu i susednih odbiraka.

Auditivna separacija. Na forenzičkim audio snimcima često se nalaze nestacionarni signali šuma, u delovima snimka signal govora je uronjen u šum, ili je pomešan sa signalom jednog ili više drugih govornika (*cocktail party* efekat). Ovakve smetnje nije moguće efikasno potisnuti tehnikama koje su prethodno navedene. Zato je logično što se u digitalnoj obradi signala teži ka modelu koji će omogućiti potiskivanje nestacionarnih smetnji na sličan način kako ih ljudsko uvo potiskuje, usmeravajući pažnju na pojedine izvore zvuka. Ovim složenim problemom bavi se relativno mlada disciplina koja se u stručnoj literaturi naziva kompjuterska analiza auditorne scene (*computation auditory scene analysis* – CASA) [11], [12], [23].

Uprošćeno posmatrano, ceo postupak obrade signala u CASA ima dve faze. U prvoj fazi se zbirni signal (koji predstavlja mešavinu korisnog zvuka i smetnji) razdvaja na elemente koji imaju dve dimenzije: vreme i frekvenciju. Svaki element predstavlja reprezent odgovarajućeg elementa čovekovog auditornog aparata i može se smatrati delom auditorne scene. Zatim, u drugoj fazi, na bazi određenih svojstava, grupišu se elementi za koje postoji verovatnoća da su nastali iz istog akustičkog izvora. Na taj način je moguće izdvojiti elemente koji pripadaju govoru od elemenata koji pripadaju smetnji. Ova metoda, iako daje značajne rezultate u određenim slučajevima, zahteva nova unapređenja, naročito na planu iznalaženja pravih kriterijuma za razvrstavanje dvodimenzionih elemenata signala u prisustvu različitih oblika smetnji.

12.7.3 Metodologija poboljšanja kvaliteta snimaka

Forenzički ekspert prvo obavlja kritičko slušanje celog snimka, praveći napomene o vremenu i kvalitetu prepoznatljivih zvukova i spoljne buke, kao i procenu kvaliteta i razumljivosti snimljenog materijala. Ako je procena takva da je potrebno raditi na poboljšanju snimka onda treba obratiti pažnju na sve njegove uočene nedostatke među kojima su najčešći: klipovanje vrhova signala, impulsne smetnje, uskopojasne periodične smetnje, šumovi sistema za snimanje, šumovi ambijenta, velike razlike u jačini signala između govornika, reverberacija, pojava interferencije usled uticaja sistema za predaju (mobilni telefoni i sl.) itd.

Nakon završetka faze auditivne analize prelazi se na fazu objektivne analize snimka gde se uz pomoć odgovarajuće opreme i/ili softverskih paketa utvrđuju određene karakteristike audio snimka, sa posebnim osvrtom na analizu pojava koje su evidentirane kod auditivne analize. Uobičajeno je da se provere: frekvencijski opseg govora, odnos signal-šum,

amplitude i frekvencije diskretnih tonova (ako ih ima), karakteristike širokopojasnog šuma (položaj na frekvencijskoj osi, amplituda i stabilnost), karakteristike konvolucionih efekata (npr. evidentan uticaj reveberacije na oblik dugovremenog spektra govora) i sl.

Rezultati objektivne analize su polazište za dalju obradu snimka, sa ciljem da se iz njega eliminišu smetnje i izobličenja, o čemu je bilo govora u odeljku 12.7.2

Nakon završetka radnji na poboljšanju snimka forenzičar ekspert obavlja njegovu auditivnu proveru kako bi se uverio da je razumljivost govora poboljšana. Ovo se obično vrši direktnim A/B poređenjem originalnog i poboljšanog snimka. Ovakve provere je korisno izvoditi i nakon završetka pojedinih faza rada da bi se mogao pratiti napredak procesa poboljšanja. Po završenoj i zadovoljavajućoj konačnoj proveru prave se kopije poboljšanog audio snimka za naručioca.

12.8 Forenzička transkripcija

U mnogim sferama društvene delatnosti postoji potreba da se snimljeni govorni materijal konvertuje u pisanu formu – u transkript. Kada je snimak govornog materijala kvalitetan transkripciju je moguće relativno lako obaviti kao svaki uobičajeni daktilografski posao. Međutim, kada se radi o transkripciji govornog materijala u forenzičkoj praksi, moraju se imati u vidu dve veoma važne činjenice: a) govorni materijal može biti najrazličitijeg sadržaja, forme i kvaliteta i b) tačnost transkripta se ne sme dovesti u pitanje. Stoga je logično da ovakve transkripte može obavljati samo stručno lice (forenzički ekspert), velikog znanja, iskustva i utreniranosti [23].

Kao što je rečeno u odeljku 12.7 forenzički govorni materijal je skoro po pravilu slabo čujan i/ili nedovoljno razumljiv. Da bi rezultati transkripcije, u ovakvim slučajevima bili zadovoljavajući, mora se pre njenog početka pribеći poboljšanju audio snimka.

Obim i težina transkripcije zavise od kvaliteta snimka (uključujući i njegovo poboljšanje ako je rađeno) kao i od sadržaja zahteva za transkripciju (potrebna transkripcija samo jednog glasa ili svih glasova na snimku). Zbog toga za izradu transkripata stoje na raspolaganju tri moguća postupka: auditivni, računarski i njihova kombinacija.

Auditivni postupak se može primeniti u slučaju kvalitetnog govornog snimka, što je retko, ali i tada to mora raditi obučen i utreniran alušalac u oblasti fonetike, lingvistike i/ili govorne patologije [23].

Računarska transkripcija (automatsko prepoznavanje govora i njegova konverzija u tekst), iako danas veoma razvijena, još uvek je nedovoljno savršena, naročito kada je u pitanju forenzički snimak. Tačnost ovakve transkripcije zavisi od mnogo faktora (kvalitet govornog signala,

obim raspoloživog rečnika, tip glasa – muški, ženski, dečji itd.), pa u forenzičkim slučajevima ona ne dostiže potreban nivo.

Kombinovana transkripcija (auditivno-računarska) koja koristi znanje i iskustvo forenzičkog eksperta i primenu softverskih alata je, za sada, najkompleksniji i najpotpuniji postupak transkripcije [23]. Forenzički ekspert se prvo upoznaje sa osnovnim karakteristikama snimka, njegovim govorno-jezičkim sadržajem (regionalna pripadnost, upotreba specifičnog rečnika, patološka odstupanja u govoru i sl.) i nedostacima (smetnje i izobličenja) i definiše moguće načine njegovog poboljšanja ako su neophodni.

Nakon završetka faze poboljšanja, pristupa se transkripciji nespornih segmenata snimka i markiraju se sporni segmenti koji će kasnije detaljnije biti analizirani. Analiza spornih segmenata je i najosetljiviji deo forenzičkog transkripta, gde dolazi do izražaja znanje, iskustvo, specijalizacija i inventivnost forenzičkog eksperta [23]. U ovoj analizi je potrebno odvojiti glas od smetnje i glas od glasa i analizirati (auditivno i/ili na računaru) obeležja svih segmenata govornog niza (od glasova preko slogova do reči i rečenica) koja mogu dovesti do identifikacije njihovog lingvističkog sadržaja. Konačna forma transkripta ne sme imati bilo kakvih dilema ni slovnih grešaka, a u njemu moraju biti jasno naznačeni govorni segmenati koji se nisu mogli identifikovati kao i broj reči koje nisu prepoznate u takvim segmentima [23].

12.9 Prepoznavanje govornika

12.9.1 Biometrijsko prepoznavanje osoba

Biometrija je nauka koja se bavi postupcima za jedinstveno prepoznavanje ljudi na osnovu urođenih telesnih obeležja, ili obeležja njihovog ponašanja. Sam pojam *biometrija* potiče od grčkih reči: *bios*=život i *metron*=mera. Prema tome, može se reći da se u biometriji radi o „merenju“ određenih telesnih karakteristika i karaktreistika ponašanja radi prepoznavanja tj. identifikovanja pojedinca.

Podaci o urođenim telesnim karakteristikama se dobijaju analizama fizioloških obeležja (otisak prsta, dužica, mrežnjača, geometrija šake i lica) i bioloških tragova (DNK, krv, pljuvačka, miris), dok se analizom specifičnosti u ponašanju svake osobe dolazi do njenih biheviorističkih obeležja (rukopis, potpis, hod, pokreti tela, način kucanja na tastaturi, itd.). Sva pobrojana obeležja su jedinstvena za svakog pojedinca i predstavljaju njegove biometrijske parametre. Pored ovih postoje i biološke informacije o pojedincu pomoću kojih se ne može napraviti sigurna razlika u odnosu na druge ljude (pol, boja očiju i kose, visina itd.), ali se često koriste kao komplementaran skup

prethodno navedenim. Često se kaže da one pripadaju graničnom tipu biometrije, takozvanoj „mekoj“ biometriji.

