

PRAKTIKUM IZ ELEKTROAKUSTIKE

DRAGANA ŠUMARAC PAVLOVIĆ

Dragana S. Šumarac Pavlović

PRAKTIKUM IZ ELEKTROAKUSTIKE

Razenzenti:

dr Miomir Mijić

dr Husnija Kurtović

Odlukom Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta broj 918 od 25.04.2013. godine ovaj rukopis je odobren kao nastavni materijal na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu

Izdavač

Elektrotehnički fakultet - Beograd

ISBN 978-86-7225-053-4

UVOD

Praktikum iz elektroakustike namenjen je studentima koji na osnovnim ili master studijama prate predmet Elektroakustika. U okviru tog predmeta postoje laboratorijske vežbe koje se rade u Laboratoriji za akustiku ETF. Ove vežbe pokrivaju različite teme koje su važne za razumevanje pojava vezanih za proces nastanka i prostiranja zvuka u slobodnom i zatvorenom prostoru, i u koje je čovek uključen kao jedan od značajnih izvora i prijemnika zvuka.

Praktikumom su pokrivene vežbe koje su koncipirane tako da ilustruju pojedine fenomene i upoznaju studente sa specifičnim mernim tehnikama, hardverom i softverom koji se koriste u ovoj inženjerskoj oblasti.

Praktikum je podeljen u nekoliko tematskih celina u okviru kojih je prikazano po nekoliko eksperimenata. Oni treba studentima da približe neke od fenomena koji su važni za razumevanje date oblasti. Neki od prikazanih eksperimenata predviđeni su da se izvode kao pokazne vežbe, a neki podrazumevaju samostalan rad. Za svaku tematsku oblast prikazan je kratak teorijski osvrt na zadatu temu, objašnjen je značaj pojave koja se posmatra sa teorijskog ili praktičnog stanovišta i navedeno je kratko uputstvo za rad sa potrebnom opremom u hardverskom i softverskom domenu. Za svaku vežbu dat je pregled potrebnih uređaja.

Sve prikazane laboratorijske vežbe tematski su podeljene u sedam celina. Svakom od njih obuhvaćeno je nekoliko vežbi. Tematske celine i vežbe u njima su:

1. Proces generisanja zvuka vibriranjem krutih tela

- a. Vizuelizacija i analiza sopstvenih rezonanci štapa
- b. Analiza i vizuelizacija sopstvenih rezonanci ploče
- c. Proces generisanja zvuka kod muzičkih instrumenata

2. Proces generisanja i ekstrakcija osnovnih obeležja govornog signala

- a. Opšte osobine vokala
- b. Analiza sopstvenog glasa
- c. Analiza suglasnika
- d. Analiza kontinualnog govora

3. Efekat komb filtera

- a. Analiza superponiranja na softverskoj platformi
- b. Analiza „komb“ filtera efekta u realnim okolnostima

4. Psihoakustika

- a. Snimanje izofonskih krivih
- b. Frekvencijsko maskiranje
- c. Određivanje pravca i udaljenosti zvučnog izvora

5. Prostiranje zvuka u zatvorenom prostoru

- a. Izračunavanje sopstvenih rezonantnih frekvencija komore
- b. Analiza zvučnog pritiska u komori
- c. Analiza stojećeg talasa na jednoj rezonantnoj frekvenciji
- d. Merenje vremena reverberacije
- e. Merenje koeficijenta apsorpcije

6. Zvučno polje u prostorima malih dimenzija

- a. Određivanje parametara akustičkog kola Helmholtcovog rezonatora
- b. Određivanje nepoznate zapremine
- c. Određivanje uticaja prisustva poroznog materijala u komori i na otvoru cevi
- d. Analiza uticaja promene poprečnog otvora cevi

7. Elektroakustički pretvarači

- a. Merenje karakteristike usmerenosti zvučnika
- b. Merenje ulazne impedance zvučnika
- c. Merenje usmerenosti mikrofonskog sistema sa promenljivom karakteristikom usmerenosti

Laboratorijske vežbe svake godine doživljavaju manje ili veće promene. One su proistekle iz laboratorijskih vežbi koje je u okviru ovog predmeta osmislio prof. Miomir Mijić. Promene koje su usledile nastale su kao posledica iskustva u radu sa studentima i ideja koje se rađaju na osnovu interakcije sa njima, njihovih pitanja i tema koje ih zainteresuju. S druge strane promene su nastale i kao posledica uvođenja novih vežbi koje su studenti završnih godina kao svoje projektne, diplomske ili master radove realizovali. U realizovanju vežbi koje su prikazane u ovom priručniku svoj doprinos dali su Jelena Čertić, Dejan Todorović, studenti Bojan Jovanović, Vladimir Dragišić, Nikola Radosavljević, Mirjana Radosavljević, Miloš Bjelić

SADRŽAJ

VEŽBA BROJ 1 – GENERISANJE ZVUKA VIBRACIJAMA ČVRSTIH TELA.....	1
V1.1 VIZUELIZACIJA I ANALIZA SOPSTVENIH REZONANCI ŠTAPA.....	3
V1.2 ANALIZA I VIZUELIZACIJA SOPSTVENIH REZONANCI PLOČE.....	7
V1.3 PROCES GENERISANJA ZVUKA KOD MUZIČKIH INSTRUMENATA.....	10
IZVEŠTAJ.....	12
VEŽBA BROJ 2 – OSNOVNA OBELEŽJA GOVORNOG SIGNALA.....	14
V2.1 OPŠTE OSOBINE VOKALA.....	15
V2.2 ANALIZA SOPSTVENOG GLASA.....	16
V2.3 ANALIZA SUGLASNIKA.....	16
V2.4 ANALIZA KONTINUALNOG GOVORA.....	16
KRATKO UPUTSTVO ZA KORIŠĆENJE PROGRAMSKOG PAKETA PRAAT.....	16
IZVEŠTAJ.....	20
VEŽBA BROJ 3 – SUPERPONIRANJE ZVUČNIH TALASA – EFEKAT “KOMB” FILTRA....	21
V3.1 SOFTVERSKA ANALIZA SUPERPONIRANJA	21
V3.2 ANALIZA EFEKTA „KOMB“ FILTRA U REALNIM OKOLNOSTIMA	25
IZVEŠTAJ.....	28
VEŽBA BROJ 4 – PSIHOAKUSTIKA – ČULO SLUHA.....	29
V4.1 – SNIMANJE IZOFONSKIH KRIVIH.....	36
V4.2 – FREKVENCIJSKO MASKIRANJE.....	37
V4.3. ODREĐIVANJE PRAVCA I UDALJENOSTI ZVUČNOG IZVORA.....	40
IZVEŠTAJ.....	44
VEŽBA BROJ 5 – ZVUČNO POLJE U ZATVORENOM PROSTORU.....	45
V5.1 IZRAČUNAVANJE SOPSTVENIH REZONANTNIH FREKVENCIJA KOMORE.....	53
V5.2 ODREĐIVANJE SOPSTVENIH REZONANCI MERENJEM ODZIVA KOMORE.....	53
V5.3 ANALIZA STOJEĆEG TALASA NA JEDNOJ REZONANTNOJ FREKVENCIJI.....	55
IZVEŠTAJ.....	56

V5.4 MERENJE VREMENA REVERBERACIJE.....	57
V5.5 MERENJE KOEFICIJENTA APSORPCIJE.....	58
IZVEŠTAJ.....	59
VEŽBA BROJ 6 – AKUSTIČKI REZONATOR.....	60
V6.1 ODREĐIVANJE PARAMETARA AKUSTIČKOG KOLA HELMHOLCOVOG REZONATORA.....	63
V6.2 ODREĐIVANJE NEPOZNATE ZAPREMINE.....	65
V6.3 ODREĐIVANJE UTICAJA PRISUSTVA POROZNOG MATERIJALA U KOMORI I NA OTVORU CEVI.....	66
V6.4 ANALIZA UTICAJA PROMENE POPREČNOG OTVORA CEVI.....	66
IZVEŠTAJ.....	67
VEŽBA BROJ 7 – ELEKTROAKUSTIČKI PRETVARAČI.....	68
V7.1 MERENJE FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE ZVUČNIKA	73
V7.2 MERENJE KARAKTERISTIKE USMERENOSTI ZRAČENJA ZVUČNIKA.....	74
V7.3 MERENJE ULAZNE IMPEDANSE ZVUČNIKA.....	75
IZVEŠTAJ.....	77
V7.4 MERENJE USMERENOSTI MIKROFONSKOG SISTEMA SA PROMENLJIVOM KARAKTERISTIKOM USMERENOSTI.....	79
IZVEŠTAJ.....	87

VEŽBA BROJ 1

GENERISANJE ZVUKA VIBRACIJAMA ČVRSTIH TELA

Cilj ove vežbe je da se studentima prikaže generisanja zvuka u vazduhu vibracijama čvrstih tela, što je jedan od važnih načina stvaranja zvuka u svakodnevnom životu. Konkretno, u vežbi se vizuelizuju i analiziraju sopstvene oscilacije štapa i ploče, kao i proces stvaranja zvuka muzičkih instrumenata. U vežbi je poseban akcenat stavljen na objašnjenje procesa generisanja zvuka žičanih muzičkih instrumenata. Kontrolisano generisanje zvuka kod te vrste muzičkih instrumenata zasnovano je na rezonantnim pojavama koje se javljaju na žicama i na telu instrumenta. U okviru vežbe studenti treba da ovladaju metodama merenja frekvencije sopstvenih rezonanci čvrstih tela i analizom prostorne raspodele amplituda vibracija na njima.

TEORIJSKI UVOD

Zvuk je definisan kao svaka vremenski promenljiva mehanička deformacija u elastičnoj sredini. U nekim oblastima života u opticaju je subjektivistička definicija po kojoj je zvuk sve ono što registruje čulo sluha. Čovečije čulo sluha prilagođeno je prijemu zvučnih informacija iz vazdušne sredine. Ako se pođe od subjektivističke definicije zvuka, onda se može reći da nas zanimaju procesi ili uređaji koji kontrolisano generišu mehaničke poremećaje u vazdušnoj sredini koje je u stanju da registruje naše čulo sluha.

Zvuk je po svojoj prirodi mehanička pojava. On nastaje kada se u nekoj elastičnoj sredini, takozvanom mediju, čestice nekom spoljnom silom izvedu iz svog ravnotežnog položaja. Time im se saopštava izvesna energija i pobuđuju se na oscilovanje oko svog ravnotežnog položaja u mediju. Poremećaj koji na taj način nastane u jednom delu te sredine širi se u vidu zvučnih talasa. Pojava zvuka u nekom elastičnom mediju može se opisati stanjem oscilovanja njegovih čestica – pomerajima, brzinom i ubrzanjem. Kada se zvučna pobuda javlja u fluidima, posledica su lokalne promene pritiska i gustine, što se može pratiti mikrofonom kao senzorom.

Zvučni izvori su uređaji ili procesi kojima se česticama sredine saopštava energija tako što se izvode iz svog ravnotežnog položaja i pobuđuju na oscilovanje. Taj proces može nastati na četiri načina: vibracijama čvrstih tela, prinudnim pulsiranjem vazdušne struje, turbulencijama u fluidima i brzim termičkim dejstvima.

Najčešće korišćeni način kontrolisanog generisanja zvuka u vazduhu je vibriranjem čvrstih tela. Takav proces može da počiva na dva principa. Prvi princip zastupljen je kod elektroakustičkih pretvarača, na primer zvučnika, gde je njegova membrana kruti klip koje vibrira u prinudnom režimu diktiranom kontrolisanom silom koja pokreće tu membranu. Drugi princip, koji se sreće kod muzičkih instrumenata, posledica je osobine mehaničkih sistema (čvrsto telo ili vazduh zarobljen u vazдушnom stubu) da se u njima ispoljavaju neke rezonantne pojave. Tako generisanja zvuka žičanih muzičkih instrumenata počiva na mehaničkim rezonantnim pojavama koje se javljaju u žicama i telu instrumenta kada su žice nekom spoljašnjom širokopojasnom silom pobuđene na oscilovanje. Sopstvene rezonance koje određuju ton instrumenta nastaju u žicama, i dalje se prenose na telo instrumenta u kome se takođe javljaju rezonantni procesi koji određuju konačno osobine zvuka koje taj instrument stvara. Kod duvačkih instrumenata takođe se javljaju rezonantne pojave, ali u vazduhu unutar vazdušnog stuba u samom instrumentu.

Za pojavu rezonanci u nekom mediju karakteristični su stojeći talasi koji se manifestuju zonama sa manjim (čvorovi) i većim (trbusi) amplitudama vibracija. Rezonance, a time i stojeći talasi, u telima javljaju se na frekvencijama koje su definisane njihovim geometrijskim dimenzijama i mehaničkim svojstvima materijala.

Proces generisanja zvuka kod žičanih instrumenata počiva na rezonantnim pojavama koje nastaju najpre u samim žicama. Žice su jednodimenzionalni mehanički sistem. Kada se pobude na oscilovanje (trzanjem, gudalom ili čekićem) na njima se ispoljavaju rezonantne pojave. Spolja posmatrano, one se manifestuju stojećim talasima koji se formiraju na žici. Forma tih talasa zavisi od mehaničkih svojstava materijala od koga je napravljena žica i načina na koji je ona pričvršćenja na svojim krajevima. Rezonantne frekvencije žice ispoljavaju pravilnost i javljaju se u harmonijskom nizu počevši od osnovne frekvencije. Kod žičanih muzičkih instrumenata žica je učvršćena na dva kraja i sopstveni modovi se javljaju na frekvencijama koje su određene izrazom:

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

gde je L dužina žice a c brzina prostiranja talasa duž žice. Ta brzina zavisi od materijala žice, njene elastičnosti i sile zatezanja. Na mestima učvršćenja, na krajevima, uvek se nalazi čvor stojećeg talasa. Osnovna frekvencija, što je i osnovni ton koji generiše instrument, određena je frekvencijom f_1 iz gornjeg izraza, a spektar mu se sastoji od diskretnih komponenti na celobrojnim umnošćima ove osnovne frekvencije.

Vibracije same žice ne mogu da pobude veću masu vazduha zbog svoje male površine. Zbog toga se u muzičkim instrumentima vibracije sa žice prenose preko odgovarajućih konstruktivnih elemenata na telo instrumenta označeno kao "rezonator". To telo pobuđeno na vibracije svojom velikom površinom pobuđuje značajno veću masu vazduha i tako emituje u prostor veću zvučnu energiju. Međutim, i samo telo instrumenta ispoljava neka svoja rezonantna svojstva koja u tom procesu

oblikuju spektar pobudnog signala (nastalog oscilovanjem žice). U procesu oscilovanja učestvuju površine kutije rezonatora instrumenta i vazduh koji se nalazi u njegovoj unutrašnjosti. Za boju zvuka koju generiše neki instrument odgovorni su svi konstruktivni detalji, oblik i materijal ploča od koga je sagrađena rezonatorska kutija instrumenta, kao i njen oblik i veličina. Proces generisanja zvuka muzičkih instrumenata je proces koji je započet nekom spoljašnjom širokopoljnom pobudom, a koji je ustvari proces smirivanja sopstvenih oscilacija mehaničkih delova instrumenta.

Vizualizaciju procesa oscilovanja krutih tela moguće je postići merenjem promene pritiska u bliskom polju, što znači u neposrednoj blizini površine vibrirajućeg tela. To se može postići i na način u kome bi vibracije u tim telima mogle da mehanički deluju na neke druge materijale s kojima su u kontaktu i tako stvore neke golim okom vidljive promene.

V1.1 VIZUELIZACIJA I ANALIZA SOPSTVENIH REZONANCI ŠTAPA

Na slici V1.1 prikazana je blok-šema postavke vežbe u okviru koje se određuju frekvencije sopstvenih rezonanci jednog štapa od elastičnog materijala kada je on pričvršćen na jednom svom kraju, a drugi kraj mu je slobodan. Za realizaciju vežbe koristi se sledeća oprema:

1. računar sa odgovarajućim softverom za analizu
2. audio interfejs (AD/DA konvertor)
3. pojačavač snage
4. mehanički pobuđivač ("šejker") sa priborom za pričvršćenje štapa
5. štap od nekog elastičnog materijala
6. mikrofon

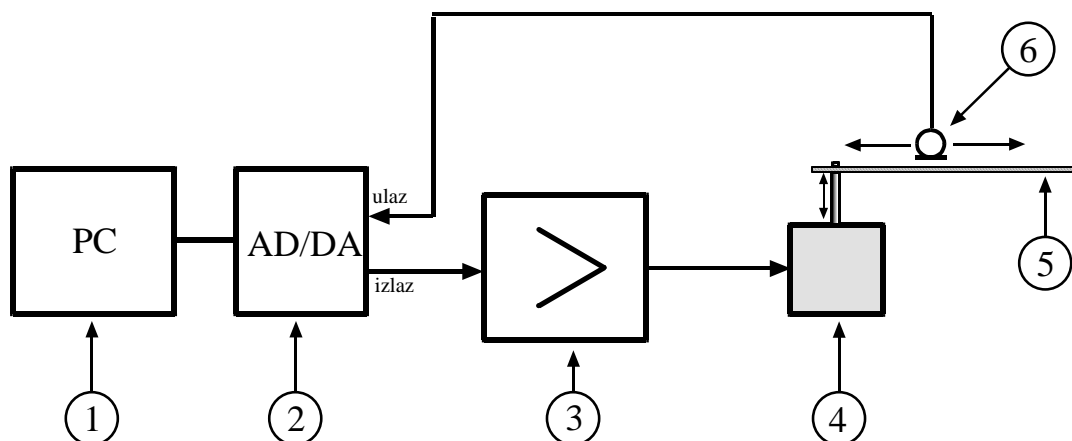
Brojevi u slici odgovaraju brojevima sa spiska opreme. Na slici V1.2 prikazana je fotografija postavke vežbe u laboratoriji.

Štap se na jednom svom kraju pobuđuje na vibracije uz pomoć mehaničkog pobuđivača (u tehničkom žargonu često nazvanom "šejker") za koji je pričvršćen. Za pobudu se po potrebi koristi širokopoljasni signal (šum) ili čisti sinusni tonovi generisani iz računara. Zadatak u ovom delu vežbe je da se odrede:

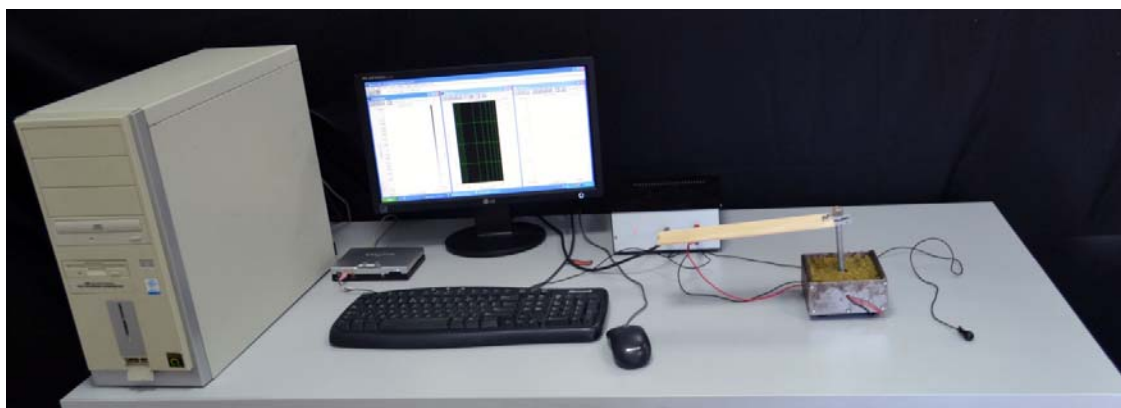
- frekvencije sopstvenih rezonantnih frekvencija štapa,
- prostorno-frekvencijska raspodela amplituda oscilacija na štapu i
- promena amplitude oscilovanja duž štapa na rezonantnoj frekvenciji.

Za izvođenje vežbe koristi se softver kojim se istovremeno generiše signal, koji se šalje preko pojačavača u pobuđivač, i prima signal iz mikrofona, koji se posmatra i analizira u vremenskom i frekvencijskom domenu. Za analizu stanja oscilovanja štapa koristi se metoda merenja u bliskom polju vibrirajuće površine. To se realizuje postavljanjem mikrofona u neposrednu blizinu površine

štapa, tako da on registruje zvučni pritisak praktično na vibrirajućoj površini, bez spoljašnjih fizičkih uticaja.



Slika V1.1 Blok-šema merne postavke za vizuelizaciju sopstvenih rezonanci štapa

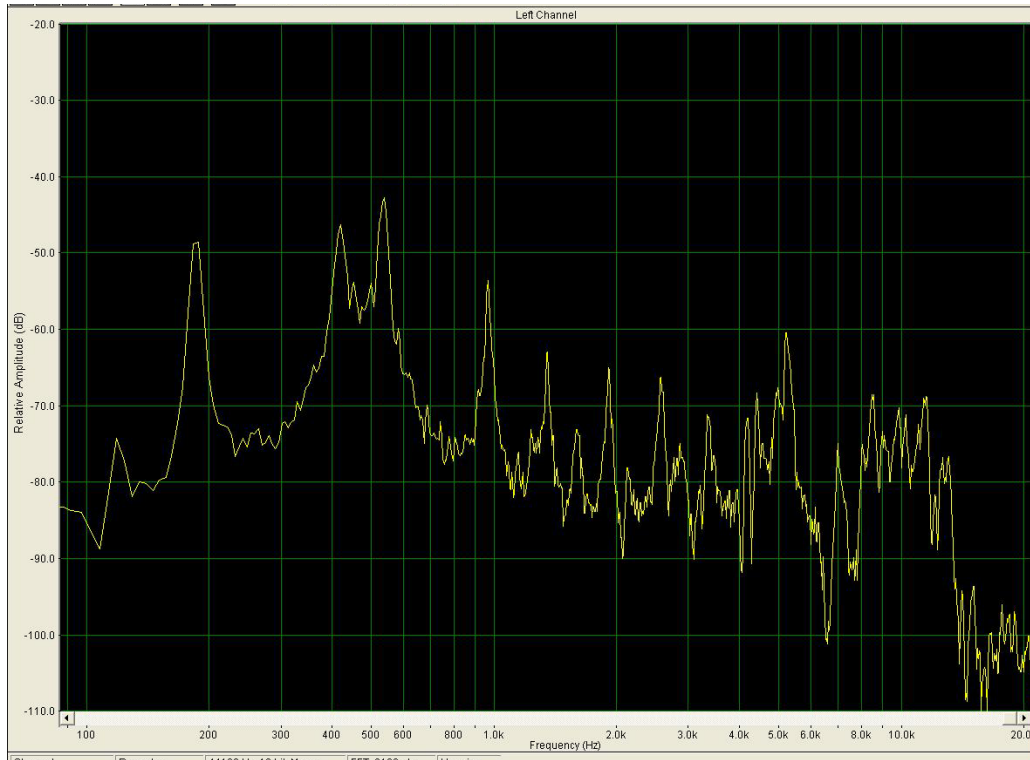


Slika V1.2 Fotografija merne postavke u laboratoriji (s desne strane se vidi mikrofoni i mehanički pobuđivač sa učvršćenim štapom)

ODREĐIVANJE SOPSTVENIH REZONANTNIH FREKVENCIJA ŠTAPA

Štap se jednim svojim krajem pričvrsti za mehanički pobuđivač pomoću stezaljke. Za pobudu se koristi beli šum. Mikrofon se drži u ruci tako da bude u bliskom polju površine štapa, a to znači na nekoliko milimetara od njegove površine. U takvim okolnostima mikrofonom se registruje promena zvučnog pritiska u bliskom polju vibrirajuće površine. Mikrofon se pomera duž štapa tako da se više puta pređe njegova kompletna dužina. Kretanje mikrofona treba da bude malom brzinom, nekoliko cm/s. Sve vreme kretanja mikrofona vrši se snimanje signala u programu. Trajanje snimka treba da bude oko 30 s. Za ukupni snimljeni signal izračunava se srednji spektar.