12.9.2 Glas kao prepoznatljivo obeležje govornika

Glas tj. govorni signal pre svega nosi smislenu informaciju koja je od govornika upućena slušaocu. Međutim pored ove lingvističke informacije govorni signal sadrži u sebi „utisnute“ informacije o govorniku. Kao što ćemo dalje videti glas sadrži i fiziološke i biheviorističke informacije, pa se i on koristi u biometriji. Naime, između glasa i fizičkog oblika vokalnog trakta postoje čvrste kauzalne veze što ga svrstava u grupu fizioloških parametara, ali se mora imati u vidu njegova nederministička priroda pa sa te strane se može reći da on pripada i grupi biheviorističkih parametara. Ove informacije, koje jednim imenom nazivamo *nelingvističkim* informacijama, su vezane za govornika i njegovo trenutno psiho-emotivno, a donekle i fizičko stanje.

Nelingvističke informacije povezane sa stohastičkom osnovom rada nervnog sistema (nervnih impulsa) i različitim dimenzijama artikulatora kod svake osobe, dovode do toga da jedan dati verbalni iskaz nikada nije isti [14]. Ovo je uzrok razlika u govoru među različitim osobama (interspikerske razlike), ali i varijacija istog govornog uzorka koji više puta izgovara jedna osoba (intra-spikerske varijacije). Drugim rečima to znači, da je jedna lingvistički ista rečenica neponovljiva, bilo da je izgovaraju različite osobe ili ista osoba. Nelingvističke informacije se mogu grupisati u dva osnovna skupa: *ekstralingvističke* informacije i *paralingvističke* informacije, tabela 12.4 [14].

Tabela 12.4 - Informacije u govornoj komunikaciji [14].

Karakteristika	Manifestacija	Grupa glasova
Lingvistička (Konvencionalna, društvena)	Poruka, akcent, dijalekt, govorni stil, ...	Glasovi, reči, prozodijske informacije, ...
Ekstralingvistička (Anatomska obeležja, interspikerske varijacije)	Pol, starost, navike, patologija glasa, zdravstveno stanje, ...	Veličina larinksa, dužina vokalnog trakta, kvalitet glasa, ...
Paralingvistička (Intra-spikerske varijacije, psihofiziološke manifestacije)	Emocije, stavovi, namere, adaptacija na okolnosti, ...	Tip i kvalitet fonacije, registar, vokalni napor, brzina govora, ...

Ekstralingvističke informacije identifikuju govornika kao specifičnu jedinku u ljudskoj populaciji, ukazujući na određeni način na njegov identitet, i kao takve one se u govornom signalu prepoznaju kao nevoljne informacije. Reč je o fizičkim i fiziološkim informacijama kao što su informacije o polu govornika, uzrastu, patologiji u glasu, zdravstvenom

stanju, navikama, kulturološkom miljeu, regionalnoj pripadnosti, pripadnosti određenoj grupi prema uzrastu ili profesiji.

Paralingvističke informacije nastaju voljnom aktivnošću govornika i one opisuju njegovo trenutno psiho-emotivno stanje. Pod ovim informacijama podrazumevamo određena obeležja ponašanja (biheviorističke informacije) date osobe kao što su: emocije, stavovi, namere, adaptacije na temu i ambijent konverzacije, i one su po svojoj prirodi promenljive u vremenu.

Ovde treba još jednom naglasiti da i lingvističke informacije u govoru, naročito one koje nose akcenat, dijalekat, govorni stil i druge karakteristike, takođe predstavljaju važna obeležja govornika, tabela 12.1.

Prethodno iznesene činjenice jasno kazuju da lingvističke i nelingvističke informacije koje su sadržane u čovečjem glasu omogućavaju da se i glas koristi kao jedno od čovekovih prepoznatljivih obeležja, tj. kao još jedan biometrijski parametar. Međutim, stohastička priroda govora, praktično na svim nivoima njegovog generisanja, bila je dugo uzrok rasprava o prihvatanju govora kao biometrijskog parametra. Jasno je da zbog svega napred rečenog, govor ne spada u grupu "tvrdih" biometrijskih parametara (poput otiska prsta, oblika irisa, DNK i dr.), ali se svakako može svrstati u grupu biheviorističkih parametara. To samo znači da se parametri govora ne mogu tretirati strogim analitičkim metodama već se mora primenjivati statistička teorija [17], [35].

12.9.3 Prepoznavanje govora i prepoznavanje glasa

Kada govorimo o prepoznavanju osoba putem govornog signala (zvuka), potrebno je istaći razliku između prepoznavanja govora (prepoznavanja šta se govori) i prepoznavanja glasa (prepoznavanja ko govori), tj. prepoznavanja govornika. Ova dva izraza se često mešaju, a "prepoznavanje glasa" se obično koristi kao zamena i za jedan i za drugi.

Prepoznavanje govora se svodi na prepoznavanje izgovorenih reči bez obzira na to ko ih je izgovorio (komunikacija čovek - računar ili čovek - mašina, navigacija telefona i sl.) dok prepoznavanje glasa predstavlja biometrijski metod prepoznavanja identiteta govornika na osnovu glasa, odnosno prepoznavanja onog ko je izgovorio date reči (pristup objektima, pristup ličnim uređajima, pristup bančanim transakcijama, otkrivanje počinioca krivičnog dela itd.).

12.9.4 Verifikacija i identifikacija govornika

Korišćenjem glasa kao parametra za prepoznavanje osoba bavi se naučna oblast koja se naziva "prepoznavanje govornika", a koju čine dve podoblasti: identifikacija govornika i verifikacija govornika. U obema ovim podoblastima reč je o utvrđivanju identiteta govornika, za šta se koriste

slične metode analize, ali među njima ipak postoje neke suštinske razlike kao što ćemo dalje videti.

Pod identifikacijom podrazumevamo postupak u kojem utvrđujemo o kojoj se osobi radi, a pod verifikacijom postupak u kojem utvrđujemo da li je neka osoba zaista ona za koju se predstavlja.

Drugim rečima, identifikacija je 1:N poređenje, gde treba odrediti koji glas iz grupe od N poznatih glasova najbliže odgovara glasu govornika, slika 12.13a. Ovde se utvrđuje koji je glas iz skupa govornika najbližiji referentnom glasu (ako postoji sličnost) ili sličnosti nema, dakle vrši se N poređenja.

Verifikacija je poređenje glasa govornika sa tačno određenim glasom u bazi, slika 12.13b, s ciljem potvrde identiteta date osobe, što znači da se radi o poređenju 1:1. Dakle, postoji samo jedno poređenje sa ciljem da se prihvati ili odbaci tvrdnja da je glas date osobe baš taj sa kojim se vrši poređenje. U literaturi se mogu sresti različiti termini za pojam „verifikacija govornika“ kao što su: verifikacija glasa, autentifikacija glasa, verifikacija govornika i autentifikacija govornika.

Iz bezbednosne perspektive, razlika između identifikacije i verifikacije neke osobe može se sagledati iz sledeća dva primera. Naime, provera pasoša neke osobe na graničnoj kontroli je proces verifikacije: službenik upoređuje lice te osobe sa fotografijom u dokumentu. Nasuprot tome, identifikacija je proces kada policijski službenik upoređuje skicu napadača sa bazom ranije dokumentovanih podataka o kriminalcima, sa ciljem da ga u bazi identifikuje.



Slika 12.13 – Princip identifikacije (levo) i verifikacije (desno) govornika

12.9.5 Biometrijsko i forenzičko prepoznavanje govornika

Biometrijsko prepoznavanje govornika se obavlja analizom akustičkih obeležja u govornom signalu (nelingvističke informacije) koja su svojstvena datom govorniku, do kojih se u praktičnoj primeni dolazi

relativno lako [35]. Ovo prepoznavanje ima veliku komercijalnu primenu u govornim tehnologijama i često se koristi kod fizičkog pristupa određenim lokacijama i objektima, za sigurniji i brži pristup ličnim uređajima, važnim informacijama i bazama podataka, za pristup bančanim resursima prilikom novčanih transakcija, itd.

Međutim, kada se radi o forenzičkom prepoznavanju govornika, koje je od primarnog interesa pravosudnim organima i kriminalističkoj policiji, onda se moraju uključiti svi markeri (lingvistički i nelingvistički) koje je u govornom signalu moguće identifikovati. Forenzičko prepoznavanje govornika (FPG) podrazumeva poređenje poznatog (nespornog) glasa osumnjičene ili okrivljene osobe i nepoznatog (spornog) glasa, u cilju potvrde ili isključenja osumnjičene ili okrivljene osobe kao počinioa krivičnog dela. Pri tome, nesporan glas se može porediti sa glasovima više osumnjičenih osoba ili obrnuto, glas jedne osumnjičene osobe se može porediti sa više spornih glasova [35].

Razliku između biometrijskog i forenzičkog prepoznavanja govornika čine još dva bitna elementa: kooperativnost govornika i kvalitet govornog materijala.

Kada se radi o biometrijskom pristupu prepoznavanju, govornik je kooperativan, jer je najčešće njegov cilj da bude prepoznat. To je i razumljivo, pošto posledice prepoznavanja u ovom slučaju ne mogu korisniku naneti neku ozbiljniju štetu. Sve se svodi na to da ga sistem može prepoznati (prihvatiti) ili odbiti. Međutim, kod forenzičkog pristupa prepoznavanju, posledice su sudske prirode, i mogu biti veoma ozbiljne. Iz tog razloga, cilj govornika je da prikrije svoj identitet, pa po pravilu u ovakvim slučajevima izostaje njegova kooperativnost.

Kvalitet govornog materijala izuzetno je važan kod oba pristupa u prepoznavanju govornika [35]. Kod biometrijskog sistema za prepoznavanje moguće je kontrolisati i uticati na sve faze pripreme govornog materijala (izbor opreme, izbor akustičkog okruženja za pripremu snimka, izbor načina vođenja konverzavije itd.). Čak šta više, tekst se pažljivo bira tako da sadrži specifična obeležja koja omogućavaju najbolju separaciju govornika, a snimak je moguće po potrebi ponoviti.

Naprotiv, kod forenzičkog prepoznavanja kvalitet govornih materijala (sporni snimak) je potpuno izvan kontrole i obično je mnogo lošiji nego kod biometrijskog sistema. Postoje snimci načinjeni u neadekvatnim akustičkim uslovima (velika buka ili reverberacija), sa neadekvatnom opremom (redukovan spektar, redukovana dinamika, velika izobličenja), sa promenljivom jačinom glasa (od najtišeg do najglasnijeg), i nedovoljnom dužinom govornog materijala. Pored toga, u forenzičkom ambijentu snimci su neponovljivi, a tekst je nepredvidiv, tj jedinstven. Ovakav snimak može forenzičaru toliko otežati zadatak, da u pojedinim slučajevima, veštačenje nije moguće obaviti.

Ipak treba imati u vidu da i nesporne snimke, i pod pretpostavkom kooperativnosti osumnjičene osobe, nije prosto dobiti. Forenzičar ne treba da bude uključen u izradu ovih snimaka i u neposredne kontakte sa osumnjičenim (poštovanje principa autonomnosti veštačenja), ali treba da je u koordinaciji sa sudom, a snimke treba uraditi prema njegovim uputstvima. Cilj je da se nesporni snimak što više približi spornom snimku po tehničkim i sadržajnim dimenzijama, kako bi poređenje bilo što pouzdanije [35]. Međutim, to u praksi uglavnom nije moguće, pa se treba zadovoljiti time, da se dobije tehnički kvalitetan snimak sa prirodnim i spontanom govorom nesporne osobe, koja je u toku obavljanja intervjua zdrava, nije pod uticajem psihoaktivnih supstanci ili u očiglednom stanju stresa ili izraženih emocija. Govorni uzorak treba da bude što duži (desetinu minuta i više), i da sadrži što više različitih reči, po mogućstvu istih kao na spornom snimku. Na taj način je iz snimljenog uzorka moguće izvući deo (30 s do 60 s) sa spontanom i prirodnim govorom, u kojem će se ispoljiti više glasovnih i prozodijskih osobenosti i individualnih karakteristika govornika važnih za identifikaciju.

Kvalitet snimljenog govornog signala zavisi, pre svega, od kvaliteta opreme za snimanje, načina upotrebe mikrofona i ambijentalnih uslova okoline u kojoj se snima. Zato snimanje treba obavljati sa mikrofonom postavljenim 30-tak centimetara od ustiju govornika pod uglom od oko 45° stepeni u odnosu na osu normalnu na površinu otvora usta [25], i u ambijentu bez buke i suviše velike reverberacije. Često u sudovima ne postoje tehničke mogućnosti, niti tehničko osoblje obučeno za snimanje govora. U takvim slučajevima se mora potražiti usluga sa strane.

Ako osumnjičeni nije saglasan da mu se snimi glas, praktična iskustva govore da je moguće koristiti prethodno sačinjene snimke sa saslušanja, snimke telefonskog prisluškivanja i sl. [35].

12.9.6 Varijacije u govornom izrazu

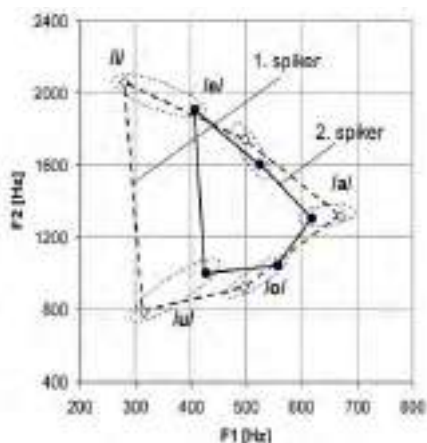
Kao što smo prethodno naveli u govornom izrazu prazlikujemo inter-spikerske i intra-spikerske varijacije (promene). Ove varijacije se mogu posmatrati kao varijacije u glasu i varijacije u govoru, i moguće ih je klasifikovati kako je dato u tabeli 12.5 [22].

Inter-spikerske varijacije su nosioci individualnih obeležja govornika. Kao primer individualnih razlika dva govornika na slici 12.14 je prikazana distribucija vokala u polju prvog i drugog formanta (F1-F2), na uzorku kontinualnog govora. Kao što se vidi položaj vokala je potpuno različit, kako po obliku poligona tako i po položaju u F1-F2 polju [22]. Iz ovog primera je jasno da se ovaj podatak može koristiti kod prepoznavanja

govornika. Slično se može pokazati i za druge interspikerske razlike, na čemu se ovde više nećemo zadržavati.

Tabela 12.5 - Klasifikacija varijacija u glasu i govoru [22]

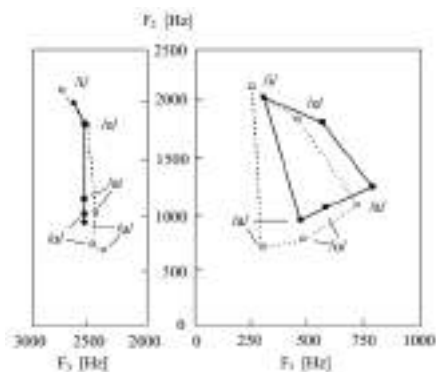
Intra-spikerske varijacije	Varijacije u kvalitetu glasa	modalan, napet, opušten, zadihan, hrapav, šaptav...
	Varijacije u stilu govora	pažljiv, jasan, artikulisan, kauzalan, spontan, formalan, intiman, čitan, diktiran...
	Fonetske i lingvističke varijacije	kontekstualne varijacije na nivou foneme, reči i rečenica...
	Varijacije prouzrokovane komunikativnim kontekstom	slobodna konverzacija, intervju, profesionalno govorenje, sport, predavanje, dijalog čovek-mašina...
	Varijacije u tempu i ritmu govora	normalan, spor, brz, vrlo brz tempo, struktura ritma...
	Varijacije prouzrokovane stresom	emocionalni faktori, kognitivno opterećenje, uticaj alkohola, droge, medikamenata...
	Varijacije prouzrokovane ambijentalnim okruženjem	komunikacija u buci, Lombardov refleks, komunikacioni uslovi, govor u pokretu...
Inter-spikerske varijacije	Varijacije u glasu koje reflektuju: - fizičke dimenzije vokalnog trakta - pol govornika i starost - zdravstveno stanje - dijalekat i edukaciju...	



Slika 12.14 – Distribucija vokala u F1-F2 polju za dva govornika [22]

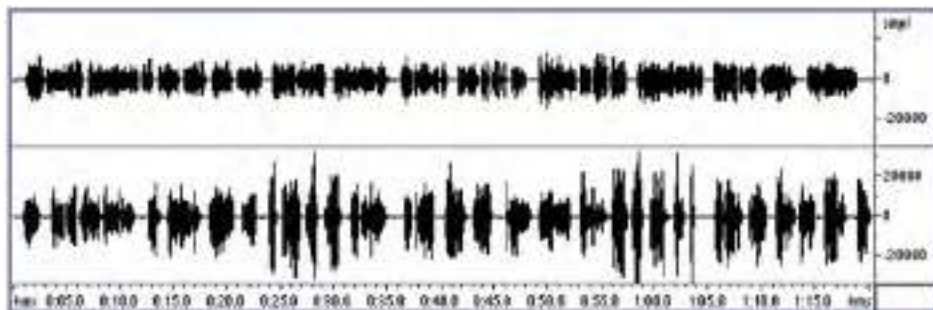
Intra-spikerske varijacije nastaju na fonetskom i lingvističkom planu pri promeni konteksta govornog iskaza, ali se njihova varijabilnost dodatno uvećava pod uticajem emocija (ljutnja, sreća, strah, tuga, mržnja itd.) i uslova u kojima se odvija konverzacija (govor u žurbi, u bučnom

ambijentu, u biblioteci, na predavanju) ili pri izražavanju stavova (zapovest, pretnja).