Izgled tako dobijenog srednjeg spektra na jednom analiziranom štapu prikazan je na slici V1.3. Na spektru se na nekim frekvencijama jasno vide maksimumi koji predstavljaju maksimume zvučnog pritiska na površini štapa. Ti maksimumi se javljaju na njegovim rezonancama, jer je tada pomeraj u oscilovanju štapa povećan, pa i pritisak na površini pokazuje lokalni maksimum. Na osnovu ovakvog prikaza očitava se prvih 10 rezonantnih frekvencija štapa.



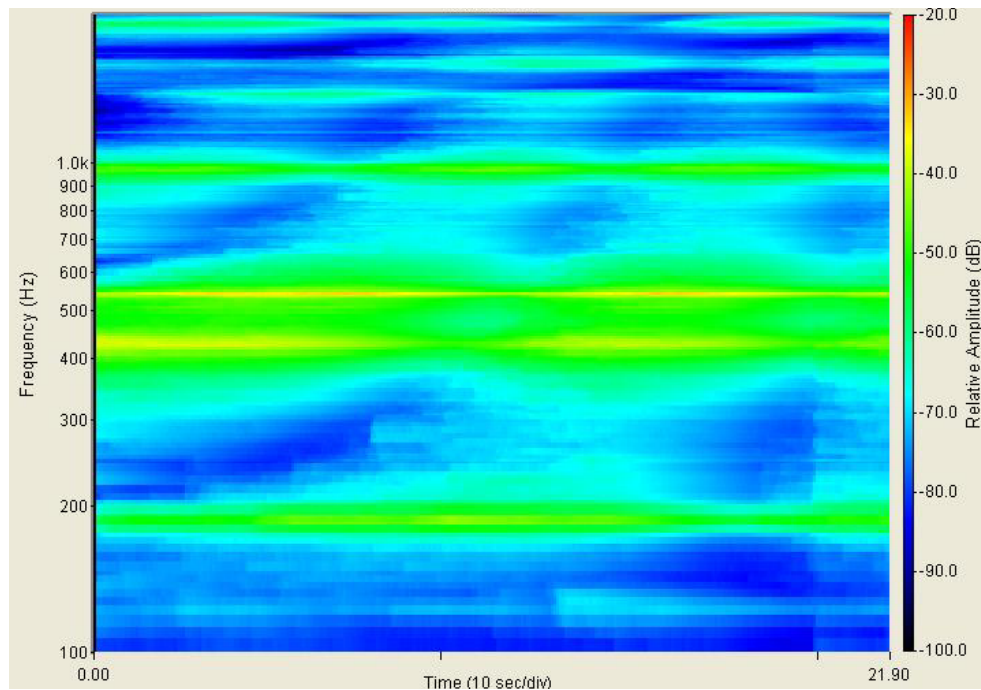
Slika V1.3 Prozor iz programa na kome je prikazan srednji spektar signala snimljen za vreme pomeranja mikrofona duž štapa.

PROSTORNO-FREKVENCIJSKA RASPODELA AMPLITUDA OSCILACIJA NA ŠTAPU

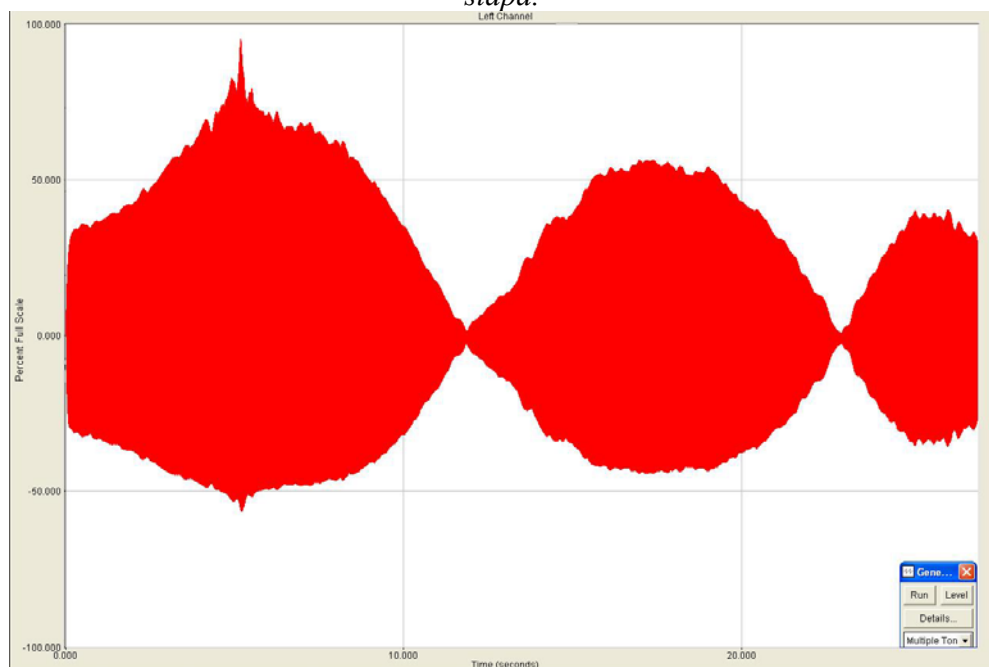
Štap se ovom delu eksperimenta pobuđuje belim šumom generisanim iz programa. Mikrofon se ponovo rukom postavlja u blisko polje površine štapa (na rastojanju par milimetara od površine). Mikrofon se u takvom položaju „prošeta“ duž štapa s jednog njegovog kraja do drugog, a signal iz mikrofona se snima. Kretanje mikrofona mora da bude približno konstantnom brzinom. Snimljeni signal se uz pomoć STFT prikazuje u vremensko-frekvencijskoj ravni u formi spektrograma.

Na slici V1.4 prikazan je primer tako snimljenog spektrograma na jednom analiziranom štapu. Vremenska osa na spektrogramu u ovom slučaju predstavlja dužinu štapa, pa promena koju pokazuje spektrogram predstavlja promenu zvučnog pritiska od jednog do drugog njegovog kraja. Zbog toga što je merenje izvršeno u bliskom polju, taj prikaz kvalitativno opsiuje i intenzitet

vibracija površine štapa. Tačnost dobijenog prikaza zavisi od konstantnosti brzine kojom je pokretan mikrofoni u toku snimanja.



Slika VI.4 Prozor iz programa na kome je prikazan spektrogram signala snimljenog pri pomeranju mikrofona od jednog do drugog kraja štapa. Vremenska osa u ovom prikazu predstavlja dužinu štapa.



VI.1.5 Prozor iz programa na kome je prikazana raspodela amplituda oscilovanja duž štapa na jednoj rezonantnoj frekvenciji. Vremenska osa u ovom prikazu predstavlja dužinu štapa.

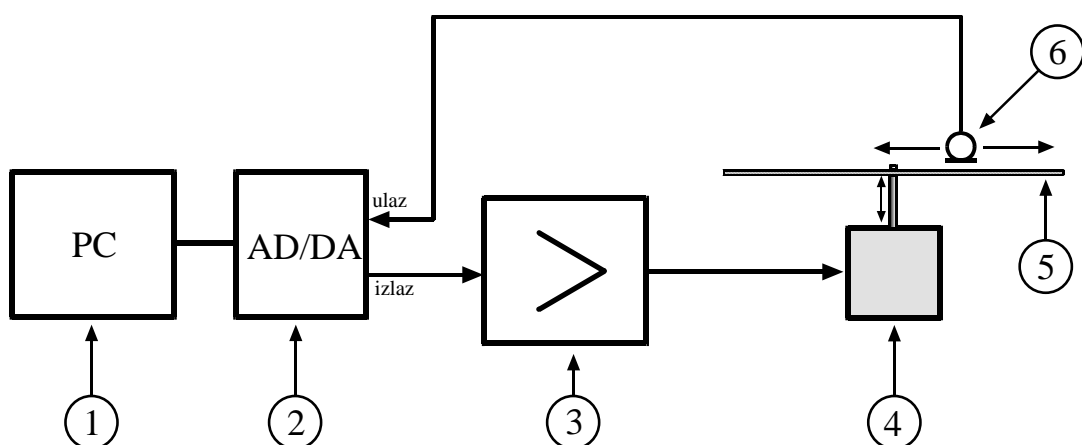
PROMENA AMPLITUDE OSCILOVANJA DUŽ ŠTAPA NA REZONANTNOJ FREKVENCIJI

Sa spiska sopstvenih rezonanci štapa, koji je napravljen u prvom eksperimentu, treba odabrati dve vrednosti. Sad se pobuda štapa vrši sinusnim signalom na tako odabranim frekvencijama koje treba podesiti u programu. Posmatra se promena pritiska duž štapa pri takvoj pobudi. Da bi se dobio takav prikaz, ponovo se, kao u prethodnom eksperimentu, mikrofonom u bliskom polju prelazi iznad površine štapa približno konstantnom brzinom s jednog na drugi kraj i snima signal. I u ovom eksperimentu vremenska osa na dobijenom prikazu predstavlja dužinu štapa, i grafik ilustruje promenu intenziteta vibracija površine štapa. Naravno, tačnost dobijenog prikaza zavisi od konstantnosti brzine kojom je pokretan mikrofoni u toku snimanja.

Na slici V1.5 prikazan je primer tako snimljene raspodele vibracija na jednoj rezonantnoj frekvenciji analiziranog štapa. Na slici se jasno vide čvorovi vibracija na dva mesta duž štapa i maksimumi između njih.

V1.2 ANALIZA I VIZUELIZACIJA SOPSTVENIH REZONANCI PLOČE

U ovom delu vežbe analiziraju se sopstvene rezonance ploče koja je pobuđena na mehaničko oscilovanje. Za razliku od štapa, ploča je dvodimenzionalni mehanički sistem, pa je njeno oscilovanje na rezonancama prostorno kompleksnije. Zadatak vežbe se sastoji u određivanju sopstvenih rezonantnih frekvencija priložene limene ploče, kao i u vizualizaciji raspodela amplituda oscilovanja po njenoj površini.

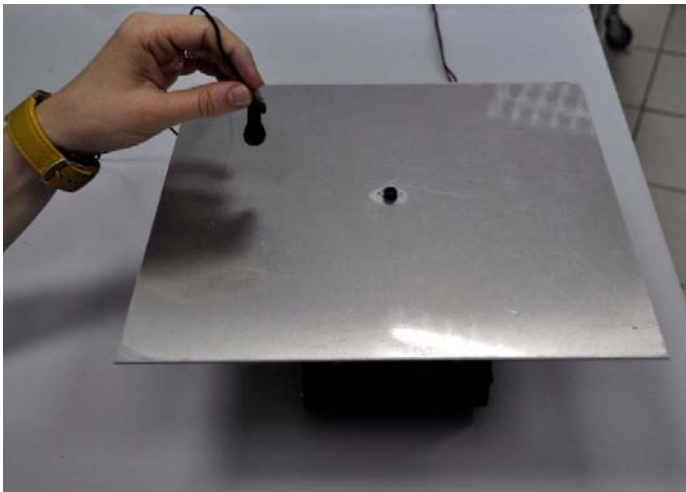


Slika V1.6 Blok-šema merne postavke

Na slici V1.6 prikazana je blok-šema postavke vežbe u okviru koje se analiziraju sopstvene rezonance ploče za slučaj kada je ona pričvršćena u svom centru, a sve ivice su joj slobodne (način fiksiranja ploče utiče na njene rezonance). Za realizaciju vežbe koriste se isti osnovni uređaji kao i pri analizi vibracija štapa. Potrebna oprema je:

1. računar sa odgovarajućim softverom za analizu
2. audio interfejs (AD/DA konvertor)
3. pojačavač snage
4. mehanički pobuđivač ("šejker") sa priborom za pričvršćenje ploče
5. ploča od aluminijumskog lima
6. mikroskop
7. neki rastresiti materijal u sitnim česticama (so ili suvi pesak)

Brojevi u slici odgovaraju brojevima sa spiska opreme. Na slici V1.7 prikazana je fotografija ploče postavljene na pobuđivaču i mikroskop s koji se pomera uz površinu ploče.

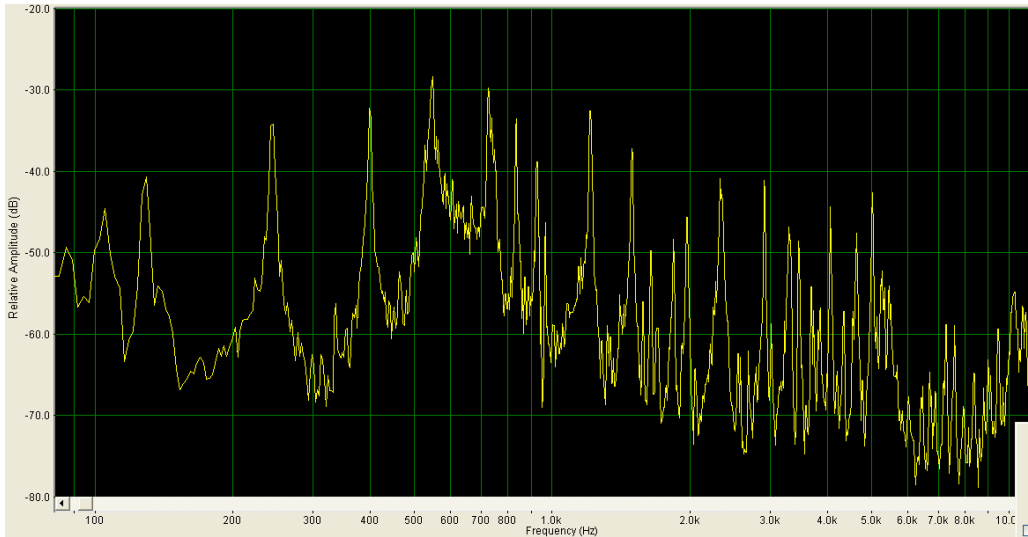


Slika V1.7 Fotografija ploče postavljene na pobuđivaču i mikroskop s koji se pomera uz površinu ploče.

ODREĐIVANJE SOPSTVENIH REZONANTNIH FREKVENCIJA PLOČE

Postupak određivanja sopstvenih rezonantnih frekvencija ploče sličan je postupku koji je primenjen u prvom delu vežbe za slučaj štapa. Na izlaz zvučne kartice preko odgovarajućeg pojačavača priključi se strukturni pobuđivač. Za strukturni pobuđivač tačkastom vezom se pričvrsti ploča čiji se sopstveni modovi ispituju. Ploča se pobuđuje belim ili roze šumom. Mikroskopom koji je priključen na ulaz zvučne kartice računara snima se zvuk u neposrednoj blizini ploče. Mikroskop se pomera nepravilnom trasom po površini ploče i sve vreme se snima signal iz mikrofona. Nakon 30-tak sekundi zaustavlja se snimanje i posmatra se dugovremeni spektar snimljenog signala.

Primer jednog tako dobijenog spektra prikazan je na slici V1.8. I ovde se vide maksimumi u spektru, koji se javljaju na rezonancama ploče, jer je tada pomeraj u oscilovanju njene površine povećan. Na osnovu ovakvog prikaza očitava se prvih 15 rezonantnih frekvencija analizirane ploče.



V1.8 Spektar zvučnog pritiska u neposrednoj blizini vibrirajuće ploče

VIZUALIZACIJA SOPSTVENIH MODOVA I RASPODELA AMPLITUDA OSCILOVANJA

Vizualizacija sopstvenih modova i prostorna raspodela stojećih talasa po površini ploče vrši se uz pomoć nekog sitnog zrnastog materijala (so ili suvi pesak). Takav materijal se posipa po površini ploče. Pri pobudi ploče na nekoj od njenih rezonanci na površini se formiraju slike poznate kao **Chladni pattern**. Mesta na ploči na kojima se javljaju najveće amplitude oscilovanja, a to su trbusi stojećih talasa, postaju očišćena od čestica usled intenzivnih vibracija, dok se u čvorovima nagmilava zrnasti materijal jer tu površina miruje.



Slika V1.9 Izgled Chladni pattern-a na ploči za dve različite frekvencije rezonance.

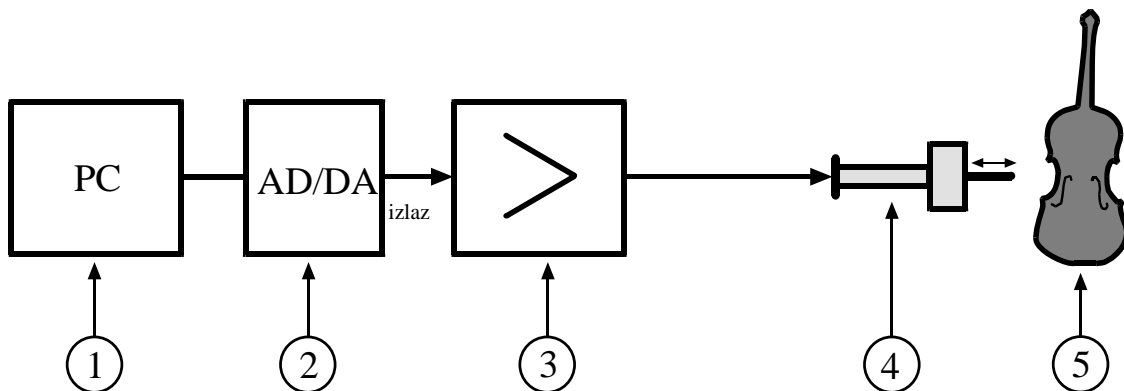
U ovom eksperimentu ploča se posipa raspoloživim zrnastim materijalom i pobuđuje na vibracije nekom od prethodno određenih sopstvenih frekvencija. Tada se na površini ploče dobiju pravilne šare formirane zrnastim materijalom. Postupak treba ponavljati za više rezonantnih frekvencija. Na slici V1.9 prikazan je izgled dve figure dobijene na opisani način na jednoj analiziranoj ploči. Skicirati izgled figura za dve odabrane rezonantne frekvencije.

V1.3 PROCES GENERISANJA ZVUKA KOD MUZIČKIH INSTRUMENTATA

Ovaj deo vežbe je pokazni, i sastoji se od male demonstracije koja ima za cilj da se praktično demonstrira uloga rezonatora kod nekih žičanih muzičkih instrumenata (gudački instrumenti, gitare itd). Na slici V1.10 prikazana je blok-šema postavke u kojoj se demonstrira uloga rezonatora. Za njenu realizaciju koristi se sledeća oprema:

1. računar sa odgovarajućim softverom za reprodukciju signala
2. audio interfejs (AD/DA konvertor)
3. pojačavač snage
4. mehanički pobuđivač ("šejker") u kućištu za držanje u ruci
5. violina

Brojevi u slici odgovaraju brojevima sa spiska opreme. Na slici V1.1 prikazana je fotografija specifičnih delova merne postavke: violine i mehaničkog pobuđivača.



Slika V1.10 Blok-šema postavke za demonstraciju uloge rezonatora

Da bi se objasnila uloga rezonatora instrumenta potrebno je telo violine pobuđivati na mehaničke vibracije koristeći pobuđivač. Mehanički pobuđivač je istog tipa kao i onaj koji je korišćen u prethodnim eksperimentima, samo što je za ove namene postavljen u posebno napravljenom kućištu koje je pogodno za držanje u ruci. Na ovaj način simulira se pobuda koju telo instrumenta

dobije od žica koje osciluju na svojim rezonantnim frekvencijama. Signal se reprodukuje iz računara. Za pobudu se mogu koristiti muzički signali različitog sadržaja, koji potiču od istog i drugačijeg muzičkog instrumenta, pa čak i snimci čitavog orkestra.



V1.11 Fotografija tela violine i mehaničkog pobuđivača koji se koriste u vežbi

Telo violine se dodiruje vrhom pobuđivača na koji je doveden muzički signal, i sluša se dobijeni zvuk koga zrači taj instrument. Pobudu tela violine treba ponavljati u različitim njenim tačkama. Analizirati razlike u zvuku koje nastaju zavisno od mesta pobude. Kao ilustracija, na slici V1.12 prikazano je nekoliko osnovnih modova oscilovanja zadnje i prednje ploče violine.

Na isti način, pomoću korišćenog pobuđivača, mogu se pobuditi na vibracije i drugi tvrdi predmeti u okruženju. Tada i oni postaju izvori zvuka, samo što efikasnost njihovog zračenja zavisi od fizičkih karakteristika – elastičnosti materijala, debljine, to jest površinske mase, veličine, itd.



Slika VI.12 Prikaz oscilovanja prvih nekoliko rezonanci prednje i zadnje ploče violine

IZVEŠTAJ : GENERISANJE ZVUKA VIBRACIJAMA ČVRSTIH TELA

V1.1 VIZUELIZACIJA I ANALIZA SOPSTVENIH REZONANCI ŠTAPA

Izveštaj treba da sadrži:

1. Prikaz dugovremenog spektra signala snimljenog na površini štapa.
2. Tabelarni prikaz 10 izraženih sopstvenih rezonantnih frekvencija štapa
3. Prikaz prostorno-frekvencijske raspodele amplituda oscilacija na štapu (spektrogram)
4. Prikaz promena amplitude oscilovanja duž štapa na rezonantnim frekvencijama.

V1.2 ANALIZA I VIZUELIZACIJA SOPSTVENIH REZONANCI PLOČE

1. Prikazati tabelarno 15 sopstvenih rezonantnih frekvencija analizirane ploče i za dve frekvencije skicirati izgled *Chladni figure*

V1.3 PROCES GENERISANJA ZVUKA KOD MUZIČKIH INSTUMENATA

1. Opisati svojim rečima promenu u zvuku koji se čuje kada se pobuđivač prisloni na telo violine.
2. Opisati razlike koje se čuju kada se pobuđivač prisanja na različite tačke tela violine.