Slika 12.15 - Pomeranje formanta usled Lombardovog refleksa [22]

Na primer osnovna frekvencija glasa zavisi od bioloških i fizioloških karakteristika glasnica, od mentalnih funkcija na psiho-emotivnom planu, od nivoa buke u okruženju, itd. Slično, frekvencije formanta se dodatno menjaju kada se govori u veoma bučnom ambijentu. Govornik tada sam sebe ne čuje, pa povećava intenzitet svog govora, da nadjača buku, da čuje sam sebe, i da ga čuje sagovornik (Lombardov refleks). Tada, zbog povećanja intenziteta govora, dolazi do pomeranja formanta u spektralnom domenu za sve samoglasnike, u ravni prvog i drugog (F_1 - F_2) i drugog i trećeg (F_2 - F_3) formanta, slika 12.15 [22].

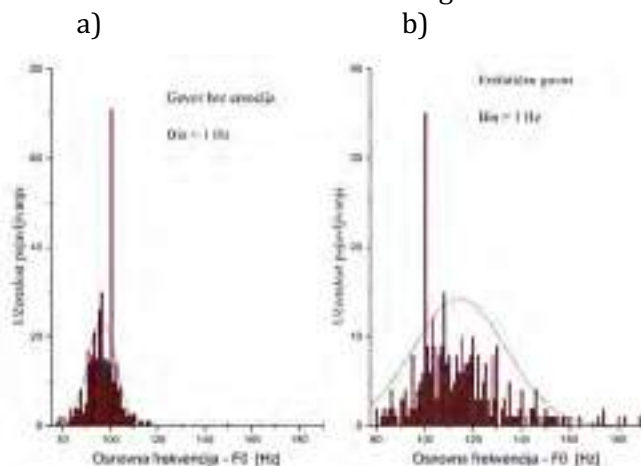


Slika 12.16 - Talasni oblici dva iskaza: govor bez emocija (gore) i emfatičan govor (dole) [6]

Na slici 12.16 prikazani su talasni oblici dva iskaza: govor bez emocija i emfatičan govor (govor pretnje, dominacije, komandovanja) [6]. Kod govora bez emocija (gornji dijagram) uočava se veoma stabilan intenzitet govora kao i jasno razdvojeni delovi govora izgovoreni između dve govorne pauze. Kod emfatičnog govora intenzitet govora znatno varira a segmenti između pauza su znatno kraći. Ova pojava je posledica naglašavanja, u datom psiho-emotivnom stanju govornika. Odnosno,

naglašeni izgovor je intenzivniji, pa s obzirom na dati fonetski kapacitet govornika (raspoloživu energiju govora), delovi govora između pauza su kraći.

Uticaj emocija se takođe može konstatovati i na dijagramima raspodele osnovne frekvencije glasa, slika 12.17 [6]. Govor bez emocija (a) ima dosta uzan i simetričan historgam, dok emfatičan govor (b) ima izrazito nesimetričan i veoma razvučen histogram ka višim frekvencijama.



Slika 12.17 -
Histogrami
raspodele F_0 : (a)
govora bez
emocija i (b)
emfatičnog
govora [6]

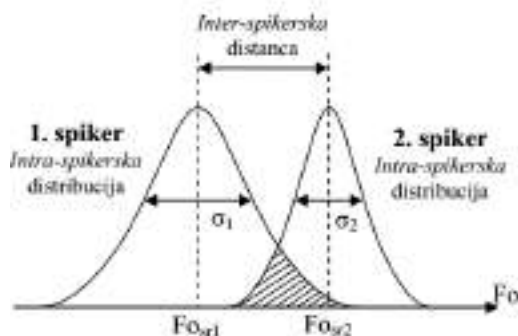
Iz prethodnog je jasno da različiti faktori koji kontrolišu artikulacione organe vokalnog trakta utiču na pojavu određenog opsega mogućih vrednosti svakog obeležja u govornom signalu. Ovaj opseg je ograničen i naziva se *varijaciono polje*, *volumen* ili *intra-spikerska varijacija*.

Audio forenzička praksa pokazuje da težina prepoznavanja govornika leži u činjenici što su različitosti između govornika (inter-spikerske razlike) često male, dok na drugoj strani, različitosti koje se nalaze u istom govornom materijalu jednog istog govornika (intra-spikerske razlike) mogu biti velike.

Pogledajmo primer dat na slici 12.18, gde su prikazane raspodele osnovnih frekvencija F_0 govora dva govornika (spikera) [22]. Očigledno je da ova dva govornika imaju različite opsege *intra-spikerskih* varijacija. Njihove srednje vrednosti osnovnih frekvencija F_{0sr1} i F_{0sr2} su različite i nalaze se na određenoj *inter-spikerkoj* distanci ($F_{0sr1} - F_{0sr2}$). U forenzičkom prepoznavanju govornika je cilj da se pronađe takav parametar govora koji ima minimalne intra-spikerske, a maksimalne inter-spikerske promene, pri čemu je primarna minimizacija ovih prvih.

Što su *intra-spikerske* varijacije manje i *inter-spikerska* distanca veća to je zona nesigurnosti (šrafirana oblast na slici 12.18) manja, pa će ekspertska ocena o različitosti identiteta dva govornika biti sigurnija. Pri ovome treba imati u vidu činjenicu da se u praksi forenzička analiza vrši na širokom skupu obeležja čime se problem prepoznavanja

govornika prebacuje u multidimenzionalni prostor i ekspertska odluka o prepoznavanju nije više jednoznačna [22].



Slika 12.18 - Odnos inter-spikerskih i intra-spikerskih varijacija (σ – disperzije raspodela) [22].

Idealno, obeležja koja se koriste u forenzičkoj analizi trebalo bi da zadovolje sledeće kriterijume [35]:

- da imaju male intra-spikerske varijabilnosti i velike inter-spikerske varijabilnosti,
- da budu stabilna tokom vremena,
- da budu imuna na maskiranje i imitaciju,
- da budu robustna na komunikaciona izobličenja i signale smetnji,
- da budu relativno jednostavna za ekstrakciju i merenje, kao i da se često javljaju u snimku.

Praksa pokazuje da su ovi ideali nedostižni, posebno kod spornih snimaka, a vrlo često i kod nespornih.

12.9.7 Načini ekstrakcije obeležja govornog signala u forenzičkom prepoznavanju govornika

Distorzije govornog snimka, nastale iz najrazličitijih razloga, kako je rečeno u odeljku 12.7.1 mogu biti mnogobrojne, i sve one utiču na kvalitet i razumljivost govornog signala i otežavaju postupak njegove ekspertske analize [35]. Ako se ovome dodaju činjenice u vezi sa varijacijama u govornom izrazu, iznesene u prethodnom odeljku, kao i određeni problemi koji mogu nastati u vezi sa realizacijom nespornog snimka, onda postaje jasno koliko je kompleksan proces forenzičkog prepoznavanja govornika. Zato nije slučajno što u njemu učestvuju eksperti različitih specijalnosti (lingvističari, fonetičari, akustičari, elektroničari) i što se u toku ovog procesa sagledava veliki broj obeležja (markera) u glasu i govoru.

Tokom razvoja audio forenzike korišćeno je više načina da se analizom govornog signala dođe do potrebnih parametara i zaključaka u forenzičkom prepoznavanju govornika. To su:

- auditivna analiza,
- spektrografska analiza,
- akustičko-fonetska analiza i
- automatska (računarska) analiza.

Prethodne četiri vrste analize spadaju u domen ekspertskog pristupa forenzičkom prepoznavanju govornika. U posebnim slučajevima, kao što ćemo kasnije videti, istražni organi ili sud mogu umesto eksperata u prepoznavanje uključiti svedoke ili žrtve kriminalnog dela, kroz postupak tzv. *auditivnog predočavanja*.

Auditivna analiza je najstariji metod prepoznavanja govornika gde ekspert fonetičar prati izgovor pojedinih samoglasnika, karakterističnih suglasnika, reči i fraza, kao i pojedinih globalnih karakteristika govornog signala kao što su intonacija, brzina govora, specifičnosti u govoru i td. Na bazi dugotrajnog pažljivog slušanja i zapažanja ekspert pokušava da otkrije sličnosti i razlike između spornog i nespornog snimka. Pri tome on analizira obeležja u govornim signalima koja sadrže informacije o identitetu govornika u sva tri domena: akustičkom, fonetskom i lingvističkom [19]. Zaključak koji proizilazi iz auditivne analize se svodi na subjektivnu procenu eksperta zasnovanu na slušanju audio snimka.

Spektrografska analiza se sastoji u tome da ekspert delove govornog snimka (obično reči ili rečenice) konvertuje u spektrograme, a potom upoređuje detalje spektrograma sa spornog i nespornog snimka. Na ovaj način on analizira veliki broj elemenata govornog signala i u njihovim spektrogramima traži sličnosti da bi se utvrdilo da li sporni i nesporni snimak potiču od istog govornika ili od dva različita govornika. Zaključak koji je rezultat spektrografske analize je takođe rezultat subjektivne procene eksperta. Ova analiza je u praksi pokazala mnoge nedostatke tako da se danas uglavnom koristi samo kao dopuna ostalim metodama.

Akustičko-fonetska analiza se zasniva na primeni odgovarajućih instrumenata ili softverskih alata za kvantitativno merenje akustičkih karakteristika (osnovna frekvencija, formanti, i sl.) delova govora sa spornog i nespornog snimka. U ovoj analizi postoji mogućnost da se na bazi velikog broja merenja pojedinih parametara govornog signala napravi statistička analiza dobijenih rezultata, što daje mnogo objektivniju sliku o raspodeli njihovih vrednosti. Na bazi rezultata estimacije vrednosti parametara govora na dva snimka, ekspert donosi zaključak, koji jeste subjektivan ali koji ima objektivnu osnovu.

Automatska tj. računarska analiza govornog signala se danas primenjuje u mnogim tehničkim rešenjima vezanim za govorne tehnologije (prepoznavanje govora, konverzija teksta u govor, prepoznavanje jezika i td). S obzirom na velike mogućnosti današnjih računara i postojanje najrazličitijih algoritama za analizu govornog signala logično bi bilo očekivati da je moguće potpuno automatsko forenzičko prepoznavanje

govornika. Međutim praksa govori da to do sada još nije slučaj, a pitanje je da li će ikada i biti moguće [35]. Računari mogu da doprinesu tačnijoj i bržoj analizi kvalitetnijih delova govornog signala, ali bez pažljive auditivne analize i značajne uloge eksperta forenzičara u vođenju celoga postupka, nije se moguće pouzdati u krajnje rezultate analize koju bi automatski obavljao računar.

Auditivno predočavanje. Ukoliko ne postoji snimak glasa počinioaca već su žrtva ili svedok samo čuli njegov glas ali ga nisu videli, tada se od eksperta forenzičara može zahtevati da organizuje auditivno predočavanje (*voice line-up*). To je postupak (slično kao i vizuelno predočavanje) u kojem svedok ili žrtva treba da uporedi upamćeni glas počinioaca sa glasovima osređenog broja govornika, među kojima je i osumnjičeni. To može biti slučaj kada je krivično delo izvršeno u mraku (npr. silovanje) ili je lice kriminalca bilo pokriveno maskom (pljačke banaka). Sličan slučaj imamo i ako svedok nije mogao da vidi počinioaca već mu je čuo glas iz druge prostorije, ili mu je samo čuo glas preko telefona (lažne telefonske dojave interventnim službama, seksualno uznemiravanje telefonskim putem, telefonski pozivi otmičara i sl.).

U auditivnom predočavanju svedok, u sukcesivnom nizu, sluša glas osumnjičenog zajedno sa određenim brojem drugih sličnih glasova neutralnih osoba, pokušavajući da po sećanju prepozna glas osumnjičenog. Ovde se prepoznavanje zasniva na pamćenju glasa počinioaca kriminalnog dela koji je svedok čuo, pa zbog svoje osetljivosti ne može biti dokaz na osnovu koga se može doneti presuda već može imati samo karakter posrednog dokaza [35].

Auditivno predočavanje se može organizovati i kao dopuna ekspertske analize (u slučaju postojanja snimka glasa osumnjičenog).

12.9.8 Obeležja govornika koja se analiziraju pri forenzičkom prepoznavanju

Pojedinačno gledano svaka od četiri navedene ekspertske metode forenzičkog prepoznavanja govornika ima svojih značajnih nedostataka, kako je prethodno istaknuto. Zato je uobičajeno da se u forenzičkom prepoznavanju govornika primenjuje multidisciplinarni pristup. Stoga je danas u praksi dominantan metod forenzičkog prepoznavanja govornika svodi na *auditivno-računarsku*, ili *auditivno-fonetsko-računarsku* analizu, kakao je neki nazivaju.

Na ovaj način se smanjuju subjektivni faktori u analizi i u donošenju konačnog mišljenja, a povećava moć objektivne identifikacije obeležja zavisnih od govornika [19]. Drugim rečima, računar obavlja detaljnu pretragu segmenata govornog signala, i izvlači obeležja koja zavise od

govornika, dok ekspert u interakciji sa računarom upravlja velikim brojem operacija i na kraju formuliše konačno mišljenje.

Tabela 12.6 - Obeležja govornika koja se analiziraju integralnom (auditivno-računarskom) metodom [35]

Glas	Karakteristična obeležja govornika
Osnovna frekvencija glasa Fo	Merenje srednje vrednosti Fo.
Intonacija	Merenje standardne devijacije i raspodele Fo.
Formanti	Merenje centralne frekvencije formanta vokala, širine formanta, raspodele formanta.
Kvalitet glasa	Merenje vokalskog džitera, tremora i parametara NHR, VTI i SPI
Način govora	Karakteristična obeležja govornika
Ritam	Merenje trajanja i intenziteta segmenata.
Rečenična intonacija	Merenje karakteristika kontura Fo.
Tempo govora	Merenje brzine artikulacije slogova.
Respiracija	Merenje brzine, trajanja i spektralnog sastava respiracije.
Govor	Karakteristična obeležja govornika
Dijalekt	Određivanje tipa dijalekta i stepena devijacije od standardnog izgovora.
Sociolekt	Identifikacija žargona, opis fonetskih, leksičkih i gramatičkih neobičnosti.
Akcent	Utvrđivanje stranog akcenta – podudarnost i/ili devijacije od standardnog fonetskog i sintaksičkog sistema.
Devijacije u govoru	Identifikacija govornih nedostataka.

Auditivno-računarskom metodom moguće je analizirati veliki broj obeležja koja zavise od govornika, ali se najčešće koriste ona navedena u tabeli 12.6 [35], koja su podeljena u sledeće tri grupe:

- obeležja koja karakterišu osobine glasa u akustičkom domenu,
- obeležja koja karakterišu način govora u suprasegmentnom domenu i
- obeležja koja karakterišu govor u lingvističkom domenu.

Prve dve grupe obeležja je moguće dobiti računarskom analizom, pri čemu treba koristiti što je moguće veću količinu govornog materijala da bi se mogla primeniti njihova statistička estimacija.

12.9.9 Metodologija rada u ekspertskoj analizi

Ekspertska analiza kod forenzičkog prepoznavanja govornika je kompleksna i sveobuhvatna i zasniva se na integralnoj auditivnoj (perceptivnoj), računarskoj, statističkoj, fonetskoj i lingvističkoj analizi i može se podeliti u više koraka kao što su [35]:

- obrada snimaka koji sadrže sporni i nesporni glas,

- trijaža glasova,
- akustička analiza (auditivna i računarska) sa statističkom obradom podataka,
- fonetska analiza,
- lingvistička analiza.
- formiranje ekspertskog mišljenja.

Obrada snimaka se mora uraditi pre bilo koje druge radnje da bi se njihov kvalitet doveo na približno isti nivo, čime poređenje govornog materijala postaje pouzdanije. Ujedno treba voditi računa da se održi kvalitet glasova na snimcima. Obrada snimaka podrazumeva primenu određenih tehnika navedenih u odeljku 12.8.7 radi uklanjanja pojedinih smetnji i šumova sa snimaka kao i ujednačavanje njihovih amplituda i frekvencijskih opsega.

Trijaža glasova se svodi na segmentaciju snimaka i izdvajanje glasova koji treba da se porede, od ostalih signala na snimcima (drugi glasovi, različiti zvuci i sl.). Ovakvim postupkom se dolazi do delova snimaka na kojima su samo glasovi sporne i nesporne osobe, i na kojima može da se obavlja dalja analiza.