PITANJA ZA RAZMIŠLJANJE

1. Kako se može opisati raspodela amplituda oscilovanja duž štapa koji je pričvršćen na jednom kraju?
2. U čemu se razlikuje raspodela amplituda vibracija kod analiziranog štapa i kod žice muzičkog instrumenta?
3. Od kojih veličina zavise frekvencije sopstvenih rezonanci štapa?
4. U čemu je sličnost, a u čemu razlika procesa generisanja zvuka koja se javlja kod žičanih muzičkih istrumenata i procesa generisanja zvuka kretanjem membrane zvučnika?
5. Zašto se menja priroda zvuka kada se violina pobuđuje u različitim tačkama tela njenog rezonatora?

VEŽBA BROJ 2

OSNOVNA OBELEŽJA GOVORNOG SIGNALA

CILJ OVE VEŽBE JE DA SE STUDENTIMA prikažu fizičke karakteristike govora kao jedne specifične vrste zvuka. U okviru vežbe studenti koriste program Praat, koji je namenski napravljen za analizu govornih signala, a koji je slobodno dostupan na internetu. U vežbi se omogućava uvid u osobine glasa u vremenskom i frekvencijskom domenu. Analiziraju se izolovani glasovi i čitave rečenice, i to za ranije snimljen glas koji je pripremljen na računaru i sopstveni glas studenta koji se snima tokom vežbe.

TEORIJSKI UVOD

Zvučna energija glasova nastaje na dva načina: presecanjem vazdušne struje koja kreće iz pluća, što se ostvaruje glasnicama, i trubulencijama koje nastaju na nekom suženju duž putanje vazduha od pluća do otvora usta. Zvučni glasovi u govoru (na primer vokali) nastaju radom glasnica, a bezvučni glasovi trubulencijama. U ostalim glasovima ove dve vrste nastanka zvučne energije se kombinuju.

Signal zvučnih glasova ima harmonijsku strukturu spektra. U normalnom govoru njihova osnovna frekvencija je posledica prirodnog procesa oscilovanja glasnica. U govoru, pri opuštenim glasnicama osnovna frekvencija signala kod muškaraca je u opsegu 100 - 200 Hz, a kod ženskih glasova je 200 - 300 Hz. Na osnovnu frekvenciju njihovog oscilovanja moguće je uticati voljnim promenama mehaničkih osobina (zategnutost). To se događa, na primer, pri pevanju ili u običnom govoru kada rečenica ima neku melodiju ili izražene akcente. Tada se ostvaruje voljna kontrola osnovne frekvencije.

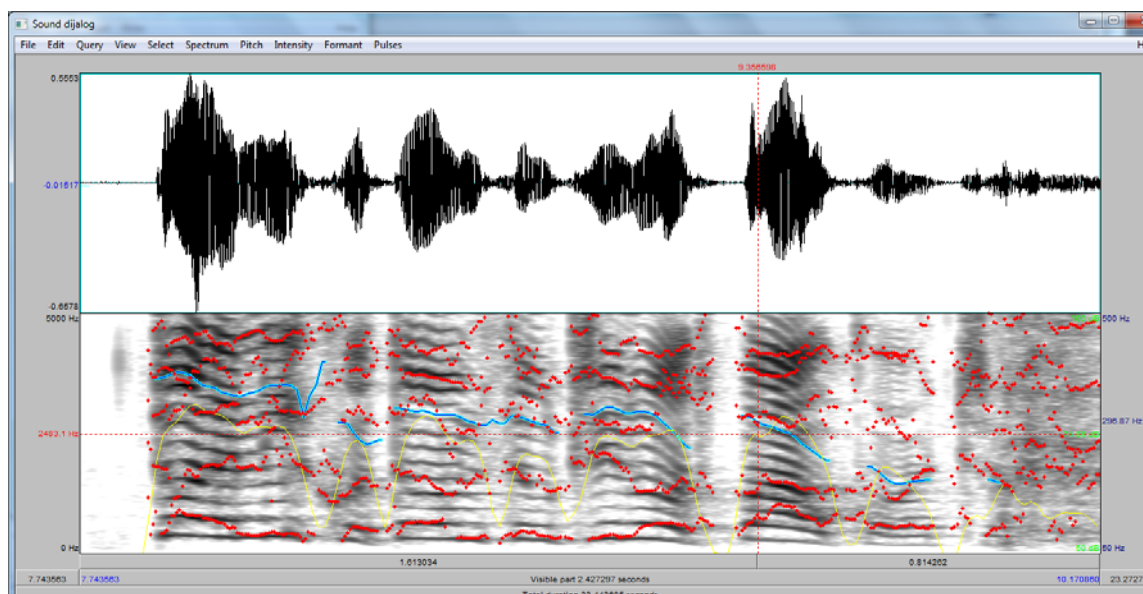
Od glasnica se nastavlja cev vokalnog trakta koja ima promenljivi presek, i zbog toga je njena frekvencijska karakteristika nelinearna. Ta nelinearnost se manifestuje izdizanjem signala u nekim frekvencijskim oblastima i potiskivanjem između njih. Istaknute oblasti u spektru glasa nazivaju se formanti, i oni se definišu svojom centralnom frekvencijom. Formantnu strukturu spektra imaju svi izgovoreni vokali, pri čemu svaki od njih ima svoju specifičnu raspodelu formanata duž frekvencijske ose. Ta razlika je osnov za perceptivne razlike među glasovima.

Bezvučni glasovi nastaju fizičkim suženjem na putu vazduha, koje se za glasove u govoru formira u zoni usta i zuba. Za razliku od vokala koji imaju harmonijsku strukturu, njihov zvuk ima sve osobine šuma. Karakteristični primeri su glasovi "S" ili "Š". Generisanje šuma moguće je i na samim glasnicama kada se one iz nekih voljnih ili nevoljnih razloga stegnu i ne osciluju, ali suze

prostor za prolazak vazduha. Voljno stezanje glasnica se, na primer, dešava pri šapatu. Nevoljno stezanje glasnica nastaje pri većoj promuklosti, kada se dominantno generiše šum kao osnovni signal glasa.

U analizi govora koristi se nekoliko načina predstavljanja njegovog sadržaja. Osnovni način praćenja promena sadržaja govornog signala u frekencijskom i vremenskom domenu je spektrogram (to je predstava u kojoj je na apscisnoj osi je vreme, a na ordinati frekvencija; intenzitet je kodovan nivoom zacrnenja). Centralne frekvencije formantata mogu se izdvajati posebnim algoritmima, na osnovu čega se prati njihovo kretanje u vremenu. Kao vremenski promenljiva veličina posmatra se i osnovna frekvencija glasa.

Na slici V2.1 prikazan je jedan standardni prikaz vremenskog oblika snimljenog signala, spektrogram, kao i konture intenziteta, osnovne frekvencije glasa, formatnih oblasti.



Slika V2.1 . Kompleksni prikaz jednog govornog signala: vremenski oblik (gornja polovina slike), spektrogram, konture osnovne učestanosti, intenziteta i konture prvih 5 formantnih oblasti (donja polovina slike).

V2.1 OPŠTE OSOBINE VOKALA

U ovoj vežbi treba napraviti spektrogram svih pet vokala koji se nalaze snimljeni u fajlu "Vokali". Vokali su snimljeni sledećim redosledom: "A, E, I, O, U". Uporediti osnovne osobine njihove strukture koje se mogu uočiti vizuelnom inspekcijom spektrograma.

Za snimljene vikale odrediti sledeće parametre:

- frekvencije tri najniža formanta za svaki vokal.
- osnovnu frekvenciju glasa u svim vokalima.

V2.2 ANALIZA SOPSTVENOG GLASA

Snimiti sopstveni glas u odgovarajućoj opciji PRAAT-a, i to izgovor svih vokala A, E, I, O, U. Vokale izgovarati više sekundi (tempom po uzoru na snimljeni fajl korišćen u prethodnom zadatku). Za snimljene vokale odrediti sledeće parametre:

- frekvencije najniža tri formanta za svaki vokal.
- osnovnu frekvenciju glasa u svim vokalima.

V2.3 ANALIZA SUGLASNIKA

Snimiti u nizu sledeće suglasnike: B P D T G K i analizirati njihov spektrogram.

Snimiti u nizu sledeće suglasnike: Z Ž S Š i analizirati njihov spektrogram.

Snimiti u nizu sledeće suglasnike V, R, L, J, M, N, NJ, LJ i analizirati njihov spektrogram

V2.4 ANALIZA KONTINUALNOG GOVORA

Snimiti jednu kratku rečenicu po sopstvenom izboru. Napraviti spektrogram izgovorene rečenice. U strukturi spektrograma uočiti granice između reči i sagledati globalne razlike koje postoje u osobinama pojedinih izgovoreni glasova. Posmatrati spektrogram za različite vrednosti dužine frejma u kome se vrši FFT analiza. Odrediti potrebnu vrednost dužine frejma koja obezbeđuje da se harmonijska struktura pojedinih glasova jasno vidi.

KRATKO UPUTSTVO ZA KORIŠĆENJE PROGRAMSKOG PAKETA PRAAT

Praat je programski paket pomoću koga se mogu vršiti sinteza, analiza i manipulacija govornog signala. Prilikom pokretanja Praat-a (duplim klikom sa desktopa ili na neki drugi način) otvaraju se dva prozora. Prvi je sa leve strane ekrana i zove se **Praat objects**, a drugi je s desne i zove se **Praat picture**. **Praat objects** zamisljen je kao radni prozor u kome se vrši manipulacija signalom i rezultatima analize, dok je **Praat picture** prilagodjen grafičkom prikazivanju rezultata i pomoću njega se dobijaju slike koje se mogu dalje koristiti u drugim

aplikacijama (u word-u i slično). U okviru ove vežbe prozor **Praat picture** se ne koristi i može se odmah po pokretanju programa zatvoriti.

Sa leve strane **Praat objects** prozora nalazi se lista objekata. Pod pojmom objekta podrazumevaju se fajlovi sa signalom koji se analizira ili sa drugim sadržajem. Svaki generisani rezultat iz programa smešta se u poseban fajl koji ima status objekta i njegov naziv se prikazuje u ovom prozoru.

Ime svakog od objekata sastoji se od dva dela: oznake vrste objekta (**Sound** za zvučni objekat, **Intensity** za intenzitetski, **Pitch** za osnovnu frekvenciju itd.) i ličnog imena koje se zadaje i koje se može menjati opcijom **Rename** (koja se nalazi u dnu **Praat objects** prozora).

Zvučni objekti, odnosno zvučni fajlovi, u Praat se uvoze na više načina. Jedan od načina je učitavanje već postojećeg zvučnog fajla. To se obavlja tako što se iz glavnog menija u prozoru **Praat objects** izabere opcija **Read**, a iz tog padajućeg menija opcija **Read from file**. Tada se pojavljuje standardni windows prozor u kome se obeležavanjem zvučnog fajla i klikom na Open željeni fajl dovlači u Praat objects prozor.

Drugi način učitavanja zvučnog fajla je snimanje. Ono se obavlja tako što se iz glavnog menija u **Praat objects** prozoru izabere opcija **New**, a iz njenog padajućeg menija jedna od opcija **Record mono sound** ili **Record stereo sound**. Posle ovoga pojaviće se novi prozor **SoundRecorder**. U njemu treba podesiti frekvenciju odabiranja (**Sampling frequency**). Klikom na polje **Record** započinje snimanje. Prilikom snimanja treba obratiti pažnju na nivo ulaznog signala. Crvenom bojom obeležena je situacija kada je došlo do klipovanja signala. Snimanje se završava klikom na polje **Stop**. Preslušavanje snimljenog signala se vrši klikom na polje **Play**.

Kada se zvučni fajl uveze u Praat i postavi na listu objekata, u prozoru Praat objects, na njegovoj desnoj strani pojavljuje se dinamički meni. Dinamički meni zavisi od vrste selektovanog objekta i pokazuje šta se sve može raditi sa selektovanim objektom.

Da bi se video vremenski i frekvencijski sadržaj nekog **sound** objekta, treba ga prvo selektovati, odnosno, obeležiti na listi objekata. Nakon toga treba kliknuti na polje **Edit** sa dinamičkog menija. Ovo dovode do otvaranja novog prozora koji se zove **Sound**, i u kome se pojavljuju jedan ispod drugog talasni oblik signala i njegov spektrogram.

Frekvencijska rezolucija spektrograma može se menjati tako što se u Sound prozoru selektuje sa glavnog menija **Spektrum**, a zatim se u padajućem meniju selektuje **Spektrogram settings**.

Objekti u kojima se smeštaju osnovna frekvencija glasa, intenzitet i formanti uobičajeno se formiraju pomoću dinamičkog menija (moguće je i na drugi način koji je objašnjen u dodatku).

Pitch objekat se formira tako što se najpre selektuje **Sound objekat** (na osnovu kog se formira **pitch** objekat), zatim se iz dinamičkog menija izabere opcija **Periodicity**. Iz dobijenog

padajućeg menija selektuje bilo koja To **pitch** opcija (opcije se razlikuju po algoritmu kojim je *pitch* računat, preporučuje se autokorelaciona metoda - ac). Kao posledica, otvara se prozor koji omogućava podešavanja parametara **pitch** analize koji izlaze iz okvira ovog uputstva (standardna podešavanja ne treba menjati, već ih treba prihvatiti klikom na OK). Rezultat ove akcije je pojavljivanje **Pitch** objekta u listi objekata koji nosi isto ime kao i Sound objekat na osnovu kojeg je formiran.

Spectrum objekat formira se tako što se prvo selektuje **Sound objekat** (na osnovu kog se formira **spectrum objekat**), zatim se iz dinamičkog menija izabere opcija **Spectrum** i iz dobijenog padajućeg menija selektuje se bilo koja To spectrum opcija (opcije se razlikuju samo po algoritmu kojim je spektar računat, najčešće je to FFT metoda). Rezultat ovih akcija je pojavljivanje **Spectrum objekta** u listi objekata koji nosi isto ime kao i **Sound objekat** na osnovu kojeg je formiran.

Formant objekat formira se tako što se najpre selektuje **Sound objekat** (na osnovu kog se formira formant objekat), zatim se iz dinamičkog menija izabere opcija **Formants \$ LPC** i iz dobijenog padajućeg menija selektuje se bilo koja To formant opcija (opcije se razlikuju samo po algoritmu kojim su formanti računati, preporučuje se burg). Rezultat ovih akcija je pojavljivanje **Formant** objekta u listi objekata koji nosi isto ime kao i **Sound objekat** na osnovu kojeg je formiran.

Intensity objekat formira se tako što se najpre selektuje **Sound objekat** (na osnovu kog se formira intensity objekat), zatim se iz dinamičkog menija izabere opcija **To intensity**. Rezultat ovih akcija je pojavljivanje **Intensity** objekta u listi objekata koji nosi isto ime kao i **Sound objekat** na osnovu kojeg je formiran.

Svaki od objekata može se grafički predstaviti u **Praat picture** prozoru tako što se najpre selektuje željeni objekat, a zatim se iz njegovog dinamičkog menija izabere opcija **Draw**. Iz dobijenog padajućeg menija odabere se željeni oblik grafičke predstave. Najbolje grafičke predstave dobijaju se selekcijom prve opcije padajućeg menija i zadržavanjem standardnih podešavanja. Treba obratiti posebnu pažnju na to da se u **Praat picture** prozoru mora otvoriti nova oblast za iscrtavanje pre svakog izadavanja naredbe za crtanje. Oblast za crtanje formira se jednostavnim povlačenjem miša po radnom delu **Praat picture** prozora.

Pitch konturu moguće je iscrtati ukoliko se nakon editovanja **Sound objekta** u prozoru **Sound** iz glavnog menija izabere opcija **Pitch**, i iz prikazanog padajućeg menija selektuje opcija **Show pitch**. Pitch kontura će se iscrtati preko spektrograma plavom bojom. Inspekcija Pitch konture vrši se pozicioniranjem i klikom miša na željeno mesto što dovodi do ispisivanja vrednosti pitch-a plavom bojom sa desne strane slike. Ukoliko je miš pozicioniran van pitch konture iscrtane plavom bojom, sa desne strane ipak će biti ispisana vrednost pitch-a u tom trenutku.

Intenzitetska kontura formira se tako što se posle editovanja **Sound objekta** u prozoru **Sound** iz glavnog menija izabere opcija **Intensity** i iz prikazanog padajućeg menija selektuje opcija

Show intensity. Intenzitetska kontura će se iscrtati preko spektrograma žutom bojom. Inspekcija **Intensity** konture vrši se pozicioniranjem i klikom miša na željeno mesto, što dovodi do ispisivanja vrednosti intenziteta (u decibelima) zelenom bojom sa desne strane slike. Ukoliko je miš pozicioniran van intenzitetske konture iscrtane žutom bojom, sa desne strane ipak će biti ispisana vrednost intenziteta u tom trenutku.

Graficki prikaz formanata formira se tako što se posle editovanja sound objekta u prozoru **Sound** iz glavnog menija izabere opcija **Formant** i iz prikazanog padajućeg menija selektuje opcija **Show formants**. Slika formanata će se iscrtati preko spektrograma crvenom bojom.

Ukoliko se u **Sound** prozoru iz glavnog menija izabere opcija **Spectrum** i zatim iz padajućeg menija izabere **View spectral slice**, otvoriće se novi prozor **Spectrum slice** u kome će biti prikazan frekvencijski spektar koji odgovara trenutku u vremenu na koji je miš pozicioniran u prozoru **Sound** ili, ukoliko je obeležen neki segment signala, prosečan spektar za ceo obeleženi deo. Paralelno sa otvaranjem **Spectrum slice** prozora, u listu objekata upisaće se i **Spectrum slice** objekat.

IZVEŠTAJ : OSNOVNA OBELEŽJA GOVORNOG SIGNALA

V2.1 OPŠTE OSOBINE VOKALA

Izveštaj o analizi snimljenih vokala treba da sadrži:

5. Tabelarni prikaz osnovnih frekvencija za snimljene vokale A, E, I, O, U.
6. Tabelarni prikaz prve tri formantne frekvencije za izgovorene vokale A, E, I, O, U.
7. Prikaz spektrograma i vremenskog oblika izgovorenih glasova sa prikazanim kontuarama osnovne frekvencije, intenziteta i formatnih oblasti.

V2.2 ANALIZA SOPSTVENOG GLASA

Izveštaj o analizi snimljenih vokala sopstvenog glasa treba da sadrži:

1. Tabelarni prikaz osnovnih frekvencija za snimljene vokale A, E, I, O, U.
2. Tabelarni prikaz prve tri formantne frekvencije za izgovorene vokale A, E, I, O, U.
3. Prikaz spektrograma i vremenskog oblika izgovorenih glasova sa prikazanim kontuarama osnovne frekvencije, intenziteta i formatnih oblasti.

V2.3 ANALIZA SUGLASNIKA

1. Prikazati spektrogram snimljenih suglasnika: B P D T G K
2. Prikazati spektrogram snimljenih suglasnika: Z Ž S Š
3. Prikazati spektrogram snimljenih suglasnika: V, R, L, J, M, N, NJ, LJ

V2.3 ANALIZA KONTINUALNOG GOVORA

Prikazati spektrogram snimljene rečenice. Na spektrogramu prikazati promenu intenziteta glasova kao i konturu osnovne frekvencije i formantnih oblasti.

PITANJA ZA RAZMIŠLJANJE

6. Objasniti u čemu se razlikuju spektri zvučnih i bezvučnih glasova.
7. Koji glasovi nose najveću energiju.

VEŽBA BROJ 3

SUPERPONIRANJE ZVUČNIH TALASA – EFEKAT “KOMB” FILTRA

Ova laboratorijska vežba ima zadatak da studentima demonstrira pojavu "komb" filtra koji u realnosti nastaje superponiranjem direktnog zvuka i jake refleksije. U vežbi se posmatra efekat superponiranja refleksije sa direktnim zvukom u različim slučajevima koji podrazumevaju različitu putnu i vremensku razliku između superponiranih komponenti, pri čemu refleksija nastaje reflektovanjem od površine koja može imati različit koeficijent apsorpcije. Uticaj svakog parametara koji opisuje jedan sistem za prenos analizira se na softverskoj platformi, a realni efekat superponiranja se analizira merenjem.

TEORIJSKI UVOD

Pojava jake refleksije koja kasni u odnosu na direktan zvuk generiše jednu karakterističnu fizičku pojavu koja je označena kao koherentno superponiranje, a koja proizilazi iz talasne prirode zvuka. Ona je posledica činjenice da zbog putne razlike između spektralnih komponenta zvukova koji se superponiraju postoji razlika u fazama. U zavisnosti od međusobnih faznih stavova i odnosa amplituda spektralnih komponenti rezultat superponiranja je promena u spektru signala. Ekvivalentna pojava u elektrotehnici se naziva češljasti ili "komb" filter, pa se taj pojam koristi i u akustičkom domenu.

Na slici V3.1. šematski je prikazan jedan uobičajen slučaj nastanka češljastog filtra usled superponiranja direktnog zvučnog talasa i jednog talasa reflektovanog od tla. Principijelna blok šema takvog događaja prikazana je na slici V3.2. U zavisnosti od toga koliki je vremenski pomak Δt između direktne i reflektovane komponente, u signalu dolazi do superponiranja čiji rezultat po spektralnim komponentama može biti od poništavanja do sabiranja amplituda.

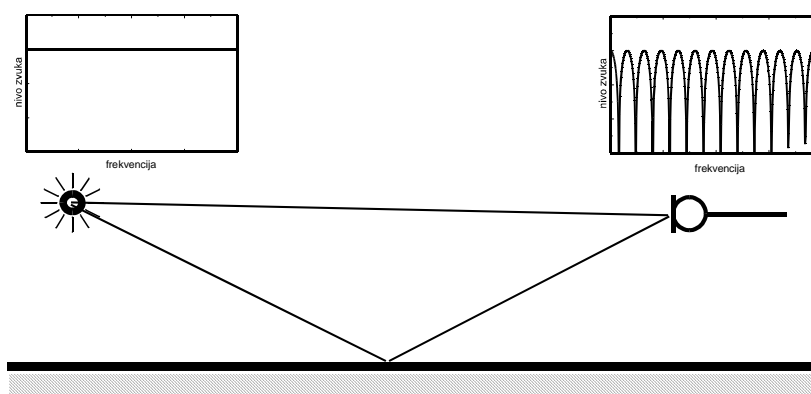
Zbog konačnosti brzine prostiranja zvuka, duža putanja koju prelazi refleksija u odnosu na direktan zvuk prouzrokuje konstantno kašnjenje refleksije Δt :

$$\Delta t = \frac{\Delta r}{c} = \frac{r_R - r_D}{c}$$

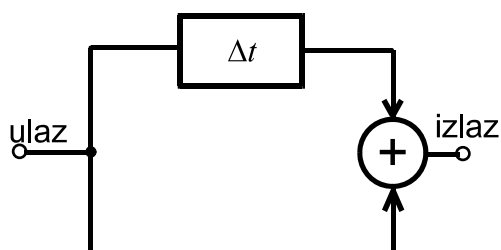
gde je c brzina prostiranja zvuka, a Δr putna razlika direktnog i reflektovanog talasa. Na mestu prijema postoji njihova frekvencijski zavisna fazna razlika $\Delta\varphi$ koja određuje rezultat superponiranja:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = 2\pi \Delta t f = \omega \Delta t$$

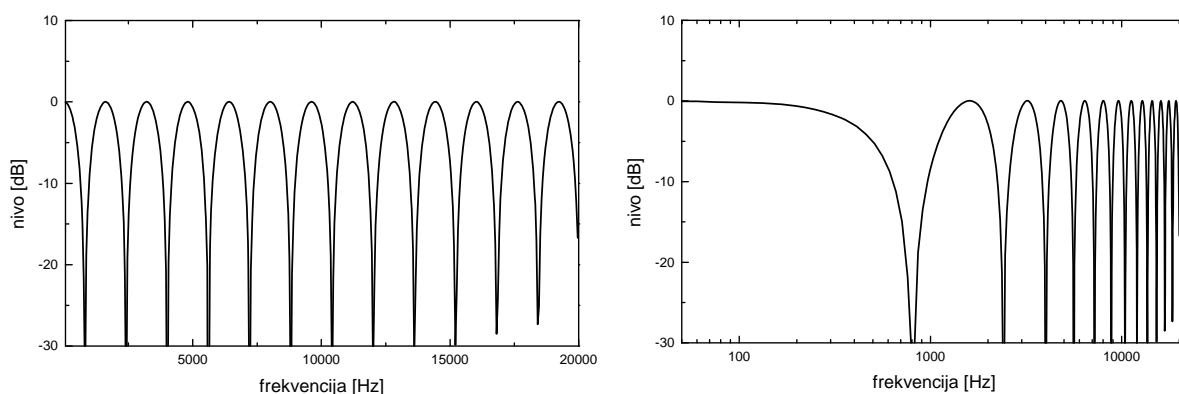
Vidi se da će se na svim frekvencijama na kojima je putna razlika između reflektovanog i direktnog talasa neparni umnožak polovine talasne dužine pojavljivati slabljenje usled protivfaznog sabiranja. S obzirom da reflektovan talas prelazi duži put i eventualno gubi deo energije pri refleksiji, to slabljenje u praksi nikada nije potpuno poništavanje. Na frekvencijama na kojima je putna razlika celobrojni umnožak talasne dužine (odnosno parni umnožak polovine talasne dužine) dolazi do sabiranja jer su tada dva talasa u fazi. Kao ukupni rezultat, spektar zvuka nakon superponiranja sa svojom refleksijom postaje izmenjen formom koju definiše češljasti filter. Da bi se detaljnije kvantifikovao efekat takvog filtra, na slici V3.3 je prikazana njegova rezultatna frekvencijska karakteristika u okolnostima kada je relativno kašnjenje refleksije $\Delta t = 1,25$ ms.



Slika V3.1 - Pojava superponiranja direktnog talasa sa jakom refleksijom, što kao rezultat na mikrofону daje promenu spektralnog sadržaja zvuka ("komb" filter).



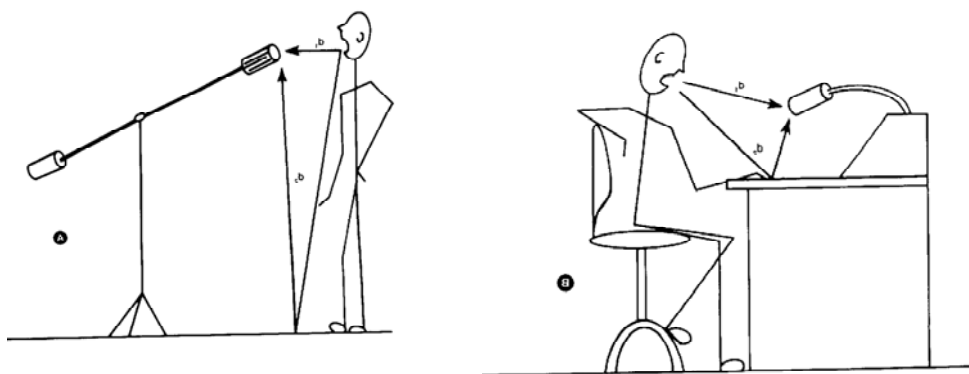
Slika V3.2 - Principijelna blok šema nastanka češljastog ("komb") filtra



Slika V3.3 - Frekvencijska karakteristika komb filtra sa slike 1 za kašnjenje Δt od 1,25 ms, prikazan u dve različite razmere duž frekvencijske ose: linearna razmera (levo) i logaritamska razmera (desno)

Pri prostiranju duž obe postojeće putanje zvuka postoji slabljenje prema zakonu širenja talasnog fronta koje je srazmerno dužini putanje. Sam proces refleksije u opštem slučaju podrazumeva promenu u akustičkom signalu. Reflektovani talas uvek ima i dodatnu promenu koje se pojavljuje u samom procesu refleksije i koja se modeluje funkcijom prenosa refleksije $\alpha(\omega)$. U opštem slučaju ova prenosna funkcija ima realni i imaginarni deo, pri čemu njen realni deo modeluje disipaciju, to jest apsorpciju u materijalu kojim je površina pokrivena. Pri refleksiji od tvrdih površina imaginarni deo se može zanemariti, pa je ova funkcija prenosa realna, što znači da se pri refleksiji javljaju samo energetske gubici. Vrednost funkcije prenosa refleksije je frekvencijski zavisna u prvom redu zbog toga što apsorpciona svojstva materijala zavise od frekvencije.

Neke realne situacije u kojima može doći do pojave komb filtra prikazane su na slici V3.4.



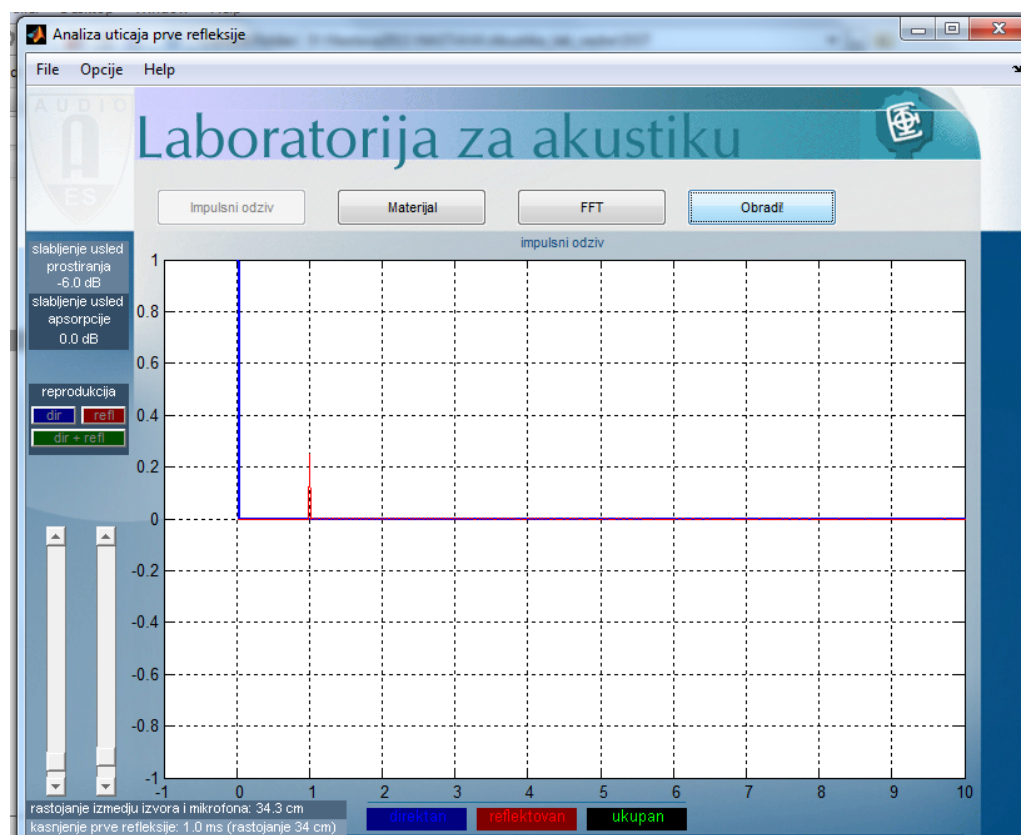
Slika V3.4. Različite situacije u kojima u relanim okolnostima dolazi do formiranja komb filtra u akustičkom domenu

V3.1 SOFTVERSKA ANALIZA SUPERPONIRANJA

U ovoj vežbi se analizira uticaj različitih parametara na funkciju prenosa akustičkog sistema u kome se superponiraju direktan zvuk i jedna refleksija. Analiza se vrši korišćenjem programa **leavio.m**. Potrebno je analizirati uticaj sledećih parametara:

- kašnjenje direktnog zvuka,
- kašnjenje reflektovanog zvuka,
- apsolutna i relativna razlika ova dva kašnjenja,
- apsorpciona karakteristika refleksione ravni.

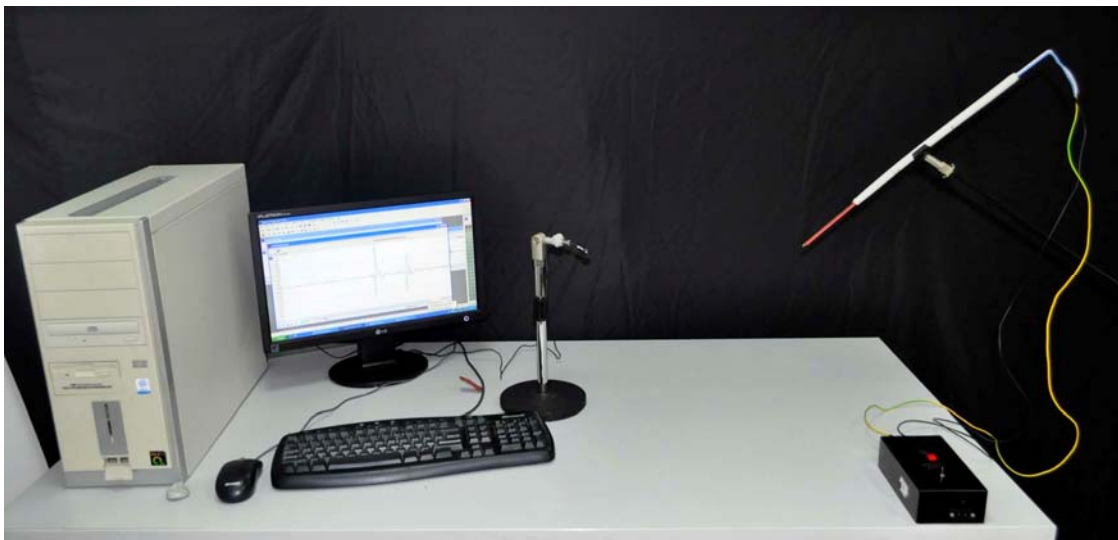
Funkcija prenosa akustičkog sistema sa refleksijom karakteriše se pozicijom lokalnih minimuma i maksimuma, kao i odnosom amplitude u minimumu i maksimumu funkcije. Posmatrati kako navedeni parametri utiču na poziciju lokalnih minimuma i maksimuma i na amplitudske varijacije frekvencijske karakteristike. Slika V3.5 prikazuje početni prozor programa koji pruža mogućnost analize svih bitnih parametara direktnog zvuka i refleksije u formiranju efekta "komb" filtra: kašnjenja direktnog zvuka, refleksije i apsorpcione karakteristike podloge koja daje refleksiju.



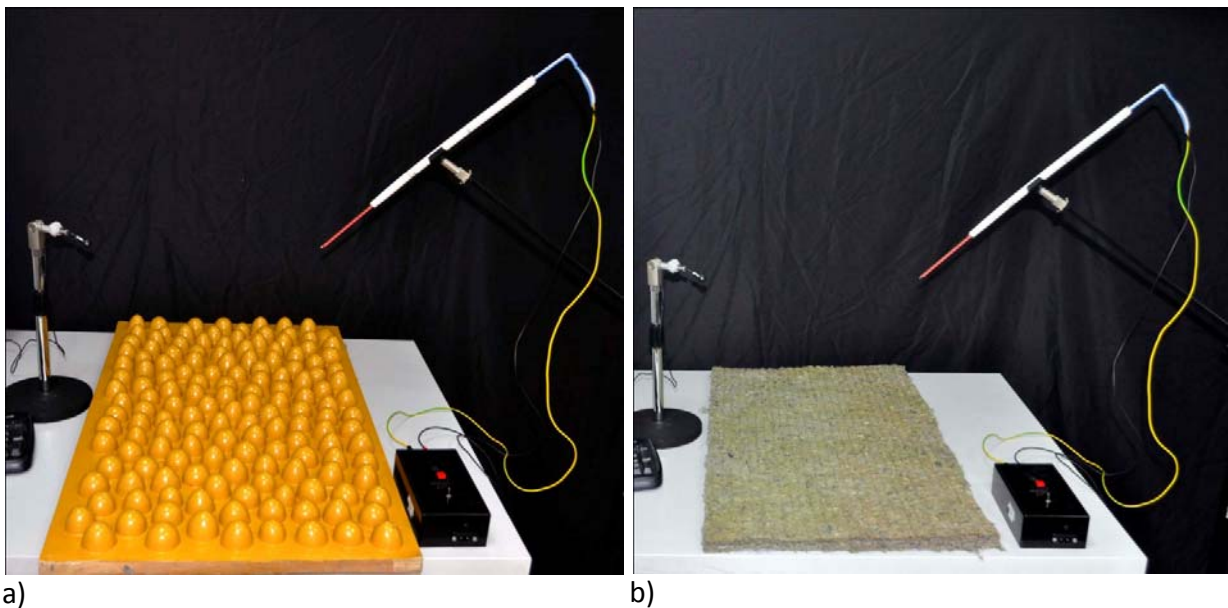
Slika V3.5 Slika ekrana programa koji se koristi za softversku demonstraciju efekta „komb“ filtra

V3.2 ANALIZA EFEKTA „KOMB“ FILTRA U REALNIM OKOLNOSTIMA

Analiza efekta superponiranja direktnog i reflektovanog talasa zavisi od geometrijskih i apsorpcionih karakteristika podloge koja daje refleksiju. U okviru ove vežbe analizira se uticaj vrste podloge na ukupnu frekvencijsku karakteristiku sistema. Na slici V3.6 prikazana je merna postavka za snimanje odziva sistema koji se sastoji od direktnog zvuka i jedne refleksije. Sa slike se vidi da se merenje ne vrši u anehoičnim uslovima, zbog čega se zahteva obrada snimljenog odziva i odsecanje prvih 10 ms impulsnog odziva nakon direktnog zvuka, u kojima se očekuje stizanje prve refleksije. Na slikama V3.7a i V3.7b prikazane su difuzna površina i apsorpciona površina respektivno.



Slika V3.6 Merna postavka za merenje impulsnog i frekvencijskog odziva sistema koji se sastoji od direktnog i reflektovanog zvuka.

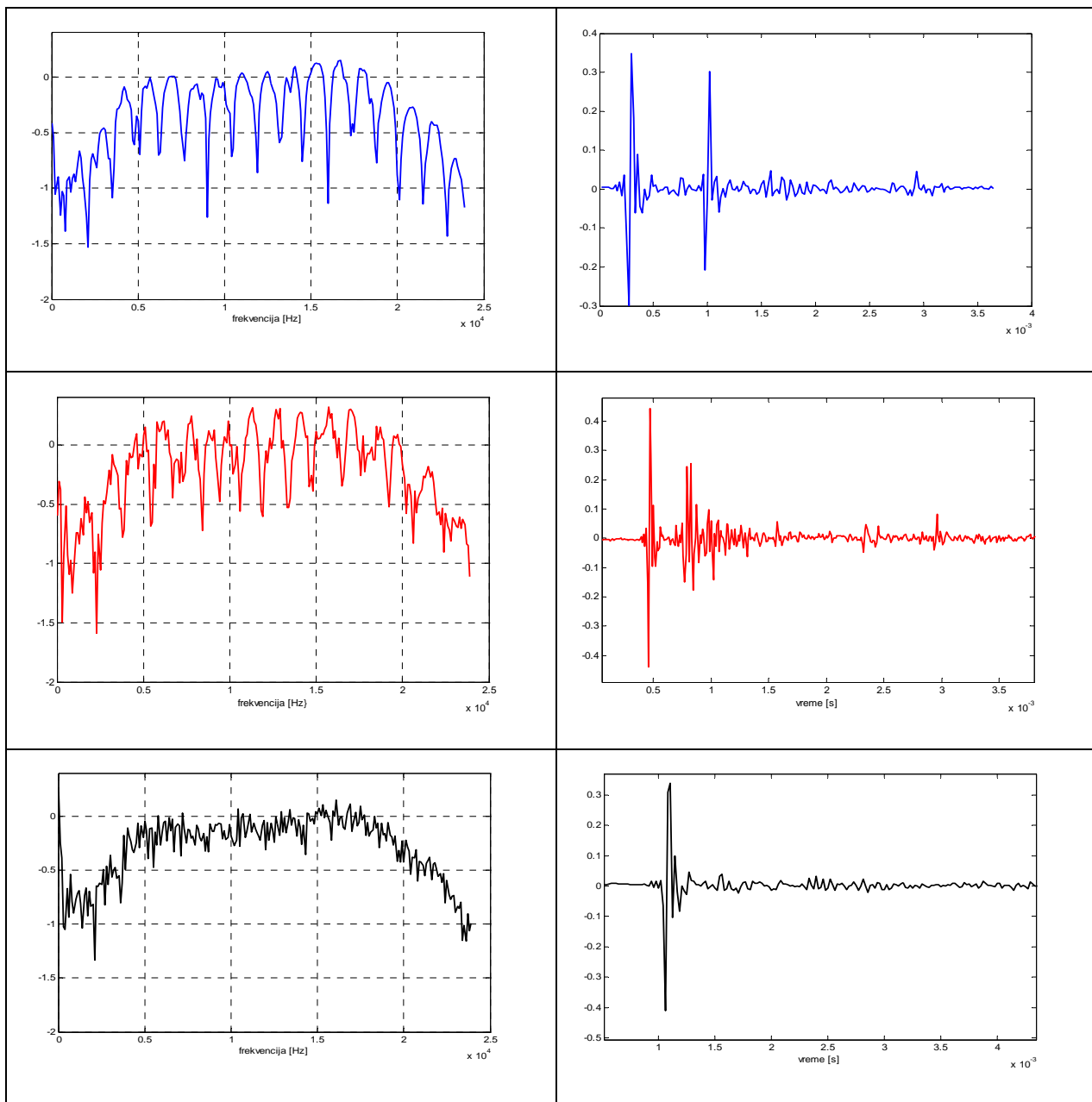


a)

b)

Slika V3.7. Refleksione površine koje se koriste u vežbi: a) difuzna b) apsorpciona.

Kao izvor pobudnog signala koristi se električni varničar koji daje dovoljno jak i kratak impuls, i koji može da posluži za merenje impulsnog odziva ovakvog sistema. Signal iz mikrofona se snima (može se koristiti program **Sound forge** ili se snimanje može vršiti direktno iz **MATLAB** programa), nakon čega se vrši analiza snimljenih signala u vremenskom i frekvencijskom domenu.



Slika V3.8 Frekvencijske karakteristike i impulсни odzivi sistema u kojima je prisutna refleksija od ravne površine (najgornja slika), difuzne površine (srednji red) i absorpcione površine (donji red)

Na slici V3.8 prikazan je izgled funkcije prenosa sistema u kome je na direktan zvuk superponirana najpre refleksija koja se dobija od potpuno ravne površine, zatim od površine pokrivena difuznim

elementima i najzad od površine na kojoj se nalazi sloj apsorpcionog materijala. U levoj koloni na slici prekazane su frekvencijske karakteristike, a u desnoj koloni vremenski izgledi impulsnih odziva ovih sistema.

U slučaju refleksije od potpuno ravne površine, nakon direktnog zvuka u strukturi impulsnog odziva jasno je vidljiva refleksija istog oblika i malo oslabljena zbog razlike u pređenim putevima i apsorpcije površine. Kao posledica prisustva jake refleksije u frekvencijskoj karakteristici jasno je izražen komb filter efekat. U slučaju kada se refleksija dobija od reljefne površine (u ovom slučaju reljef je dimenzija takvih da tek na višim frekvencijama on ispoljava svoja difuzna svojstva) reflektovana energija ne dolazi u jednom trenutku već je razvučena u vremenu. To utiče da efekat komb filtra bude manje izražen. Kada se u zonu od koje se javlja refleksija postavi apsorpcioni materijal reflektovana energija postaje potisnuta i efekat „komb“ filtra nije vidljiv u frekvencijoj karakteristici.

IZVEŠTAJ : SUPERPONIRANJE ZVUČNIH TALASA – EFEKAT “KOMB” FILTRA

V3.1 SOFTVERSKA ANALIZA SUPERPONIRANJA

Izveštaj treba da sadrži:

8. Prikaz frekvencijske karakteristike sistema u kome dolazi do superponiranja direktnog i reflektovanog zvuka u sledeća dva slučaja:
 - a. direktan zvuk u posmatranu tačku stiže 2 ms nakon emitovanja,
 - b. direktan zvuk u posmatranu tačku stiže 100 ms nakon emitovanja;
9. Prikaz frekvencijske karakteristike kada refleksija nastaje od podloge čiji je koeficijent apsorpcije dat kao α , pri istim parametrima direktnog i reflektovanog zvuka;
10. Prikaz frekvencijske karakteristike akustičkog sistema za prenos koji nastaje superponiranjem direktnog i reflektovanog zvuka, ako direktan zvuk stiže do slušaoca 10 ms pre reflektovanog zvuka, a rastojanje izvora zvuka i prijemne tačke je 10.2 m.
11. Prikaz razlika u frekvencijskoj karakteristici sistema za slučaj superponiranja direktnog zvuka i jedne refleksije koja kasni u odnosu na njega 10 ms. Proračun sprovesti za dva slučaja:
 - a. ako je rastojanje izvora zvuka i tačke prijema 34 m,
 - b. ako je rastojanje izvora zvuka i tačke prijema 3.4 m.

V3.2 ANALIZA „KOMB“ FILTER EFEKTA NA REALNIM POVRŠINAMA

Izveštaj treba da sadrži:

2. Prikaz u vremenskom i frekvencijskom domenu prvih 10 ms signala nakon stizanja direktnog zvuka u tri slučaja: kada refleksija nastaje od ravne, difuzne i apsorpcione površine.

PITANJA ZA RAZMIŠLJANJE

1. U čemu se razlikuju efekti reflektovanog zvuka koji stiže nakon 1 ms i 100 ms sa aspekta njihove moguće percepcije?
2. Kakav sve može biti efekat kvaliteta površine gde javlja refleksija na odziv u vremenskom i frekvencijskom domenu?
3. Objasniti fizičke efekte koji se mogu prepoznati u obliku impulsnog odziva pri refleksiji od površine sa apsorpcionim materijalom.