Akustička analiza uključuje auditivnu i računarsku analizu spornog i nespornog glasa. Rezultati auditivne analize se dobijaju na bazi subjektivnih zapažanja forenzičara i u velikoj meri se koriste kao osnova za analize koje slede nakon nje. Ona obuhvata analizu psiho-emotivnog stanja govornika i promene njegove vokalne ekspresije u toku razgovora, analizu kvaliteta glasa i specifičnih fonetsko-lingvističkih manifestacija u glasu, kao i analizu patoloških odstupanja prvenstveno na fonetskom planu[35].

Računarska analiza je veoma efikasan način, uz pomoć kojeg se iz segmenata govornog signala mogu izvući vrednosti velikog broja njegovih parametara. Međutim, u praksi se najčešće koriste: *dugovremeni usrednjeni spektar govora* (LTASS), *osnovna frekvencija glasa* (F0) i karakteristike *formanata* (najčešće prva tri F1, F2, F3) [35]. Ovi parametri su najneposrednije vezani sa karakteristikama vokalnog trakta govornika i predstavljaju važne indikatore njegove individualnosti. Trajanje segmenata u kojima se analiziraju parametri govora iznosi nekoliko desetina milisekundi, dok je ukupno trajanje snimka nekoliko desetina sekundi, pa i više. Na ovaj način se dobijaju vrednosti parametara govornog signala koje se menjaju tokom trajanja snimka (konture parametara).

S obzirom na varijaciju vrednosti parametara koji karakterišu govornika u snimku, prava slika o njihovim stabilnim vrednostima dobija se usrednjavanjem, primenom statističke analize.

Fonetska analiza potpomognuta spaktrografskim slikama pojedinih glasova ili glasovnih grupa daje mogućnosti da se uporede i najsitniji detalji spornog i nespornog snimka. Ovaj postupak obuhvata

veoma detaljnu pretragu većeg broja karakterističnih glasova (frikativi, plozivi i sl.) sa fokusom na pojedina njihova obeležja. Fonetska analiza iziskuje veliko iskustvo i posebnu pažnju eksperta u otkrivanju najsitnijih detalja u izgovoru pojedinih glasova u snimcima. Ovu analizu dodatno otežavaju ili onemogućavaju pojave datog glasa u različitim okruženjima u govornom lancu (različito koartikulaciono okruženje) a često, i mali broj njegovih realizacija na snimku. Na osnovu podataka dobijenih tokom fonetske analize može se doneti parcijalno mišljenje o sličnosti ili različitosti dva analizirana audio snimka.

Tabela 12.7 - Skala forenzičkih verbalnih ocena

	Vrlo visok stepen verovatnoće sličnosti
	Visok stepen verovatnoće sličnosti
	Značajan stepen verovatnoće sličnosti
	Određen stepen verovatnoće sličnosti
	Postoji sličnost i osoba se ne može isključiti
	Neodređen slučaj
	Postoji različitost i osoba se ne može isključiti
	Određen stepen verovatnoće različitosti
	Značajan stepen verovatnoće različitosti
	Visok stepen verovatnoće različitosti
	Vrlo visok stepen verovatnoće različitosti

Lingvistička analiza je važan integralni deo procedure forenzičkog prepoznavanja govornika. Na bazi preslušavanja snimaka forenzičar lingvista poredi, sa jezičkog stanovišta, mnoge karakteristike glasa i govora na njima kao što su: geografsko poreklo, socioekonomski status, godine starosti, pol, zanimanje, gramatičke forme i vrste grešaka, arhaizmi, akcenat, dijealekat itd.

Formiranje ekspertskog mišljenja je završni čin ekspertске analize u kojem forenzičar treba da donese konačni stav o poređenju dva snimka, tj. dva glasa. Tokom forenzičke analize formira se širok skup obeležja od kojih je kod nekih moguća potpuna separacija (imaju dovoljnu inter-spikersku distancu) dok kod jednog broja to nije moguće. Takođe se dešava da tokom analize neka obeležja nije bilo moguće identifikovati. Od forenzičara se očekuje da proceni (može i parcijalno za svako obeležje ponaosob) sa kojom se verovatnoćom neka obeležja mogu prihvatiti a druga odbaciti. Na kraju, na bazi rezultata ovih analiza, služeći se svojim ekspertskim znanjem i iskustvom, forenzičar mora da donese konačnu ocenu, koja sa sobom nosi veliku odgovornost. Konačna ocena se izražava verbalnim iskazom, prema međunarodno usaglašenoj skali od ukupno 11 nivoa [35], tabela 12.7. Kao što se vidi ova skala ima po pet nivoa sličnosti/

različitosti i neutralni nivo (neodređen slučaj), za situacije kada nije moguće utvrditi ni sličnost ni različitost prilikom poređenja dva glasa.

12.9.10 Forme zahteva za veštačenje glasa

Zavisno od karaktera konkretnog slučaja, od forenzičkog eksperta se može zahtevati da uradi veštačenje za:

- forenzičku verifikaciju govornika,
- forenzičku identifikaciju glasa i
- auditivno predočavanje.

Forenzička verifikacija govornika (zahteva se poređenje spornog i nespornog glasa) je najčešći oblik sudskog zahteva za veštačenje glasova. U ovom slučaju broj spornih forenzičkih snimaka može biti proizvoljan.

Forenzička identifikacija glasa podrazumeva slučaj kada je potrebno utvrditi da li u spornom snimku postoji jedan ili više od nespornih N glasova. Drugim rečima, sporni snimak koji može sadržati dva (nekad i tri) sporna glasa treba uporediti sa N nespornih glasova, što čini ukupno 2N (ili 3N) parova glasova za poređenje. Ako spornih snimaka ima više onda je ukupni broj parova za poređenje još toliko puta veći.

Ako ne postoji snimak glasa i kada je žrtva ili svedok samo čuo glas počinio ca ali ga nije video, sudskim zahtevom se može od forenzičkog eksperta zahtevati da organizuje auditivno predočavanje.

12.10 Laboratorije za audio forenziku

Laboratorije za audio forenziku treba da budu izgrađene tako da se u njima smanji uticaj spoljašnje buke i vibracija, umanju buka laboratorijske opreme, smanje smetnje od različitih vrsta komunikacija i minimiziraju električna i magnetna polja. Laboratorije treba da se nalaze daleko od unutrašnjeg i spoljašnjeg bučnog okruženja, ali ako to nije moguće, njihovii zidovi treba da budu takvi da izoluju buku i vibracije. Buka opreme i ventilacije u laboratorijama se može smanjiti izborom tiših ventilatora, zatvorenih ormara za smeštaj opreme, pravilnim izvođenjem i održavanjem grejnih i klima uređaja. Laboratorija treba, ako je to moguće, da bude udaljena od radio, televizijskih i drugih komunikacionih predajnika. Mobilni telefoni, i drugi elektronski uređaji koji bežično prenose i primaju informacije treba u laboratoriji uvek da budu isključeni. Prostor laboratorije treba da bude oslobođen od nepotrebnih uređaja koji proizvode električna i magnetna polja, a kad god je to moguće, treba izbegavati fluorescentnu rasvetu [31].

Kao što je već rečeno polje rada audio forenzike obuhvata različite discipline (uključujući: lingvistiku, fonetiku, fiziku, elektrotehniku, elektroniku, računarsku tehniku, akustiku, digitalnu analizu signala itd.) pa

je logično da je za obavljanje pouzdanih ispitivanja i analiza potrebna veoma raznovrsna oprema. Imajući u vidu činjenicu da se u laboratoriji mora obavljati veliki broj različitih aktivnosti počev od prostijih, kao što je reprodukcija i kopiranje audio snimaka pa do najsloženijih, kao što su različite vrste analize i obrade audio signala, postaje još jasnije zašto je potrebna tako raznovrsna oprema.

Analiza analognih i digitalnih snimaka u audio forenzičkim laboratorijama obavlja se za potrebe krivičnih istraga, sudskih procesa, obaveštajnih službi, građanskih parnica, i drugih sličnih poslova. Neke laboratorije su opremljene i kadrovski osposobljene da mogu obavljati širok spektar provera i analiza audio snimaka, dok druge mogu pružiti jednu ili nekoliko najčešće traženih tipova usluga ove vrste.

Najčešći poslovi koji se obavljaju u audio forenzičkim laboratorijama su [31]:

- Reprodukcija i kopiranje audio snimaka različitih formata;
- Popravka deformisanih ili delimično oštećenih magnetnih traka;
- Skidanje audio informacija sa video snimaka;
- Provera autentičnosti audio snimaka;
- Pобољшanje razumljivosti ili čujnosti audio snimaka;
- Prepoznavanje govornika;
- Kvantifikovanje, identifikacija i upoređivanje ne-govornih audio signala;
- Ekstrakcija i analize digitalnih audio zapisa sa komercijalnih i ličnih uređaja za snimanje.

Osnovna oprema koju poseduju pojedine audio forenzičke laboratorije se razlikuje od slučaja do slučaja i zavisi od materijalnih mogućnosti laboratorije i poslova iz spektra audio forenzike za koje je laboratorija osposobljena. Pored toga, svakim danom se u ovoj oblasti pojavljuju noviji i savršeniji softverski alati koji zamenjuju dobar deo funkcija koje su do skoro imale desetine hardverskih uređaja zajedno. Ipak, za obavljanje prethodno navedenih poslova jedna audio forenzička laboratorija bi trebalo da poseduje [31]:

- Analognu i digitalnu opremu za reprodukciju sa uobičajenih nosača audio zapisa (analogna, kompaktna i mini kasete, mini disk, CD/DVD, fleš memorija, itd.);
- Opremu sa mogućnošću prihvatanja audio signala sa nestandardnih medija;
- Profesionalni digitalni uređaj za reprodukciju i snimanje;
- Sisteme za snimanje i reprodukciju zvuka na računaru sa niskošumnim A/D i D/A konvertorima;
- Softver za digitalnu vizualizaciju i analizu podataka;
- Odgovarajući softver za spektralnu analizu audio signala;

- Softver visoke rezolucije za analizu talasnih oblika signala;
- Softver za spektrografsku analizu audio signala;
- Profesionalni softver za editovanje i reprodukciju audio signala;
- Kvalitetne okoušne slušalice sa predpojačavačem, konektore, kablove itd.
- Računare velike brzine, spoljne zvučne kartice, monitore visoke rezolucije, štampače.

12.11 Specifični primeri primene audio forenzike

Kao što je rečeno u odeljku 12.3 polje interesovanja audio forenzike obuhvata, sem govornog signala, i analize drugih za istragu važnih zvučnih signala. Takođe, na osnovu analiza audio snimaka različitih kriminalnih događaja ili nesreća moguće je utvrditi vremenski redosled pojedinih radnji u njima i doprineti njihovoj rekonstrukciji. Ovde ćemo nešto više reći o nekoliko takvih primera kao što su: analiza čujnosti važnog zvučnog događaja, analiza pucnjave i istraživanje uzroka avionskih nesreća.

Analiza čujnosti. Često je u istrazi ili na sudu potrebno rekonstruisati neki zvučni događaj, kako bi se utvrdilo može li taj događaj čuti osoba normalnog sluha. Takođe je potrebno utvrditi da li je zvučni događaj bio maskiran nekim drugim zvučnim signalima. Na taj način se proverava iskaz svedoka ili drugog učesnika događaja koji je, ili nije, čuo zvuk važan za kriminalističko istraživanje.

Akustička analiza pucnjave. Često u slučajevima zločina postoje audio snimci pucnjave. Karakteristike i vremenski raspored pucnjave mogu pomoći istražnim organima da rekonstruišu redosled događaja na mestu zločina, a u nekim slučajevima i da odrede orijentaciju cevi i vrstu vatrenog oružja. Akustičke karakteristike pucnjave uključuju prasak eksplozije, dolazak zvuka reflektovanog od tla i drugih okolnih površina, i eventualno neki dokaz o akustičkom udarnom talasu, ako je metak putovao supersoničnom brzinom u pravcu šire pozicije mikrofona. Ako je mikrofona bio blizu vatrenog oružja, takođe je moguće da se u snimku detektuju zvučni signali koji potiču od mehaničkog delovanja oružja.

Istraživanje uzroka avionskih nesreća. Istrage o nesrećama putničkih aviona se, između ostalog, oslanjaju i na informacijama koje se dobijaju iz sistema za snimanje podataka o letu aviona i sistema za snimanje razgovora u kabini aviona (crna kutija). Snimač podataka o letu aviona čuva brojne digitalne podatke o parametrima motora, avionske opreme, površinama za kontrolu leta i mnogim senzorima, dok crna kutija sadrži nekoliko audio kanala za signale koji potiču od radio komunikacije sa

kontrolom leta na zemlji, kao i signal sa mikrofona u kabini. Crna kutija obično ima kapacitet snimanja od poslednjih 120 minuta.

Iz podataka snimljenih na pomenutim sistemima u avionu moguće je utvrditi sa li se neki događaj tokom leta aviona dogodio ili ne. Na primer, kada pilot manipuliše zakrilcima čuje se karakterističan zvučni signal. Analizom i obradom snimka iz sistema za beleženje podataka o letu aviona, moguće je izvući takav signal, sinhronizovati ga sa hronologijom leta, i na taj način utvrditi jesu li i u koje vreme pojedini postupci bili preduzeti.

Takođe, analizom snimka iz crne kutije moguće je, iz razgovora pilota sa kontrolom leta, utvrditi mnoge pojedinosti vezane za probleme koji su iskršli tokom leta, neposredno pre nesreće.

12.12 Pitanja za proveru znanja

1. Šta je audio forenzika?
2. Koja su osnovna polja primene audio forenzike?
3. Koje su to govorne jedinice i koje su im osnovne osobine?
4. Objasniti šta su artikulacione, akustičke i dinstiktivne karakteristike fonema.
5. Navesti i objasniti akustičke parametre govora.
6. Šta su prozodijske karakteristike govora?
7. Objasniti percepciju emocija u govoru.
8. Šta se podrazumeva pod proverom autentičnosti audio snimaka i koja je njena svrha?
9. Navesti i ukratko objasniti pojedine faze koje se primenjuju prilikom provere autentičnosti audio snimaka.
10. Šta se podrazumeva pod poboljšanjem kvaliteta audio snimaka i koja mu je svrha?
11. Navesti i ukratko objasniti pojedine faze koje se primenjuju prilikom poboljšanja kvaliteta audio snimaka.
12. Ukratko objasniti postupak forenzičke transkripcije.
13. Objasniti kako se čovečji glas koristi kao biometrijski parameter.
14. Objasniti koje su razlike između prepoznavanja govora i prepoznavanja glasa, kao i identifikacije i verifikacije govornika.
15. Šta je biometrijsko a šta forenzičko prepoznavanje govornika?
16. Objasniti šta se podrazumava pod ekstalingvističkim i paralingvističkim informacijama u govoru.
17. Koji se načini koriste za ekstrakciju obeležja govornog signala pri forenzičkom prepoznavanju govornika?
18. Objasniti metodologiju rada forenzičkog prepoznavanja govornika pri ekspetskoj analizi.
19. Ukratko objasniti pojmove akustičke, fonetske i lingvističke analize pri forenzičkom prepoznavanju govornika.

20. Objasniti kako se formira ekspertsko mišljenje pri forenzičkom prepoznavanju govornika.
21. Objasniti šta je auditivno predočavanje.
22. Koje osnovne zahteve treba da ispuni laboratorija za audio forenziku?
23. Objasniti neke specifične primere primene audio forenzike.

12.13 Literatura

- [1] Škarić, „Određenje govora“, *Govor*, 3(2), str. 2-16, 1986.
- [2] B. E. Koenig, „Enhancement of forensic audio recordings,“ *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 36, no. 11, pp. 884–894, 1988.
- [3] B. E. Koenig, „Authentication of Forensic Audio Recordings“, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 38, No. 1/2, 1990.
- [4] M. M. Đorđević i S.T. Jovičić, „Akustički parametri govora u verifikaciji govornika“, *Zbornik radova XXXVIII Konf za ETRAN*, jun 1994.
- [5] S. T. Jovičić, *Govorna komunikacija - Fiziologija, psihoakustika i percepcija*, Nauka, Beograd, 1999.
- [6] S.T. Jovičić i M. M. Đorđević, „Neka zapažanja o varijacionim poljima akustičkih obeležja u kontinualnom govoru i u različitim emocionalnim stanjima“, *Zbornik radova XLVI Konf za ETRAN*, tom II, jun 2002.
- [7] V. D. Delić, „Govorna komunikacija čoveka i mašine“, *Zbornik radova X konferencije Telfor*, Beograd 2002.
- [8] R. Bugarski, *Uvod u opštu lingvistiku*, Beograd, Čigoja štampa, 2003.
- [9] B. E. Koenig, N. Herold, D. S. Lacey, „Equipping the Modern Audio-Video Forensic Laboratory“, *Forensic Science Communications*, Volume 5, Number 2, 2003.
- [10] S. T. Jovičić, Z. Kašić, M. Đorđević, M. Vojnović, M. Rajković, J. Savković, „Formiranje korpusa govorne ekspresije emocija i stavova u srpskom jeziku – GEES“, *Zbornik radova XI konferencije Telfor*, Beograd 2003.
- [11] R. C. Maher, „Audio Enhancement using Nonlinear Time-Frequency Filtering,“ in *Audio Engineering Society Conference: 26th International Conference: Audio Forensics in the Digital Age*, 2005.
- [12] G. J. Brown, DeL. Wang, „Separation of Speech by Computational Auditory Scene Analysis“, Chapter 16 in J. Benesty, S. Makino, J. Chen (Eds.), *Speech Enhancement*, Springer, New York, pp. 371–402, 2005.
- [13] D. R. Begault, B. M. Brustad and A. M. Stanley, „Tape analysis and authentication using multi-track recorders“, *AES 26th International Conference*, July 7–9, 2005.
- [14] S. Jovičić, Z. Kašić, M. Đorđević, „Paralingvističke i ekstralingvističke informacije u govornim tehnologijama“, *Zbornik radova 50. Konferencije za ETRAN*, tom II, jun 2006.