VEŽBA BROJ 4

PSIHOAKUSTIKA – ČULO SLUHA

Ova vežba ima zadatak da prikaže tri važne osobine čula sluha: frekvencijsku nelinearnost njegove osetljivosti, frekvencijsko maskiranje i lokalizaciju zvučnog izvora u prostoru. Vežba se sastoji iz tri dela. U prvom delu vežbe studenti snimaju jednu izofonsku krivu svoga uva pomoću namenski napravljenog softvera. Drugi deo predstavlja jednu auditornu demonstraciju u kojoj se prikazuje realnost postojanja pojave maskiranja i asimetričnost oblika krive maskiranja. U trećem delu vežbe ispituje se sposobnost čula sluha da odredi pravac i udaljenost zvučnog izvora. Ovaj deo vežbe je baziran na ranije snimljenim funkcijama prenosa glave za različite uglove incidencije i različite udaljenosti zvučnog izvora.

TEORIJSKI UVOD

U akustici se zvuk ne posmatra samo kao fizička pojava nezavisna od čoveka kao korisnika zvučnih informacija. Mnoge tehnike koje se primenjuju za merenje i analizu zvuka, kao i objektivni parametri kojim se opisuje stanje u zvučnom polju, imaju u sebi na neki način ugrađen pojednostavljen model funkcionisanja čula sluha. Tako se u objektivnim mernim procedurama oponaša način na koji uvo obrađuje zvučne informacije i prosleđuje ih drugom delu čula sluha u moždanim centrima gde se formira zvučna slika. Pri tome, u mnogim okolnostima uzima se u obzir značaj koji zvuk ima za čoveka kao njegovog osnovnog načina komunikacije i kao alatke koja mu služi da se kreće i orijentiše u prostoru.

Osnovne osobine čula sluha proizilaze iz činjenice da ga čine dva prostorno razvojena senzora između kojih se nalazi glava kao prepreka. Takva konfiguracija senzora omogućava lociranje izvora zvuka u prostoru kao i doživljaj samog prostora koji utiče na zvučno polje. Način na koji svaki pojedinačni sensor radi, odnosno mehanizam kojim se mehaničke vibracije čestica vazduha prenose preko oscilovanja bubne opne do generisanja nervih impulsa karakterišu različiti nelinearni procesi.

Percepcija zvučnih informacija složen je proces i integriše više različitih procesa obrade jačine zvuka, spektralnog sadržaja, analize prisustva refleksija, i na kraju kognitivne familijarnosti. Zato je u eksperimentalnim uslovima veoma teško držati pod kontrolom sve faktore koji u prirodnim uslovima utiču na percepciju određenih informacija o zvučnom polju ili o izvorima zvuka.

NELINEARNOST OSETLJIVOSTI ČULA SLUHA

Proces percepcije zvuka odlikuje više oblika nelinearnog preslikavanja iz objektivnog u subjektivni domen. Jedan od tih je subjektivni doživljaj jačine zvuka. Čovek doživljava promenu intenziteta zvuka srazmerno njegovoj procentualnoj, a ne apsolutnoj promeni. Na primer, kada zvučni pritisak od 100 mPa poraste na 200 mPa (povećanje dva puta) naše čulo sluha će tu promenu da preslika u doživljaj promene jačine koji je isti kao kada se promeni sa 1 Pa na 2 Pa (takođe povećanje dva puta). Kao posledica ove osobine čula uvedeno je skala nivoa zvuka koja se izražava u decibelima. Međutim, ni skala u decibelima ne odražava u potpunosti način subjektivne percepcije jačine, zato što osetljivost čula sluha spoljava i frekvencijsku nelinearnost. Zbog toga i frekvencijski sadržaj signala utiče ne subjektivni doživljaj jačine zvuka.

Kada na uvo deluje čist sinusni ton, subjektivni doživljaj jačine zvuka ispoljava frekvencijsku nelinearnost. Subjektivni doživljaj jačine takvog zvuka izražava se nivoom subjektivne jačina zvuka (*loudnes level*). Češće se koristi skraćeni naziv subjektivna jačina zvuka, ili samo jačina zvuka. Za njeno izražavanje u literaturi se najčešće koristi oznaka Λ ili LN, i uvedena je jedinica koja se naziva fon.

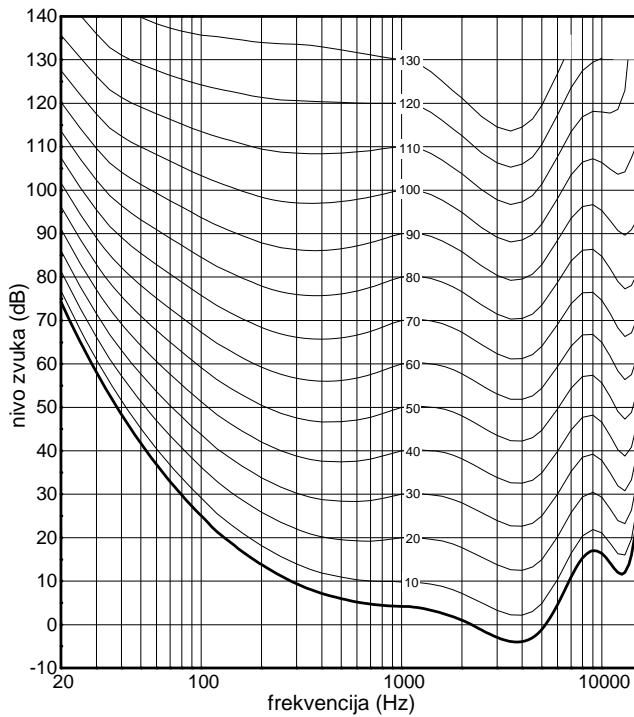
Osetljivost čula sluha na pobudu sinusnim tonovima utvrđena je eksperimentalno. Konvencijom je usvojeno da se na frekvenciji 1000 Hz skala nivoa subjektivne jačine zvuka u fonima poklapa sa skalom objektivno merenog nivoa zvučnog pritiska u decibelima. Za tonove čije su frekvencije niže ili više od 1000 Hz podaci o njihovoj subjektivnoj jačini utvrđeni su slušanjem i subjektivnim ocenjivanjem. To se realizuje poređenjem naizmenično reprodukovana dva zvuka različitih frekvencija: jednog koji je predmet ocene subjektivne jačine i drugog, referentnog, na frekvenciji 1000 Hz. Cilj takvog testa je da slušalac podesi nivo tona koji je predmet ocene tako da bude subjektivno iste jačine kao referentni ton, što znači da odgovaraju istom broju fona.

Sukcesivnim ponavljanjem ove procedure za razne frekvencije i očitavanjem podešenog nivoa zvuka, u dijagramu oblasti čujnosti dobija se linija iste subjektivne jačine, takozvana izofonska linija. Sve vrednosti koje se nalaze na jednoj tako dobijenoj izofonskoj liniji imaju subjektivno istu jačinu zvuka, jednaku onoj na 1000 Hz. Takvim postupkom dobijene su izofonske krive prikazane na slici V4.1. Na dijagramu su ucrtane krive u koracima od po 10 fona. Vidi se da granica čujnosti predstavlja izofonsku krivu koja odgovara subjektivnoj jačini 0 fona.

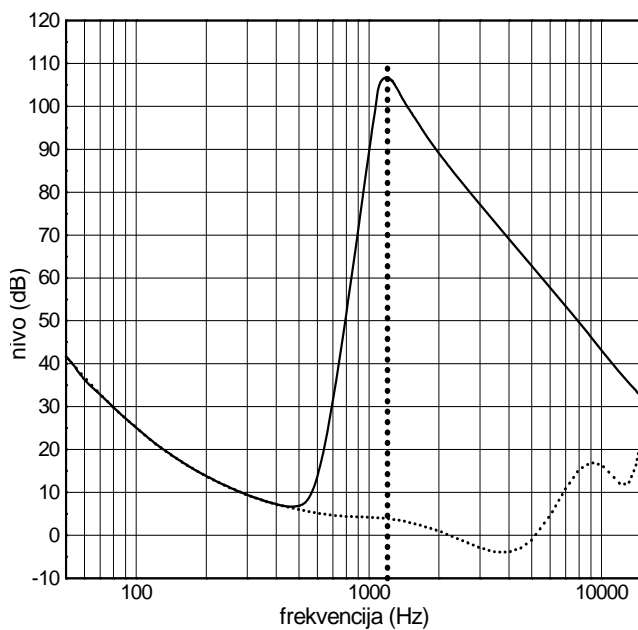
FREKVENCIJSKO MASKIRANJE

Jedna od važnih osobina čula sluha je maskiranje. Frekvencijsko maskiranje podrazumeva pojavu da u prisustvu zvuka na nekoj frekvenciji oko nje postoji šira oblast na frekvencijskoj osi u kojoj novi zvukovi ne mogu pobuditi senzore u uvu ako im je intenzitet manji od nekog praga koji diktira prisutan zvuk. Pojava se kvantifikuje krivom maskiranja čiji je oblik za jednu frekvenciju maskiranja

prikazan na slici V4.2 (za slučaj delovanja sinusnog tona frekvencije 1200 Hz i nivoa 110 dB). Maskiranje znači da u prisustvu pobude ovakvim tonom uvo privremeno ne može registrovati zvukove koji se nalaze ispod ucrtane krive nazvane granica maskiranja za datu pobudu, jer bazilarna membrana u toj zoni frekvencija već osciluje nekim intenzitetom.



Slika V4.1 Dijagram izofonskih krivih

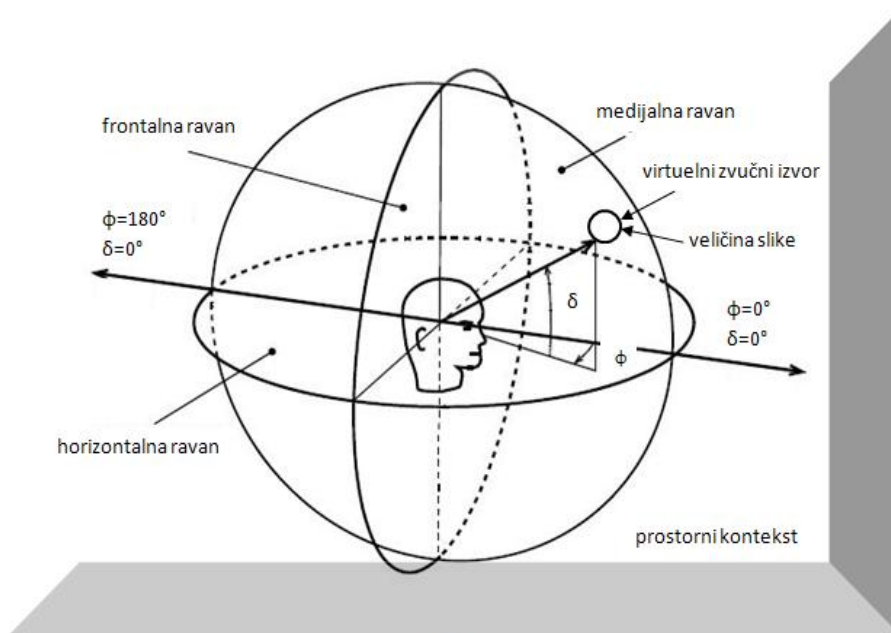


Slika V4.2 - Kriva maskiranja u prisustvu maskirajućeg zvuka nivoa 110 dB frekvencije 1200 Hz

Kao što se vidi sa slike V4.2, kriva maskiranja nije simetrična u odnosu na položaj frekvencije maskirajućeg tona. Ona je šira prema visokim frekvencijama nego prema niskim. Oblik krive maskiranja u izvesnoj meri se menja u zavisnosti od frekvencije maskirajućeg tona i njegovog intenziteta, ali uvek zadržava asimetrični izgled kakav je prikazan na slici. Pojava frekvencijskog maskiranja može se shvatiti kao specifična deformacija granice čujnosti, jer je to privremeno pomeranje granice čujnosti naviše u zoni oko pobudne frekvencije.

LOKALIZACIJA IZVORA ZVUKA U PROSTORU

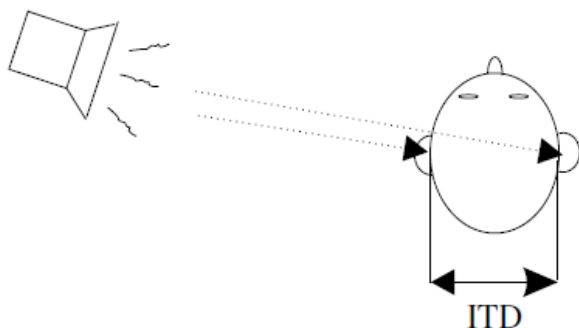
Sposobnost čula sluha da odredi poziciju izvora zvuka u 3D prostoru zasnovan je na korišćenju dva uva kao senzora zvuka koji su prostorno razmaknuti, i sa glavom kao preprekom između njih. To je označeno kao binauralno slušanje. Zahvaljujuci binauralnom slušanju čulo sluha ima sposobnost određivanja pravca iz kojeg zvučni talas nailazi. U trodimenzionalnom prostoru može se definisati pravac nailaska zvučnog talasa na glavu slušaoca. Da bi se odredile prostorne dimenzije percepcije zvuka uvodi se koordinatni sistem glave, kao na slici V4.3. Definiše se horizontalna, medijalna i frontalna ravan slušaoca, a svi mogući pravci i smerovi nailaska talasa na glavu slušaoca određeni su azimutom ϕ i elevacijom δ .



Slika V4.3 Koordinatni sistem glave slušaoca

Prostorna razdvojenost i glava kao prepreka čine da su signali koji deluju na levo i desno uvo različiti. Njihove razlike su intenzitetske, vremenske i spektralne. Signali su jednaki samo ako zvučni talas nailazi na slušaoca u medijalnoj ravni ($\delta=0$). Na frekvencijama na kojima je glava dovoljno velika u odnosu na talasnu dužinu javljaju se pojave refleksije i difrakcije. Na višim frekvencijama, to jest malim talasnim dužinama, i ušna školjka takođe utiče kao prepreka na zvučni pritisak koji postoji na ulazu u slušni kanal. Osim glave i ušne školjke, i torzo ima uticaja na strukturu zvučnog polja, najviše zbog refleksija od ramena. Sve to doprinosi razlikama između signala na levom i desnom uvu, na osnovu kojih centri u mozgu određuju pravac nailaska zvučnog talasa.

U zavisnosti od pravca nailaska zvučnog talasa na glavu slušaoca uvode se pojmovi bližeg i daljeg uva. Vremenske razlike signala bližeg i daljeg uva nazivaju se interauralno kašnjenje (*ITD-Interaural Time Difference*) ilustrovano na slici V4.4. Ukoliko azimut nije jednak nuli, zvuk ranije stiže do bližeg uva. Interauralno kašnjenje je najveće za azimut 90° , i za prosečne dimenzije glave ono je oko 0,6 ms. Ako je frekvencija takva da je trajanje periode veće od interauralnog kašnjenja, fazna razlika signala na levom i desnom uvu predstavlja informaciju na osnovu koje se određuje pravac nailaska zvučnog talasa. Međutim, ako je trajanje periode manje od interauralnog kašnjenja, što znači na dovoljno visokim frekvencijama, na osnovu interauralnog kašnjenja tada se ne može odrediti pravac iz kog nailazi zvučni talas, jer različita kašnjenja mogu prouzrokovati istu faznu razliku.

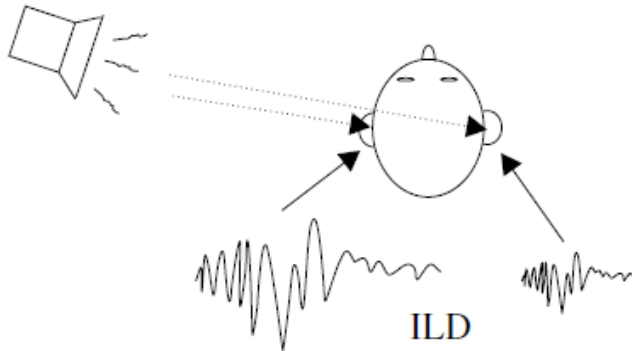


Slika V4.4 Interauralno kašnjenje (ITD)

Mogućnost lokalizacije izvora zvuka srazmerna je sa korelisanošću signala na levom i desnom uvu. Ako su signali potpuno nekorelisani, utisak je da zvuk dolazi sa svih strana. Najmanja korelisanost signala na levom i desnom uvu je u potpuno difuznom polju, kada su svi pravci nailaska zvučne energije na glavu slušaoca jednako verovatni. Korelisanost signala se izražava pomoću parametra koji se zove interauralni kroskorelacioni koeficijent (*IACC- Interaural Cross Corelation*).

Pored interauralnog kašnjenja, za percepciju prostora značajna je i interauralna intenzitetska razlika (*ILD Interaural Level Difference*), koja je ilustrovana na slici V4.5. Ona se javlja zbog refleksija i zvučne senke koju unosi glava i spektralnih promena koje pri tome nastaju usled filtrirajućeg

efekta koje te pojave ispoljavaju na dolazeće sinale. Na višim frekvencijama glava postaje poredljiva sa talasnom dužinom, pa se usled difrakcionih pojava javljaju razlike u nivoima zvuka bližeg i daljeg uva.



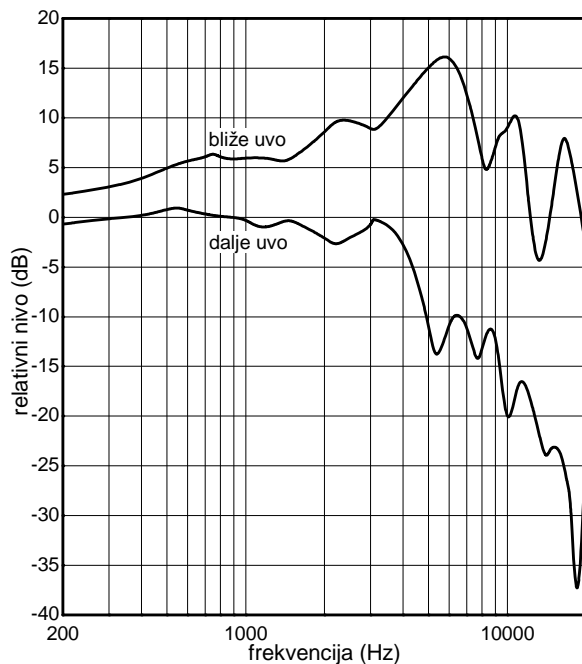
Slika V4.5 Interauralna razlika u nivoima (ILD)

Za kvantifikovanje filtarskog efekta na glavi uvedena je veličina koja se naziva funkcija prenosa glave HRTF (*Head Related Transfer Function*). Ona pokazuje promene signala na levom i desnom uvu u odnosu na stanje u zvučnom polju kada slušalac nije prisutan. HRTF je predstavljena sa dve funkcije prenosa registrovane na pozicijama bližeg i daljeg uva. One se za svaki definisani pravac nailaska zvučne pobude prikazuju u vremenskom ili frekvencijskom domenu. Ukoliko se prikazuje u vremenskom domenu koristi se skracenica HRIR (*Head Related Impulse Response*). Pošto se slušalac i izvor u uobičajenim okolnostima nalaze u horizontalnoj ravni, funkcija prenosa glave se najčešće prikazuje kao banka parova odziva snimljenih u određenim koracima azimuta, (na primer po 10°).

Oblik HRTF-a zavisi od azimuta i elevacije pod kojima nailazi zvučni talas. Svaka osoba ima svoj specifičan oblik HRTF zbog razlika u veličinama i oblicima glave kod ljudi i dimenzija fizičkih detalja na njoj. Kao ilustracija, na slici V4.6 prikazana je funkcija prenosa glave za azimut 90° izmerena na jednoj osobi. Vidi se da je kriva funkcije prenosa bližeg uva uvek iznad krive funkcije prenosa daljeg uva.

Prikazane funkcije podrazumevaju da je glava slušaoca nepomična. Lokalizacija zvučnog izvora se znatno popravija pokretanjem glave, ali to zahteva izvesno vreme potrebno za izvođenje odgovarajućih pokreta.

Korišćenjem HRTF izmerenih za različite azimute i elevacije moguće je sintetizovati realistični trodimenzionalni zvučni događaj. Proces takve sinteze uključuje konvoluiranje ulaznog signala sa HRTF koje odgovaraju željenim pravcima za oba uva. Signali za levo i desno uvo dobijaju se konvolucijom signala izvora sa impulsnim odzivom glave:



Slika V4.6 Izmerene HRTF jedne osobe
za azimut 90°

$$x_{l,\phi,\delta}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[n-k]h_{l,\phi,\delta}[k]$$

$$x_{r,\phi,\delta}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[n-k]h_{r,\phi,\delta}[k]$$

gde $x_{l,\phi,\delta}[n]$ i $x_{r,\phi,\delta}[n]$ predstavljaju signale na levom i desnom uvu za određeni azimut ϕ i elevaciju δ , a $h_{l,\phi,\delta}[k]$ i $h_{r,\phi,\delta}[k]$ odgovarajuće impulsne odzive za taj azimut i elevaciju.

Generalizovana funkcija prenosa (ili impulsni odziv) obično se meri u anehoičnoj prostoriji sa vetačkom glavom umesto slušaoca. Dva mala mikrofona ubačena u ušnu školjku predstavljaju bubne opne i registruju zvuk koji se emituje iz postavljenog zvučnog izvora. Postupak se ponavlja za različite vrednosti azimuta i elevacije.

Amplituda HRTF se menja u funkciji pozicije izvora, ali su pri tome veličina glave, oblik i veličine ušne školjke i konfiguracija torza individualne osobine. Zbog toga HRTF ne zavisi samo od pozicije u prostoru, već i od fizičkih karakteristika slušaoca. Za kreiranje generalizovane prenosne funkcije glave mora se izvršiti usrednjavanje kako bi ona približno odgovarala što većem delu populacije.

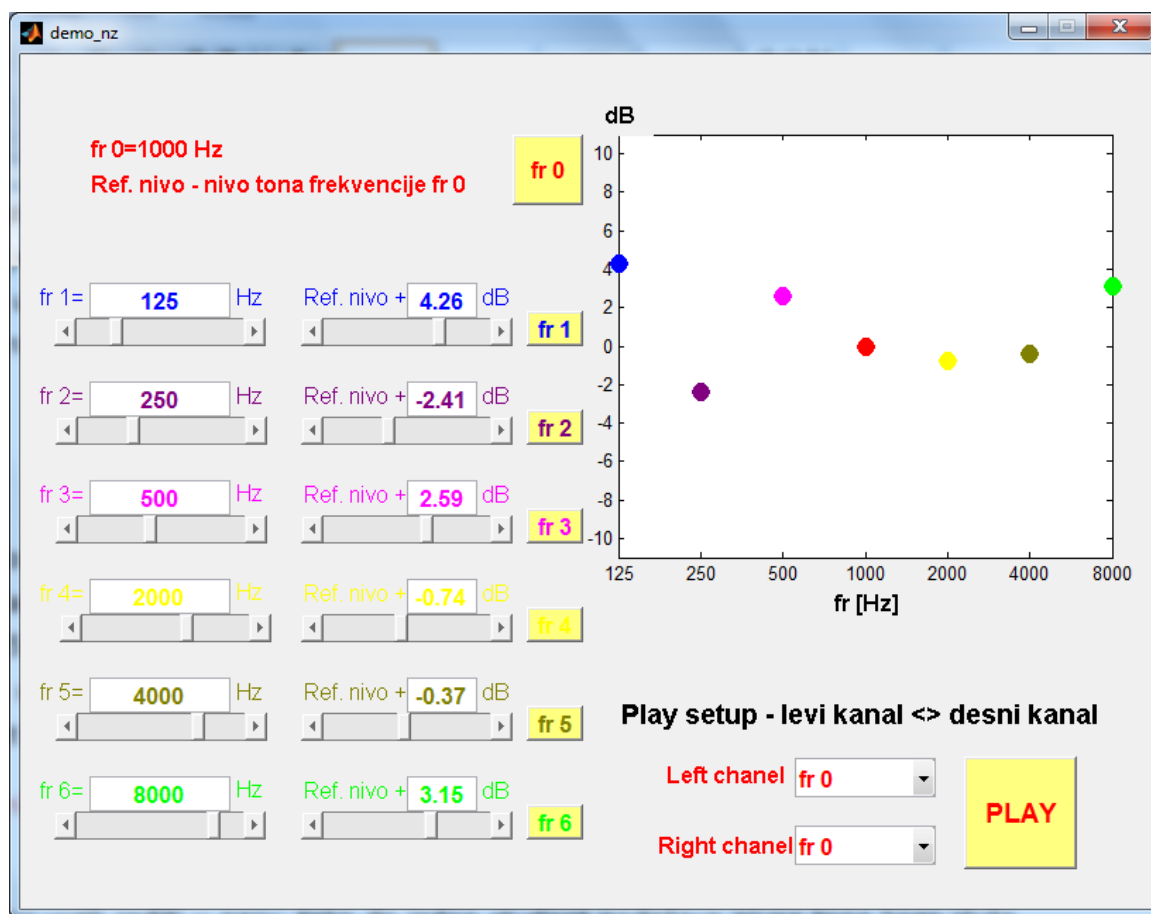
Što se tiče vertikalne lokalizacije, ispitivanja su pokazala da je ona znatno smanjena bez efekata ušne školjke. Upoređivanjem procena donetim u normalnim uslovima i u uslovima kada je ušna školjka pokrivena zaključeno je da ušna školjka unapređuje vertikalnu lokalizaciju. Takođe,

eksperimenti u kojima je jedno uvo blokirano pokazuju da su spektralne razlike između HRTF manje značajne od ukupnih spektralnih modifikacija na uvetu.

Na veoma niskim frekvencijama, na kojima je trajanje periode signala mnogo veće od interauralnog kašnjenja, fazna razlika signala je zanemarljiva, a glava nema uticaja na strukturu zvučnog polja (jer je talasna dužina veća od dimenzija glave). Na tim frekvencijama čulo sluha ne dobija dovoljno informacija za određivanje pravca iz koga zvuk nailazi. Zato na veoma niskim frekvencijama čulo sluha nema sposobnost lokalizovanja pravca nailaska zvuka.

V4.1 – SNIMANJE IZOFONSKIH KRIVIH

Za snimanje izofonske krive koristi se program **demo_nz** koji se startuje iz MATLAB-a. Program omogućava da se naizmenično reprodukuje referentni ton od 1000 Hz i tonovi čije su frekvencije 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz i 8000 Hz. Za svaku frekvenciju u intervalu od 125 Hz do 8000 Hz potrebno je podešavanjem nivoa reprodukovanog signala odrediti nivo pri kome taj ton ima subjektivno istu jačinu kao i referentni ton od 1000 Hz. Na slici V4.4 prikazan je izgled ekrana u programu koji služi za snimanje izofonske krive.



Slika V4.7 . Izgled prozora koji se pojavljuje pri snimanju izofonske krive

NAPOMENA: Vežbu uvek raditi u paru, tako da jedan student podešava nivoe tona koga sluša, a drugi student sluša i subjektivno ocenjuje njihove jačine. Rezultati sopstvene izofonske krive se zapisuju u priloženoj tabeli.

V4.2 – FREKVENCIJSKO MASKIRANJE

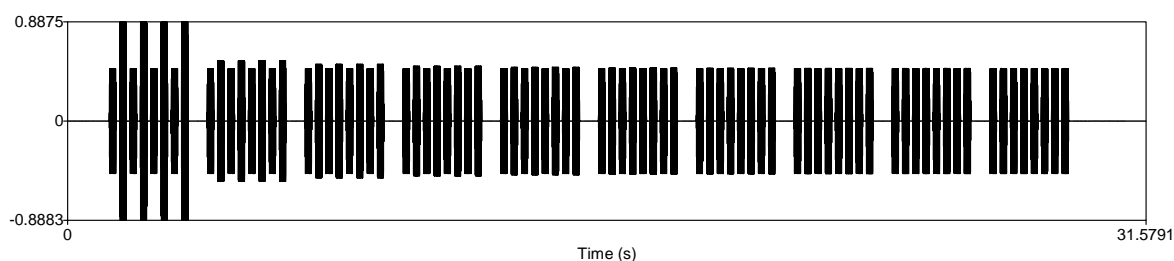
Ovaj deo vežbe demonstrira pojavu maskiranja sinusnim tonom za slučaj kada je njegova frekvencija ispod i iznad prisutnog maskirajućeg tona. Eksperiment se sastoji u slušanju pripremljene sekvence signala u kojoj treba da se prepozna granica kada se test ton, koji se sukcesivno smanjuje po nivou, utapa u krivu maskiranja i postaje neprepoznatljiv.

U pripremljenoj sekvenci se naizmenično puštaju maskirajući ton, oko koga se formira kriva maskiranja, i kombinacija istog maskirajućeg tona i test tona koji će biti maskiran. U tom nizu nivo test tona sukcesivno opada u zadatim fiksnim skokovima od po 6 dB. Prilikom slušanja sekvence

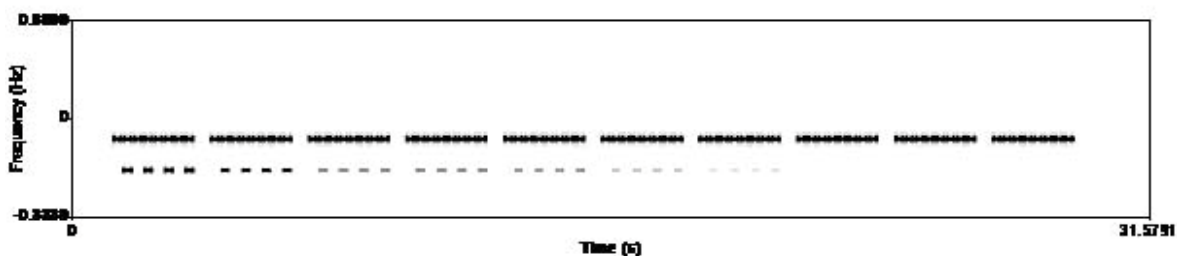
zadatak je da se odredi u koliko koraka smanjenja se još uvek čuje test ton. Trenutak kada se on više ne čuje označava da se on smanjio ispod krive maskiranja.

MASKIRANJE ZVUKOVA ČIJA JE FREKVENCIJA ISPOD MASKIRAJUĆEG TONA

U ovom slučaju maskirajući ton je na frekvenciji 2000 Hz, a test ton na frekvenciji 1200 Hz. Program **maskiranje_ispod** omogućava preslušavanje kompletnog signala, ili po segmentima. U svakom segmentu nivo test tona se smanjuje sa korakom od po 6 dB. Potrebno je slušanjem i brojanjem odrediti u koliko koraka smanjenja se čuje prisustvo test tona. Vremenski oblik signala koji se reprodukuje prikazan je na slici V4.8, a njegov spektrogram na slici V4.9. Na spektrogramu se vidi opadanje nivoa maskiranog tona u vremenu.



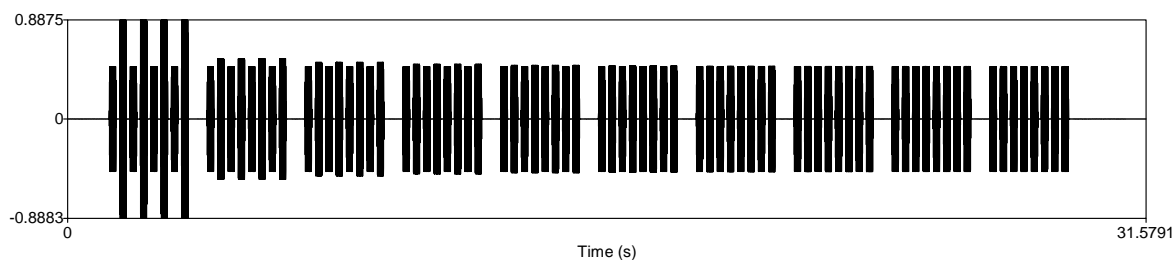
Slika V4.8 Vremenski oblik signala za slučaj test tona ispod maskirajućeg tona



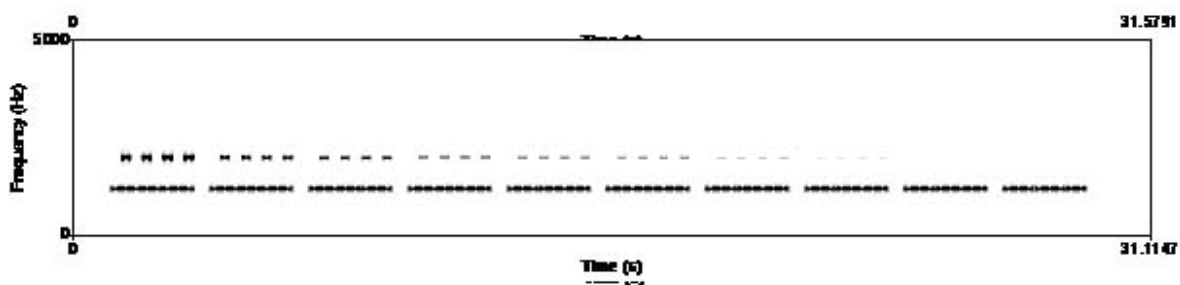
Slika V4.9 Spektrogram signala sa slike V4.8

MASKIRANJE ZVUKOVA ČIJA JE FREKVENCIJA IZNAD MASKIRAJUĆEG TONA

U ovoj vežbi maskirajući ton je na frekvenciji 1200 Hz, a test ton na frekvenciji 2000 Hz. Program **maskiranje_iznad** omogućava preslušavanje kompletnog signala ili po segmentima. U svakom segmentu test ton opada sa korakom 6 dB. Potrebno je slušanjem i brojanjem odrediti u koliko koraka smanjenja se čuje prisustvo test tona. Vremenski oblik signala koji se reprodukuje prikazan je na slici V4.10, a njegov spektrogram na slici V4.11. Na spektrogramu se vidi opadanje nivoa maskiranog tona u vremenu.

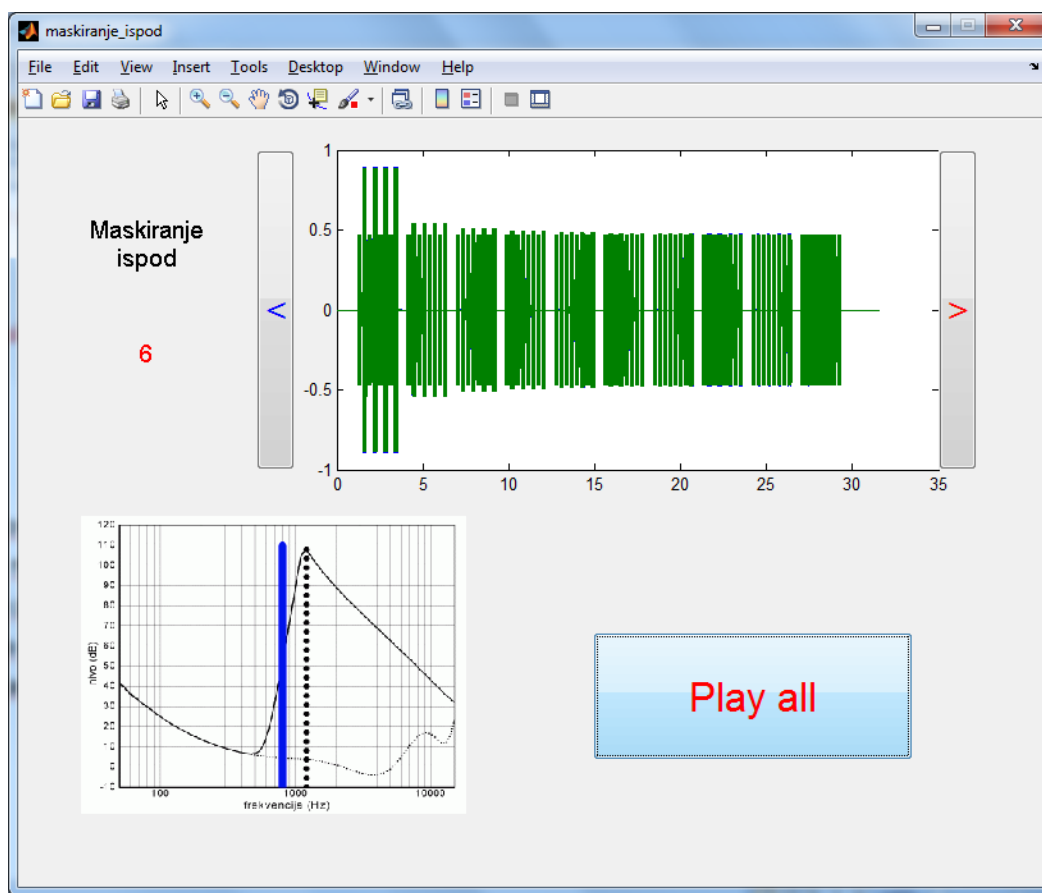


Slika V4.10 - Vremenski oblik signala test tona iznad maskirajućeg tona



Slika V4.11 - Spektrogram signala sa slike V4.10

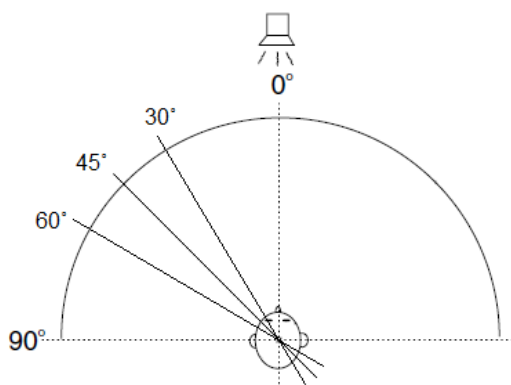
Na slici V4.12 prikazan je izgled prozora iz programa koji omogućava određivanje praga maskiranja tona za slučaj kada je njegova frekvencija niža od frekvencije maskirajućeg tona. Prikazan je vremenski oblik čitavog signala i položaj maskirajućeg i maskiranog tona u odnosu na krivu maskiranja.



Slika V4.12 Izgled ekrana iz programa koji omogućava određivanje praga maskiranja tona sa frekvencijom koja je niža od frekvencije maskirajućeg tona.

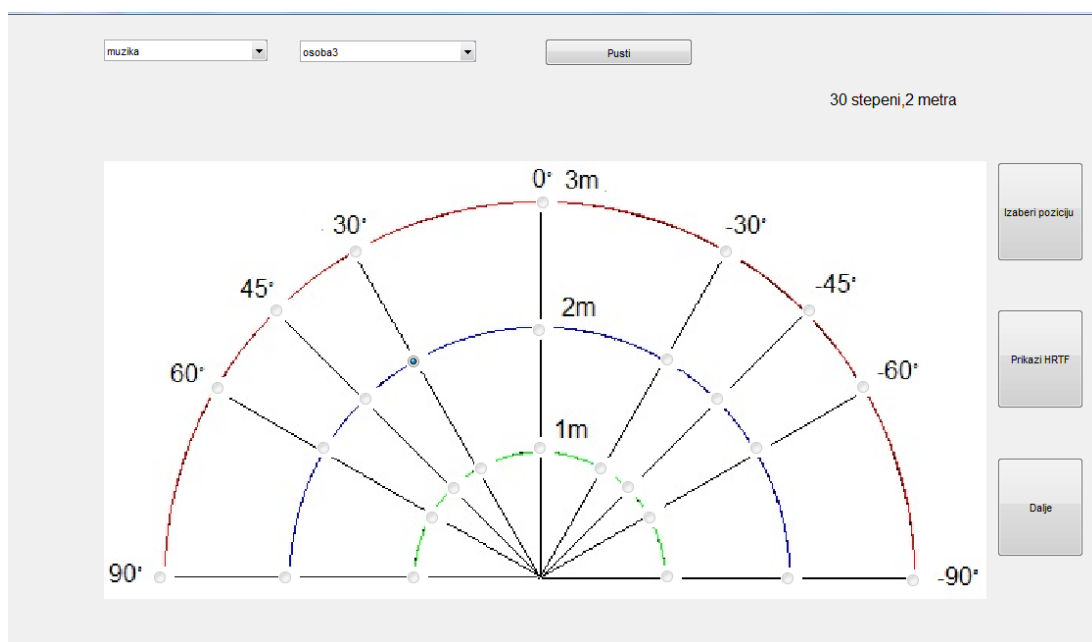
V4.3. ODREĐIVANJE PRAVCA I UDALJENOSTI ZVUČNOG IZVORA

U okviru ove vežbe testira se da li je moguće, i sa kojom tačnošću, odrediti pravac i udaljenost zvučnog izvora. Za potrebe vežbe snimljive su HRTF šest različitih osoba. Snimanje je izvršeno u velikom studiju Fakulteta dramskih umetnosti u Beogradu. Ispitanici su bili u centru studija, na rastojanju 3 m od izvora zvuka, tako da im je glava bila u nivou izvora. Snimljene su funkcije prenosa glave za pet različitih uglova: 0°, 30°, 45°, 60° i 90°, čime je pokrivena leva poluravan (u delu ispred slušaoca). To znači da su u prvom snimanju slušaoci gledali direktno u zvučni izvor, a u ostalim im je glava bila postavljena pod navedenim uglovima u odnosu na izvor u horizontalnoj ravni. Prema tome, levo uvo je bilo bliže, a desno uvo dalje. Druga polovina ravni (uglovi -30°, -45°, -60° i -90°) može se dobiti na osnovu simetrije ljudske glave (približno). Isto snimanje je ponovljeno sa izvorom na rastojanjima 2 m i 1 m od slušaoca, takođe za svih šest ispitanika. Položaji izvora i slušaoca za koje su snimljene HRTF označeni su na slici V4.13.

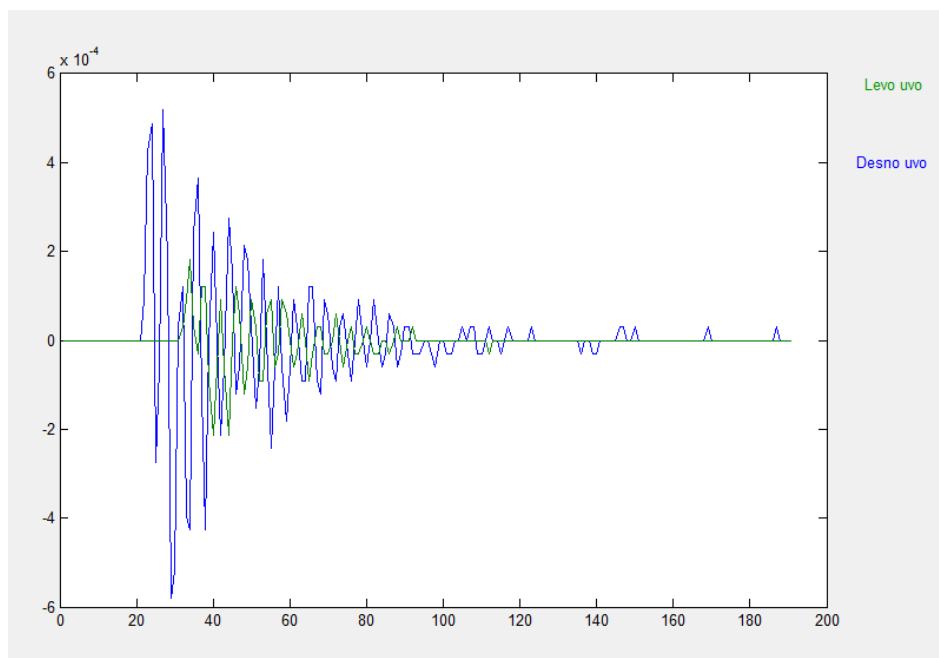


Slika V4.13 Pozicije izvora za koje su snimane HRTF

U prvom delu vežbe potrebno je preslušati signale koji dolaze sa različitih pozicija i udaljenosti. Putem padajućih menija proizvoljno se bira vrsta signala (muzika, govor, slučajan signal) i HRTF neke od ponuđenih 6 osoba čije su HRTF snimljene. Klikom na jednu od dvadesetsedam pozicija bira se odakle, tj sa koje se pozicije želi da signal dolazi. Na slici V4.14 prikazan je izgled pozora iz programa na kome se vrši izbor signala koji se sluša i pozicija zvučnog izvora. Kao ilustracija, na slici V4.15 prikazan je izgled impulsnog odziva za bliže i dalje uvo



Slika V4.14 Izgled prozora za obučavanje i preslušavanje izvora sa različitih pozicija

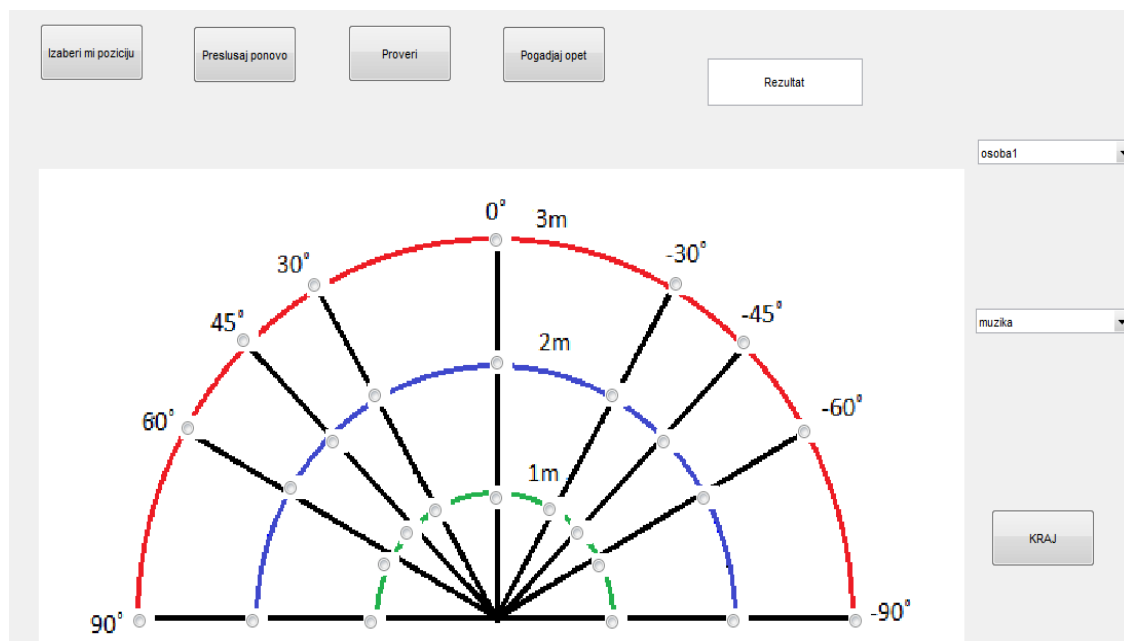


Slika V4.15 HRTF u vremenskom domenu za jednu odabranu kombinaciju osobe i pozicije izvora

Klikom na dugme **“Pusti”** vrši se konvolucija odabranog signala i HRTF-a i tako konvoluirani signal reprodukuje. Slušalac ima osećaj da signal dolazi sa pozicije koju je odabrao klikom na jednu od dvadesetsedam pozicija (9 različitih uglova i 3 različite udaljenosti). Pritiskom na dugme **“Izaberi poziciju”** menja se pozicija sa koje slušalac želi da čuje zvuk. Klikom na dugme **“Prikaži HRTF”** otvara se novi prozor u kome je prikazana izabrana prenosna HRTF funkcija u vremenu.