- [15] B. E. Koenig, D. S. Lacey, and S. A. Killion, "Forensic enhancement of digital audio recordings," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 55, no. 5, pp. 352–371, 2007.
- [16] AES27-1996 (r2007) *AES recommended practice for forensic purposes* — Managing recorded audio materials intended for examination.
- [17] M. Vojnović, „Glas kao biometrijski parametar“, *Primenjena lingvistika 10*, str. 93-102, Beograd-N. Sad, 2009.
- [18] M. Vojnović, „Akustičke osnove forenzičke identifikacije govornika“, *Pravo i forenzika u kriminalistici*, Zbornik radova, str. 409-416, Kragujevac, 2009.
- [19] S. T. Jovičić, „Forenzičko prepoznavanje govornika: između teorije i prakse“, *Pravo i forenzika u kriminalistici*, Zbornik radova, Kragujevac, 2009.
- [20] B. E. Koenig, D. S. Lacey, „Forensic Authentication of Digital Audio Recordings“, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 57, No. 9, 2009.
- [21] R. C. Maher, „Audio Forensic Examination - Authenticity, enhancement, and interpretation“, *IEEE Signal processing magazine*, 84, March 2009.
- [22] S. T. Jovičić, Z. Kašić, „Intra-spikerske varijacije u govoru: forenzičke implikacije“, *Primenjena lingvistika 11*, str. 123-133, Beograd-N. Sad, 2010.
- [23] Z. Šarić, S. T. Jovičić M. Đorđević, „Poboljšanje kvaliteta govornih snimaka za potrebe forenzičke transkripcije“, *Primenjena lingvistika 11*, str. 133-143, 2010.
- [24] R. Maher, "Overview of audio forensics," *Intell. Multimed. Anal. Secur. Appl.*, pp. 127–144, 2010.
- [25] M. Vojnović, „Uticaj različitih izobličenja govornog signala na pouzdanost identifikacije govornika“, *Primenjena lingvistika 11*, str. 145-154, Beograd-N. Sad, 2010.
- [26] Z. Kašić, M. Ivanović, „Govorni parametri i tuga“, *Specijalna edukacija i rehabilitacija* Vol. 10, br. 4. Str. 745-763, Beograd, 2011.
- [27] A. Eriksson, *Tutorial on Forensic Speech Science*, Gothenburg 2012.
- [28] K. Kondo, *Subjectively Quality Measurement of Speech its Evaluating, Estimation and Application*, Springer, 2012.
- [29] M. Stolbov and P. Ignatov, "Speech Enhancement Technique for Low SNR Recording," in *Audio Engineering Society Conference: 46th International Conference: Audio Forensics*, 2012.
- [30] P. Ignatov, M. Stolbov, and S. Aleinik, "Semi-Automated Technique for Noisy Recording Enhancement Using an Independent Reference Recording," in *Audio Engineering Society Conference: 46th International Conference: Audio Forensics*, 2012.
- [31] C. Grigoras, D. Rappaport, J. M. Smith, „Analytical Framework for Digital Audio Authentication“, *AES 46th International Conference*, 2012.

- [32] L. Subotić, D. Sredojević, I. Bjelaković, *Fonetika i fonologija: ortoepska i ortografska norma standardnog srpskog jezika*, Filozofski fakultet, Novi Sad 2012.
- [33] S. G. Punišić, *Artikulaciono-akustički i auditivni aspekt odstupanja glasova u patološkom izgovoru*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Studije pri univerzitetu u Beogradu, 2012.
- [34] T. Ašić, *Nauka o jeziku*, Zavod za udžbenike, Beograd, 2014.
- [35] S. T. Jovičić, Z. Kašić, „Prepoznavanje govornika: forenzički izazovi“, *Zbornik radova konferencije ZITEH 14*, Beograd 2014.
- [36] D. S. Kulkarni, R. R. Deshmukh, P. P. Shrishrimal, „A Review of Speech Signal Enhancement Techniques“, *International Journal of Computer Applications*, Volume 139, No.14, 2016.
- [37] Scientific Working Group on Digital Evidence, „*SWGDE Best Practices for Forensic Audio*“, Version: 2.2, October 2016.
- [38] G. S. Morrison, E. Enzinger, C. Zhang, *Forensic speech science*, In I. Freckelton, H. Selby (Eds.), *Expert Evidence* (Ch. 99), Sydney, Australia: Thomson Reuters, 2017.

Indeks pojmova

A

Ajringov obrazac, 51
Akord, 91
Akustika, 2
Akustika prostorija, 47
Akustička izolacija, 139, 301
Akustička impedansa, 152
Akustička induktivnost, 148
Akustička kapacitivnost, 147, 152
Akustička podela mikrofona, 169, 199
Akustička podela zvučnika, 201
Akustički rezonator, 58
Amplituda, 7
Analizator frekvencije, 74, 75
Apsorpcija, 1, 22
Apsorber, 62

B

Bazilarna membrana, 80, 81
Bas-refleks, 222
Bezvučni glasovi, 94, 106
Beli šum, 18, 63
Boja zvuka, 74, 83
Brzina čestica, 38, 166
Bubna opna, 77
Buka, 18, 98

V

Visina tona, 74, 83
Vokalni trakt, 105, 106
Vreme reverberacije, 47

G

Glasne žice, 106
Glasnost, 83, 86
Gradijentni mikrofoni, 171
Građevinarstvo, 60, 119
Granica bola, 84

D

Decibel, 14, 15
Dinamika, 74, 94
Direktan zvuk, 55
Difrakcija, 22
Difuzno polje, 69
Doplerov efekat, 39

E

Električna podela mikrofona, 169
Elektrodinamički mikrofoni, 182
Elektrodinamički zvučnik, 208
Elektret, 196
Eustahijeva tuba, 77, 78
Efekat blizine, 172
Efikasnost zvučnika, 205

Z

Zakon mase, 139, 144
Zaštita od buke, 141
Zvučnik, 160

I

Izbijanje, 31
Izvor zvuka, 2, 5
Izolaciona moć, 138, 139
Izofonske krive, 86
Intenzitet zvuka, 12
Infra zvuk, 9

J

Jačina buke, 119

K

Koeficijent apsorpcije, 30, 44
Koeficijent refleksije, 30
Kondenzatorski mikrofoni, 192
Kohlea, 78, 79
Kriterijumi buke, 118, 131

- L**
- Lokalizacija, 101, 103
 - Longitudinalni talasi, 5, 16, 214
 - Linijski spektar, 90, 91
- M**
- Mikrofon, 161
- N**
- Nivo zvuka, 14
- O**
- Ovalni prozor, 77, 78
 - Optimalno vreme reverberacije, 52, 53
 - Oštećenje čula sluha, 82
- P**
- Porozni materijali, 47, 59
 - Prag čujnosti, 14, 15
 - Prve refleksije, 48, 61
 - Presioni mikrofoni, 170
 - Prost zvuk, 18, 19
- R**
- Ravanski talas, 4, 39
 - Reverberacija, 52, 94
 - Reflektovani zvuk, 55
 - Refrakcija, 1, 26
- S**
- Sabinov obrazac, 51, 53
 - Samoglasnici, 18, 90
 - Slabljenje zvuka, 21, 44
 - Složen zvuk, 17
 - Slušalice, 34
 - Slušni kanal, 75, 76
 - Son, 88, 90
 - Spektar, 17, 18
 - Strukturna buka, 120, 140
 - Subjektivna jačina zvuka, 86

- T
Talasna dužina, 9
- F
Fon, 97
Fonometar, 97
Formanti, 108, 109
Frekvencija, 112, 113
- H
Harmonik, 39, 75
Hasov efekat, 103
Helmholcov rezonator, 154, 329
- Č
Čujno područje, 2, 91
- Š
Šum, 18, 19

ISBN 978-86-7982-283-3



9 788679 822833 >