Klikom na dugme **“Dalje”** prvi prozor se gasi prelazi se sa na drugi deo laboratorijske vežbe u kojem se vrši pogađanje odakle dolazi zvuk, to jest proverava se preciznost lokalizacije zvučnog izvora nepoznatog položaja. Izgled ekrana za ovaj deo vežbe prikazan je na slici V4.16. Klikom na taster **“Izaberi mi poziciju”** program na slučajan način bira poziciju iz koje će signal dolaziti, a kao i u prvom delu postoje padajući meniji u kojem slušalac bira tip signala (muzika, govor) i osobu čiji HRTF će se koristiti.

Pritiskom na dugme **“Preslušaj ponovo”** signal koji je program izabrao za reprodukciju kandidatu može se preslušati ponovo u slučaju da slušalac nije dobro čuo, ili nije siguran odakle zvuk dolazi. Zatim slušalac klikom na odgovarajuću poziciju obeležava sa koje pozicije misli da dolazi zvuk. Nakon toga pritiskom na dugme **“Proveri”** dobija rezultat u polju **“Rezultat”**. Ako je kandidat pogodilo sa koje pozicije dolazi zvuk pišaće **“Tačno☺”** a ako nije pišaće **“Pogrešno☹”**. Ako je kandidat promašio poziciju sa koje je došao zvuk, pritiskom na taster **“Pokušaj ponovo”** ima priliku da promeni poziciju i da ponovi čitav proces pogađanja. Klikom na taster **“Kraj”** zatvara se prozor i vežba se time završava. U okviru vežbe potrebno je uraditi najmanje 50 pokušaja pogađanja pozicije izvora. Postignuti rezultati se preuzimaju iz Excel fajla.



Slika V4.16 Izgled prozora u delu vežbe u kojem se pogađa nepoznata pozicija zvučnog izvora na osnovu slušanja.

IZVEŠTAJ : PSIHOAKUSTIKA – ČULO SLUHA

V1.1 SNIMANJE IZOFONSKIH KRIVIH

Izveštaj treba da sadrži grafički prikaz snimljenih izofonskih krivih.

V1.2 FREKVENCIJSKO MASKIRANJE

Izveštaj treba da sadrži podatke o tome u koliko koraka su slušaoci bili u mogućnosti da detektuju maskirani ton u prisustvu maskirajućeg tona za oba analizirana slučaja – iznad i ispod.

V1.3 ODREĐIVANJE PRAVCA I UDALJENOSTI ZVUČNOG IZVORA

Izveštaj treba da sadrži tabelarno prikazan broj tačno i pogrešno detektovanih pravaca i udaljenosti zvučnog izvora.

PITANJA ZA RAZMIŠLJANJE

1. Oceniti da li veće ograničenje frekvencijskim maskiranjem unose tonovi visokih ili niskih frekvencija.
2. Analizirati rezultate određivanja pravca i udaljenosti izvora i na osnovu toga odrediti kolike su razlike u oceni pri korišćenju HRTF šest različitih slušalaca. S kojim HRTF su u vežbi dobijeni najprecizniji rezultat?
3. Uporediti dobijenu izofonsku krivu sa dijagramom standarnih krivih sa slike V4.1 i komentarisati dobijeni rezultat.

VEŽBA BROJ 5

ZVUČNO POLJE U ZATVORENOM PROSTORU

Razumevanje i opisivanje pojava koje prate zvučno polje u zatvorenom prostoru je značajna tema, jer je zatvoreni prostor najčešća okolnost u kojoj čovek sluša zvuk. Postoji nekoliko modela kojima se opisuje zvučno polje u prostorijama. Svaki od modela polazi drugačijih pretpostavki i opisuje karakteristike polja na drugačiji način. Ova tema pokrivena je sa nekoliko laboratorijskih vežbi koje demonstriraju različite metode merenja objektivnih parametara zvučnog polja u skladu sa različitim matematičkim modelima. Jedna vežba je posvećena talasnom modelu zvučnog polja i pokriva izračunavanje i merenje sopstvenih rezonanci u prostoriji, kao i demonstraciju njihovog uticaja na zvučno polje. Druga laboratorijska vežba posvećena je merenjima zasnovanim na statističkoj teoriji u modelovanju zvučnog polja. U okviru ove vežbe studenti se upoznaju sa metodologijom merenja frekvencijske karakteristike vremena reverberacije i asporpcije materijala.

TEORIJSKI UVOD

Razumevanje i opisivanje pojava koje prate zvučno polje u zatvorenom prostoru je značajna tema jer je zatvoreni prostor najčešća okolnost u kojoj se čovek nalazi i koristi svoje čulo sluha. Postoji nekoliko značajnih pretpostavki koje definišu ovaj problem. To su trodimenzionalnost prostiranja zvuka, veliki opseg talasnih dužina koje se kreću od nekoliko cm do desetina metara i koje su poredljive sa realnim preprekama i veličinom graničnih površina u prostoru gde se posmatra zvuk, talasna priroda zvuka i njoj svojstvene pojave. S druge strane, sve pojave vezane za prostiranje zvuka u zatvorenom prostoru posmatraju se u kontekstu njihovog značaja koji imaju za čoveka i načina na koji ih čovek percipira i vreduje.

Zvučno polje koje se uspostavlja u zatvorenom prostoru kada se u njemu nađe izvor zvuka složen je proces koji nastaje superpozicijom direktnog zvuka iz izvora i energije koja se kreće po trodimenzionalnom prostoru i nailazi sa svih strana. Analitičko opisivanje procesa prostiranja zvuka u zatvorenom prostoru je složeno zbog činjenice da se radi o trodimenzionalnom prostoru u kome pojave koje prate proces prostiranja zavise značajno od frekvencije. Kretanje zvučnih talasa određeno je procesima koji su svojstveni talasnoj prirodi zvuka, a to su refleksija, difrakcija, apsorpcija, disipacija, a dimenzije realnih prostora i prepreka u njima uporedljive su s talasnim dužinama. Uspostavljeno zvučno polje može se posmatrati sa energetskog ili informacionog aspekta. Ako se zvuk posmatra sa subjektivističkog aspekta kao sve ono što registruje čulo sluha, onda se posmatra talasna pojava sa opsegom talasnih dužina od nekoliko desetina centimetara do

nekoliko desetina metara. Kada se govori o zvučnom polju onda je cilj da se ono opiše parametrima koji su u najboljoj korelaciji sa mogućnostima i osobinama čula sluha.

Ne postoji jedinstveni matematički model koji bi omogućio da se zvučno polje opiše, a da se pri tome obuhvate svi značajni parametri koji opisuju karakter zvučnog polja koji se u njemu uspostavlja. Postoji nekoliko načina na koji se u praksi posmatra proces prostiranja zvuka u zatvorenom prostoru :

1. Prostorija se može posmatrati kao sistem prenosa zvučnih informacija iz tačke u kojoj se nalazi zvučni izvor do tačke u kojoj se nalazi prijemnik zvuka. Za ovakav sistem može se smatrati da je linearan i vremenski invarijantan i da se prema tome može opisati svojim impulsnim odzivom koji je vezan za pozicije tačaka pobude i prijema. Na ovaj način se jedan trodimenzionalni priliv zvučne energije u tački prijema preslikava u signal iz koga se dobija informacija o vremenskoj raspodeli zvučne energije kakva se može očekivati u prijemnoj tački, ali bez podataka o prostornoj distribuciji pristigle energije.
2. Drugi način analize zvučnog polja u zatvorenom prostoru je baziran na statističkoj teoriji. Ova teorija pretpostavlja homogeno i difuzno zvučno polje, nastalo kao posledica male vrednosti srednjeg koeficijenta apsorpcije unutrašnjih zidova. U uslovima homogenog i difuznog polja može se govoriti o ukupnoj energiji koja se unutar prostorije uspostavlja u stacionarnom stanju, o nivou reflektovane energije, kao i o brzini opadanja zvučne energije nakon prestanka rada izvora. Statistička teorija, odnosno predikcija vremena reverberacije Sabinovim obrascem, je osnova za definisanje procedure merenja koeficijenta apsorpcije materijala.
3. Treći način opisivanja i analize zvučnog polja u prostorijama baziran je na talasnoj teoriji. Ova teorija polazi od talasne prirode zvuka i prostoriju posmatra kao jedan oscilatorni sistem. Proces opadanja zvuka nakon isključenja zvučnog izvora ova teorija vidi kao proces smirivanja sopstvenih rezonanci (sopstvenih modova) takvog oscilatornog sistema. U prostoriji sopstvene rezonance i prateći stojeći talasi nastaju u vazduhu. Posledice talasne prirode zvuka i pojave stojećih talasa najviše su izražene u relativno malim prostorijama. Postojanje sopstvenih rezonanci čini da prostorija „boji“ zvuk jer se pojavljuje neravnomerna raspodela zvučnog pritiska po prostoru.

U ovoj vežbi svi fenomeni koji su vezani za prostiranje zvuka u zatvorenom prostoru demonstriraju se merenjima na skaliranom fizičkom modelu paralelopipedne prostorije.

PRINCIPI FIZIČKOG MODELOVANJA PROSTORIJA

Primena fizičkih modela za analizu dinamičkih sistema nije ekskluzivna pojava u akustici. Mnogo pre toga fizički modeli korišćeni su u mehanici, brodogradnji, aerodinamici i sličnim oblastima. Postoje zapisi da je još Leonardo da Vinči koristio jednostavne fizičke modele za

proveru mehaničkih sistema koje je konstruisao, a braća Rajt su svoje avione isprobavali na smanjenim fizičkim modelima u improvizovanom aerodinamičkom tunelu.

Koncept fizičkih modela zasniva se na principima dinamički sličnih sistema. Taj princip znači da se dva sistema mogu konstruisati da budu različiti u svojoj veličini, ali da budu slični u svakom drugom pogledu, što znači da se dinamički procesi u njima odvijaju na jednak način. U akustici pojam dinamički sličnih sistema znači da postoji jednakost u procesima koji se odvijaju u zvučnom polju u nekoj realnoj prostoriji, koja se označava kao original, i zvučnog polja u posebno napravljenoj prostoriji istog oblika, ali srazmerno smanjenih dimenzija, koja se označava kao fizički model. Uslovi za zadovoljenje dinamičke sličnosti dva različita akustička sistema, kao što je to u slučaju zvučnog polja u dve prostorije, zasnivaju se na postizanju jednakosti osnovnih fizičkih zakonitosti, poput na primer Njutnovog drugog zakona kretanja. Iz toga se izvodi da je za dinamičku sličnost originala i modela kao dva sistema potrebno da veličina svih fizičkih dimenzije i talasne dužine u originalu i u modelu zadovoljavaju uslov:

$$\frac{l_m}{l_o} = \frac{\lambda_m}{\lambda_o} = n$$

Ovde indeks o označava parametre u originalu, a m u fizičkom modelu. Parametar n je faktor skaliranja modela u odnosu na original (zbog toga se ovakvi modeli na engleskom nazivaju *scaled models*). Ako je gornja relacija zadovoljena, odnos talasne dužine zvuka i prepreka sa kojima zvučni talasi stupaju u interakciju u originalu i u modelu su isti, bez obzira na vrednost n . To dalje znači da se svi procesi na graničnim površinama u originalu i modelu, kao što su refleksija i difrakcija, odvijaju na jednak način. Brzina prostiranja zvuka je konstanta i u opštem slučaju ista je u originalu i u modelu. Talasna dužina određena je relacijom:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Zamenom izraza dobija se uslov dinamičke sličnosti u domenu frekvencija:

$$\frac{f_M}{f_o} = n$$

Zbog ovog uslova pri povećanju frekvencije u modelu n puta vremenska osa se komprimuje sa istim faktorom n . Ova činjenica se mora uzimati u obzir pri tumačenju sličnosti sistema.

Prema tome, pod pojmom fizičkog modela neke prostorije u akustici se podrazumeva maketa njene unutrašnjosti, napravljena tako da su joj sve dimenzije određene deljenjem originalnih dimenzija sa n , to jest u razmeri $1:n$ (fizički modeli prostorija su iz razumljivih razloga uvek manji od originala). Uslov sličnosti zvučnog polja u modelu i originalu zadovoljen je kada se model pobuđuje frekvencijama koje su n puta više od frekvencija u originalu. U impulsnom odzivu koji se dobija u takvom modelu vremenska osa je komprimovana n puta. Da bi se na

relevantan način tumačio akustički odziv snimljen u fizičkom modelu neophodno je sa istim faktorom ekspandovati vremensku osu.

U praksi se za analizu na fizičkim modelima prostorija koriste faktori skaliranja od 10 do 50 (to jest u razmeri 1:10 do 1:50). Samo u retkim slučajevima moguće je primeniti faktor manji od 10. Naime, za izbor vrednosti razmere u smanjenju modela postoje krajnje praktični razlozi koji proizilaze iz konačne veličine modela koga treba napraviti, koga zatim negde smestiti i s njim manipulirati. Samo u slučaju sala manjih dimenzija moguće je planirati izradu modela u razmeri 1:10. U analizi većih prostorija nužna je sitnija razmera da bi se napravio model prihvatljivih spoljašnjih gabarita. Na slici V5.1 prikazana su tri fizička modela prostorija koji se koriste u laboratorijskim vežbama.



V5.1 Na slikama su prikazani fizički modeli dve reverberacione i jedne anehoične prostorije koji se nalaze u Laboratoriji za akustiku ETF.

TALASNA TEORIJA

Talasna teorija opisuje pojavu prostiranja zvuka u zatvorenom prostoru preko sopstvenih rezonantnih modova. U opštem slučaju, za proizvoljni oblik prostorije analitičko određivanje sopstvenih rezonanci nije moguće, već se moraju primenjivati različite numeričke metode. Samo za paralelopipedne porostorije moguće je na osnovu talasne jednačine i zadatih graničnih uslova analitički odrediti frekvencije sopstvenih rezonanci. One mogu biti ivične, površinske i prostorne. Pri zvučnoj pobudi prostorije na rezonantnim frekvencijama dolazi do formiranja stojećih talasa, odnosno do inteferencije koja daje vremenski nepromenljivu preraspodelu intenziteta zvuka u prostoriji. U pravilnom prostornom rasporedu pojavljuju se zone sa povećanom i zone sa smanjenom energijom u zvučnom polju. Važna činjenica za tumačenje ponašanja akustičkog odziva je da na svojim sopstvenim rezonancama prostorija može da primi veću količinu zvučne energije nego na ostalim frekvencijama.

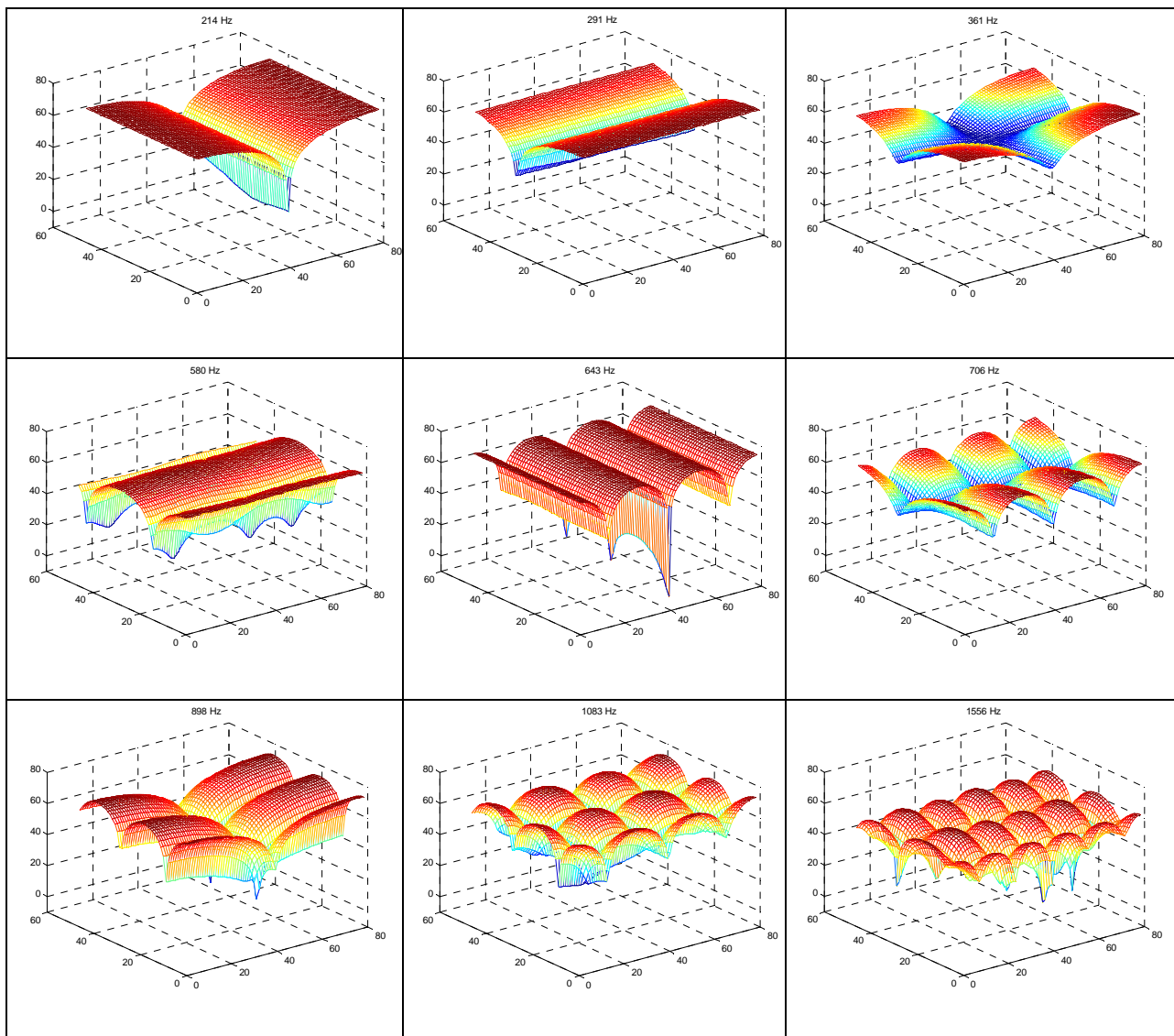
Do superpozicije talasa dolazi i na svim ostalim frekvencijama, a ne samo na rezonancama, ali je zbog delimično destruktivne interferencije varijacija polja van rezonanci mnogo manje izražena nego na sopstvenim modovima. Na slici V5.2 prikazana je raspodela nivoa zvuka po prostoriji na sopstvenim rezonancama, dok je na slici V5.3 prikazana raspodela polja na nekim odabranim frekvencijama različitim od frekvencija rezonanci. Raspodele su određene numerički za slučaj fizičkog modela paralelopipedne reverberacione komore sa slike V5.1. Sa slika V5.2 i V5.3 vidi se da na svim frekvencijama postoji prostorna zavisnost nivoa zvuka, ali je ona neuporedivo više izražena na sopstvenim modovima. Raspodela polja zavisi prvenstveno od dimenzija prostorije ali i od pozicije prijema i pobude.

Postojanje sopstvenih rezonanci ima svoje praktične posledice. Velike razlike u nivou zvuka na različitim pozicijama u prostoriji mogu da imaju negativnog uticaja, bilo da se radi o prostorijama u kojima se vrši snimanje zvuka, u režijskim prostorima ili u prostorijama koje su namenjene slušanju. Slušaoci koji se nalaze na različitim pozicijama u prostoriji sa izraženim stojećim talasima na sopstvenim rezonancama registrovaće drugačiju boju zvuka od one koja se emituje, pri čemu ta boja zavisi od položaja u prostoriji.

Za paralelopipedne prostorije karakteristična je pojava veoma izraženih stojećih talasa. Frekvencije na kojima se javljaju sopstvene rezonance, a time i stojeći talasi, definisane su samim dimenzijama prostorije i izračunavaju se na osnovu sledeće formule:

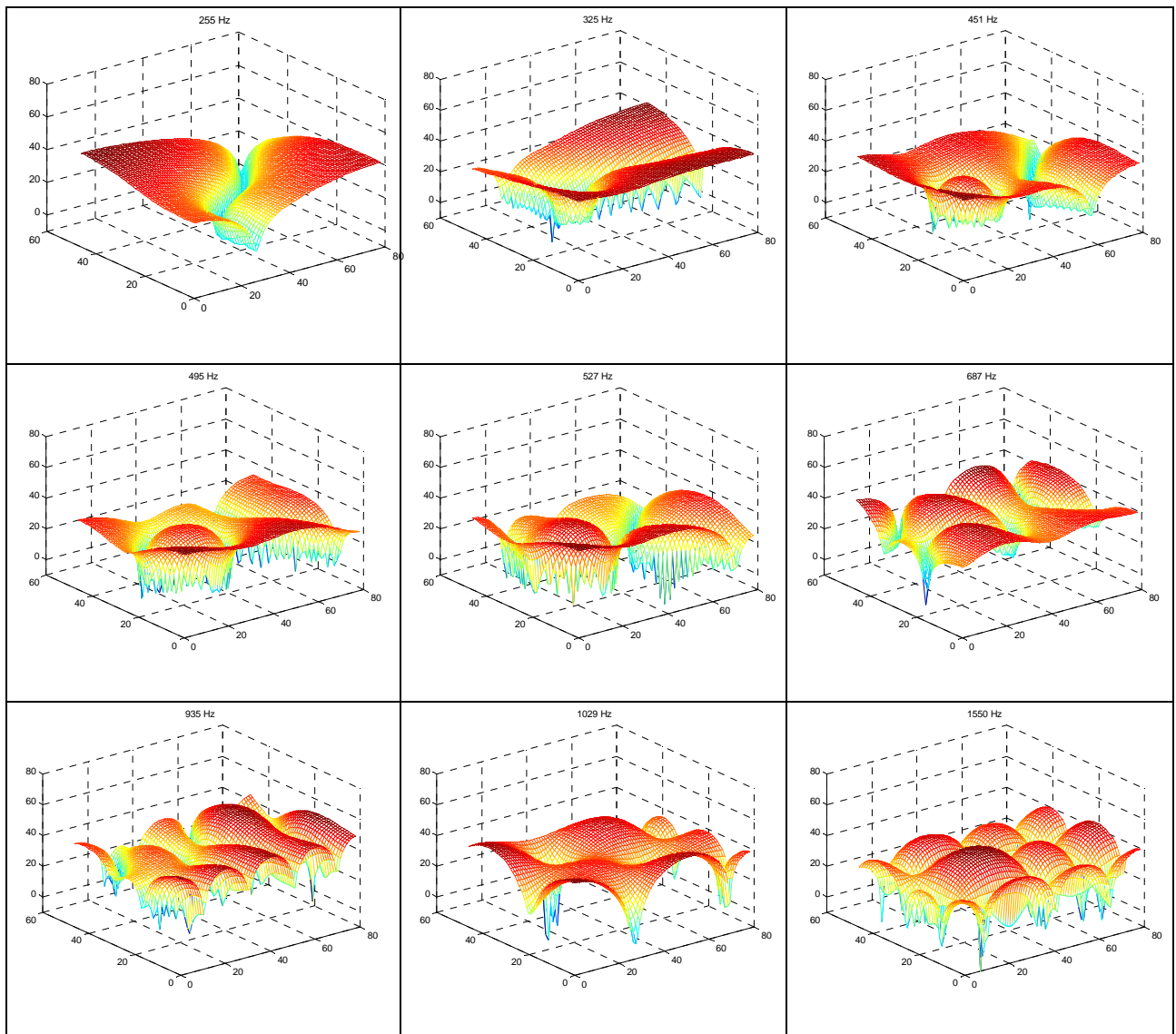
$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2},$$

gde su l_x , l_y i l_z dimezije prostorije duž tri ose. Parametri n_x, n_y, n_z su prirodni brojevi čije kombinacije daju sve sopstvene rezonantne frekvencije kojih ima beskonačno, kao i kombinacija prirodnih brojeva. Postojanje stojećih talasa manifestuje se promenom pritiska duž pravca prostiranja stojećeg talasa.



Slika V5.2 Raspodela polja u modelu paralelopipedne reverberacione prostorije (sa slike V5.1) na frekvencijama sopstvenih rezonanci, izračunata rešavanjem talasne jednačine. Na apscisnoj i ordinatnoj osi su dimenzije osnove prostorije u cm.

U okviru ove vežbe biće demonstriran postupak merenja frekvencija sopstvenih rezonanci, kao i analiza prostorne raspodele polja na njima. Merenjima će biti pokazano i u kojoj meri prisustvo apsorpcionog materijala utiče na raspodelu i izraženost stojećih talasa u prostoriji.



Slika V5.3 Raspodela polja u modelu reverberacione prostorije na nekim frekvencijama van sopstvenih rezonanci, izračunata rešavanjem talasne jednačine.

STATISTIČKA TEORIJA

Jedan od najvažnijih parametara u akustici prostorija je vreme reverberacije. To je vreme za koje nivo zvuka u prostoriji opadne za 60 dB od trenutka prestanka pobudnog signala, to jest od trenutka isključenja zvučnog izvora. Ovaj parametar sam za sebe govori mnogo o akustičkim osobinama prostorije, a ujedno služi kao pomoćni podatak pri određivanju drugih parametara kao što je na primer koeficijent apsorpcije materijala.

U okviru ove vežbe studenti će se upoznati sa jednom od tehnika merenja vremena reverberacije i koeficijenta apsorpcije materijala u modelu reverberacione prostorije. U okviru vežbe vreme

reverberacije se meri tehnikom prekinutog šuma. Vreme reverberacije se, kao i koeficijent apsorpcije, meri u oktavnim frekvencijskim opsezima. Snimljeni signal iz prostorije filtrira se oktavnim filtrima i na osnovu promene nagiba krive opadanja nivoa zvuka u prostoriji sa i bez apsorpcionog materijala određuje se vreme reverberacije.

Postoji više postupaka za određivanje vremena reverberacije. Svi oni svode se na pobuđivanje prostorije širokopojasnim signalom ili impulsnom pobudom i praćenjem brzine nestanka zvuka u prostoriji.

Procedura merenja koeficijenta apsorpcije zasnovana je na merenju frekvencijske zavisnosti vremena reverberacije prazne komore i komore u koju se ubaci određena količina apsorpcionog materijala čije se karakteristike ispituju. Standard definiše proceduru na osnovu koje se koeficijent apsorpcije ispitivanog materijala izračunava na osnovu promene vremena reverberacije. Koeficijent apsorpcije izračunava se pomoću Sabinove formule za predikciju vremena reverberacije:

$$T_0 = \frac{0.16V}{\sum \alpha_i S_i} = \frac{0.16V}{\bar{\alpha}S}$$

gde je V zapremina komore, a S njena ukupna unurašnja površina. Kada se u komoru postavi apsorpcioni materijal površine S_m i nepoznatih apsorpcionih svojstava, vreme reverberacije u prostoriji se promeni na:

$$T_m = \frac{0.16V}{\sum \alpha_i S_i + \alpha_m S_m}$$

Nepoznata apsorpcija unetog materijala izračunava se na osnovu obrasca:

$$\alpha_m = \frac{0.16V}{S_m} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_0} \right)$$

gde je T_0 izmereno vreme reverberacije u praznoj komori, a T_m izmereno vreme reverberacije u komori sa unetim materijalom.

U okviru ove laboratorijske vežbe na fizičkom modelu jedne paralelepipedne reverberacione prostorije biće demonstrirani određeni fenomeni i merne tehnike za:

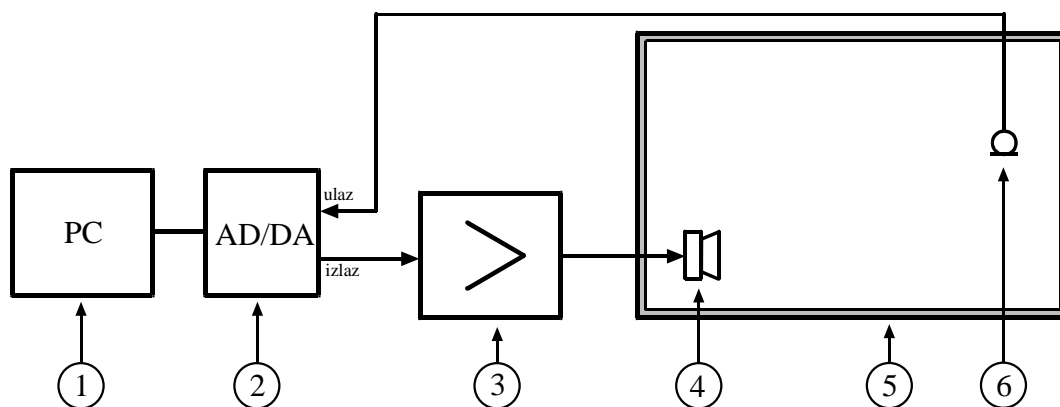
- merenje vremena reverberacije
- merenje koeficijenta apsorpcije materijala

V5.1 IZRAČUNAVANJE SOPSTVENIH REZONANTNIH FREKVENCIJA KOMORE

Za model paralelopipedne prostorije dimenzija 0.49m x 0.50m x 0.80m potrebno je izračunati prvih 10 ivičnih sopstvenih rezonantnih frekvencija za sve tri ose, kao i nekoliko najnižih rezonantnih frekvencija površinskih i prostornih sopstvenih modova.

V5.2 ODREĐIVANJE SOPSTVENIH REZONANCI MERENJEM ODZIVA KOMORE

Frekvencije sopstvenih rezonanci u nekom prostoru moguće je odrediti merenjem impulsnog odziva prostora ili analizom odziva prostorije na pobudu belim šumom. U ovoj vežbi biće primenjen postupak merenja frekvencija sopstvenih rezonanci na osnovu analize odziva pri pobudi belim šumom. U jednoj tački prostorije nalazi se izvor zvuka (zvučnik), a u drugoj prijemnik (mikrofon). Pozicija izvora i prijemnika utiče na frekvencijsku karakteristiku odziva. Zbog toga je potrebno sprovesti merenje za nekoliko kombinacija položaja pobude i prijema kako bi se identifikovale sve sopstvene rezonance.



Slika V5.4. Blok-šema postavke za merenje sopstvenih rezonantnih frekvencija u modelu reverberacione prostorije.

Merna postavka prikazana je na slici V5.4. Za nju se koristi sledeća oprema:

6. računar sa odgovarajućim softverom za reprodukciju i analizu signala
7. audio interfejs (AD/DA konvertor)
8. pojačavač snage
9. zvučnik

10. model reverberacione komore

11. mikroskop

Brojevi u slici odgovaraju brojevima sa spiska opreme. Na slici V5.5 prikazana je fotografija merne postavke u laboratoriji.



Slika V5.4. Izgled merne postavke za merenje sopstvenih rezonantnih frekvencija u modelu reverberacione prostorije

Zvučnik se pobuđuje belim šumom preko pojačavača snage. Signal iz mikrofona snima se u računaru i kasnije analizira. Snimanje i analizu moguće je vršiti u različitim softverima, a analiza signala se vrši u Matlab-u. Pri merenju prostorija se pobuđuje u trajanju od 20-30 s i zatim se posmatra spektar snage snimljenog signala.

Postupak merenja treba ponoviti na nekoliko pozicija izvora i prijemnika zvuka. Posmatrati uporedne dijagrame spektra snage za različite kombinacije izvora i prijemnika. Sa prikazanih dijagrama očitati desetak prvih rezonantnih frekvencija i porediti ih sa frekvencijama koje su proračunate za poznate dimenzije prostorije.

U komoru ubaciti komad priloženog apsorpcionog materijala i ponoviti snimanje za jednu izabranu kombinaciju izvora i prijemnika. Uporediti dobijene rezultate sa rezultatim merenja u praznoj komori.

V5.3 ANALIZA STOJEĆEG TALASA NA JEDNOJ REZONANTNOJ FREKVENCiji

Model komore se pobuđuje prostim sinusnim tonom na frekvenciji koja odgovara jednoj ivičnoj rezonanci duž z ose. Potrebno je pomerati mikrofon duž z ose pomoću mehanizma koji ga drži u unutrašnjosti komore i snimati promenu zvučnog pritiska. Merenje ponoviti za nekoliko ivičnih sopstvenih modova komore, kao i za jednu frekvenciju koja ne odgovara nijednom sopstvenom modu.

IZVEŠTAJ : ZVUČNO POLJE U ZATVORENOM PROSTORU

V5.1 IZRAČUNAVANJE SOPSTVENIH REZONANTNIH FREKVENCIJA KOMORE

Izveštaj treba da sadrži tabelarni prikaz izračunatih sopstvenih rezonantnih frekvencija.

V5.2 ANALIZA ZVUČNOG PRITISKA U KOMORI

Izveštaj treba da sadrži:

1. Za nekoliko pozicija izvora i prijelnika nacrtane spektre snage snimljenog signala na pobudu belim šumom i uporedni prikaz dobijenih spektara.
2. Tabelarni prikaz očitanih frekvencija sopstvenih modova sa dijagrama spektra i njihovo poređenje sa izračunatim vrednostima.

V5.3 ANALIZA STOJEĆEG TALASA NA JEDNOJ REZONANTNOJ FREKVENCIJI

Izveštaj treba da sadrži

1. Prikaz raspodele polja duž z ose za tri sopstvene frekvencije ivičnog stojećeg talasa.
2. Prikaz prostorne raspodele nivoa zvuka duž z ose za jednu izabranu frekvenciju koja ne odgovara ni jednoj sopstvenoj rezonanci komore.

PITANJA ZA RAZMIŠLJANJE

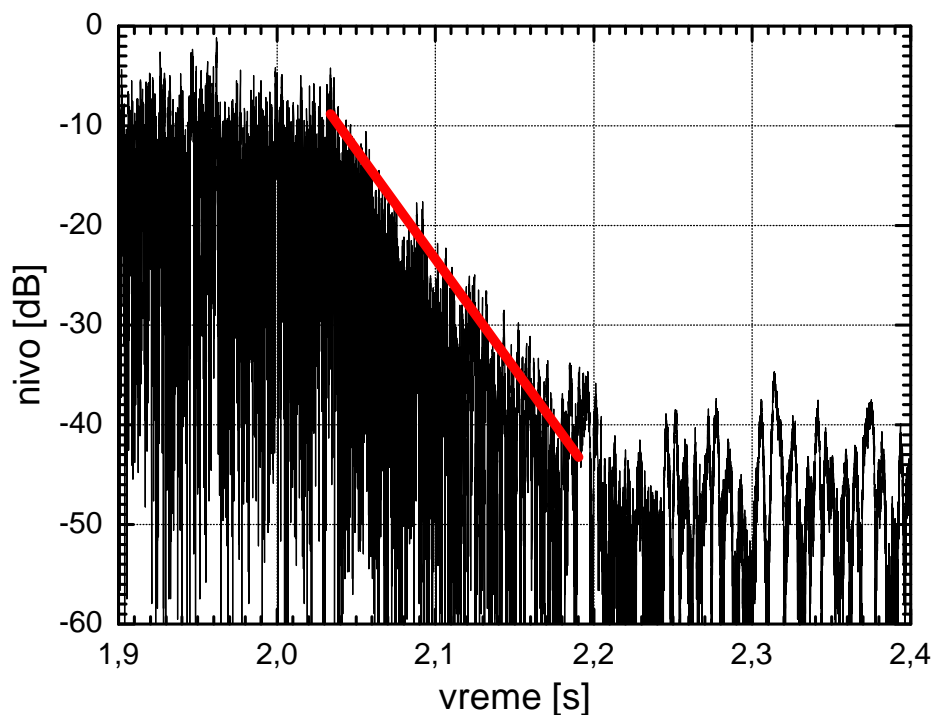
8. Na koje se sve načine može opisati zvučno polje na sopstvenim modovima.
9. Da li se unošenjem apsorpcionog materijala remete frekvencije sopstvenih modova ili njihova izraženost?

V5.4 MERENJE VREMENA REVERBERACIJE

Postupak merenja vremena reverberacije zasniva se na metodi prekinutog šuma. Prostorija se pobuđuje roze šumom nekoliko sekundi kako bi se uspostavilo stacionarno stanje zvučnog polja. Merna postavka je ista kao i u slučaju merenja sopstvenih rezonantnih frekvencija, slike V5.4 i V5.5. Nakon nekoliko sekundi zvučni izvor se isključuje i nivo zvuka u komori počinje da opada. Opadanje nivoa zvuka se odvija po linearnom zakonu (a pritiska po eksponencijalnom zakonu). Postupak merenja podrazumeva da se par sekundi pre isključenja izvora započne snimanje koje se prekida nakon trenutka u kome zvučni pritisak više ne opada, već se zadržava na nivou ambijentalne buke.

Snimljeni signal se filtrira u oktavnim frekvencijskim opsezima, i za svaki opseg se na osnovu nagiba linearnog opadanja nivoa zvuka određuje vreme reverberacije. Posmatraju se oktavni opsezi sa centralnim frekvencijama 1kHz, 2kHz, 4kHz i 8kHz. Postupak se ponavlja za nekoliko mernih pozicija i rezultati se usrednjavaju za svaki frekvencijski opseg.

Kao ilustracija, na slici V5.6 prikazan je izgled jednog snimljenog signala u toku i nakon isključenja zvučnog izvora.



Slika V5.6 izgled jednog snimljenog signala u toku i nakon isključenja zvučnog izvora.

V5.5 MERENJE KOEFICIJENTA APSORPCIJE

Merenje koeficijenta apsorpcije zasniva se na merenju vremena reverberacije u reverberacionoj prostoriji sa i bez unetog apsorpcionog materijala. Primenom statističke teorije može se vršiti predikcija vremena reverberacije na osnovu geometrijskih i apsorpcionih svojstava prostorije koristeći Sabinov obrazac za izračunavanje vremena reverberacije. Na slici V5.6 prikazan je izgled reverberacione komore s jednom mogućom ostavkom apsorpcionog materijala. Komadi apsorpcionog materijala se postavljaju razbacano po površinama u prostoriji kako bi se ostvarila veća difuznost poja. Polazni podatak za izračunavanje koeficijenta apsorpcije je poznavanje ukupne površine unetog apsorpcionog materijala i globalne geometrijske dimenzije prostorije.



Slika V5.6 Primer merne postavke apsorpcionog materijala u komori.

IZVEŠTAJ : AKUSTIČKA MERENJA U PROSTORIJAMA

V5.4 MERENJE VREMENA REVERBERACIJE

Izveštaj treba da sadrži tabelarni prikaz izmerenih vrednosti vremena reverberacije za praznu komoru na frekvencijama 1kHz, 2kHz, 4kHz i 8kHz u najmanje 3 merne pozicije i srednju vrednost frekvencijske zavisnosti vremena reverberacije.

V6.2 MERENJE KOEFICIJENTA APSORPCIJE

Izveštaj treba da sadrži:

3. Tabelarni prikaza izmerenih vrednosti vremena reverberacije za komoru sa unetim apsorpcionim materijalom na frekvencijama 1kHz, 2kHz, 4kHz i 8kHz u najmanje 3 merne i prikaz srednje vrednosti frekvencijske zavisnosti vremena reverberacije;
4. Tabelarno i grafički prikazane izračunate vrednosti koeficijenta apsorpcije materijala na frekvencijama 1kHz, 2kHz, 4kHz i 8kHz.

PITANJA ZA RAZMIŠLJANJE

1. Koji su razlozi dobijanja različitih vrednosti merenja vremena reverberacije u različitim tačkama u prostoriji
2. Kolika je količina apsorpcionog materijala u datoj komori potrebna da bi se mogla detektovati promena vremena reverberacije od bar 20% pri unošenju apsorpcionog materijala koji ima koeficijent apsorpcije 0.3.

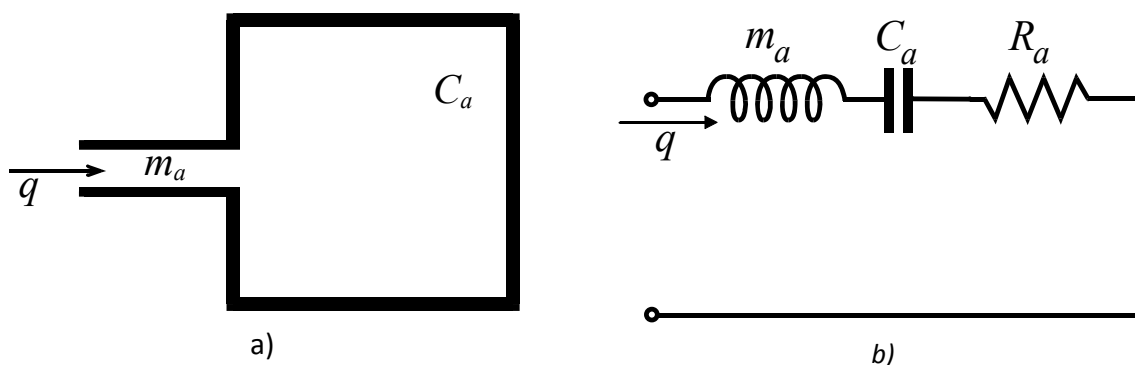
VEŽBA BROJ 6

AKUSTIČKI REZONATOR

Ova laboratorijska vežba ima zadatak da studentima demonstrira rezonantnu pojavu u komori sa otvorom. Pojavu je prvi opisao Herman Ludvig Ferdinand fon Helmholtz, pa se takav akustički rezonator po njemu često naziva i Helmholtzov rezonator. U vežbi se akustički rezonator upotrebljava za merenje zapremine tela nepravilnog oblika. Takođe se analizira efekat koji povećanja otpornosti strujanja vazduha u otvoru ima na rezonantnu pojavu.

TEORIJSKI UVOD

Najznačajnija forma akustičkog kola je takozvani akustički rezonator. On se sastoji od jedne cevi i jedne komore, to jest akustičke induktivnosti i kapacitivnosti. Na slici V6.1a prikazan je principijelni izgled akustičkog rezonatora sa označenim bitnim parametrima. U literaturi se konstrukcija prikazana na slici naziva Helmholtzov rezonator.



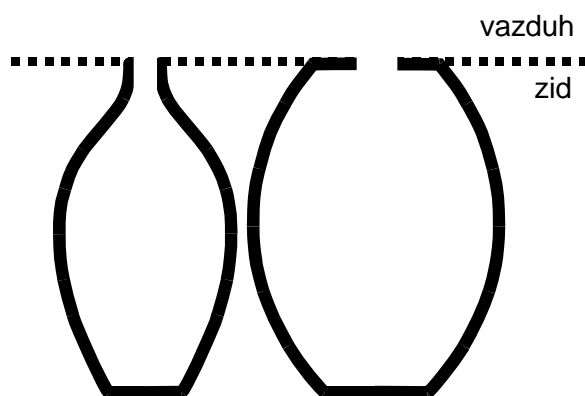
Slika V6.1 – Akustički rezonator i njegova ekvivalentna električna šema.

Kada se otvor rezonatora izloži dejstvu spoljašnjeg zvučnog polja, na njemu će postojati zvučni pritisak određen fizičkim okruženjem. U otvoru se usled toga javlja protok q koji prolazi kroz cev i odlazi u komoru. U ulaznom otvoru neminovno postoji izvesna disipacija energije usled trenja između molekula vazduha koji osciluju i masivnih zidova. Ta pojava u kolo rezonatora uvodi i akustičku otpornost. Ekvivalentna šema rezonatora prikazana je na slici V6.1b. Preduslov za modelovanje rezonatora ekvivalentnom električnom šemom je da su sve njegove dimenzije dovoljno manje od talasne dužine zvuka. Vidi se da rezonator predstavlja jedno

redno oscilatorno kolo, jer činjenica da kroz cev i komoru prolazi isti protok ukazuje na njihovu rednu vezu u smislu konfiguracije akustičkog kola. Na rezonanci kola njegova impedansa je minimalna, pa će tada akustički protok biti najveći, bez obzira na uslove pobude. Može se reći da akustički rezonator na svojoj rezonanci predstavlja apsorber zvuka, jer „usisava“ iz okoline više energije iz zvučnog polja od onoga što bi normalno pogađalo površinu njegovog malog otvora izloženog dejstvu zvučnog polja.

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

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



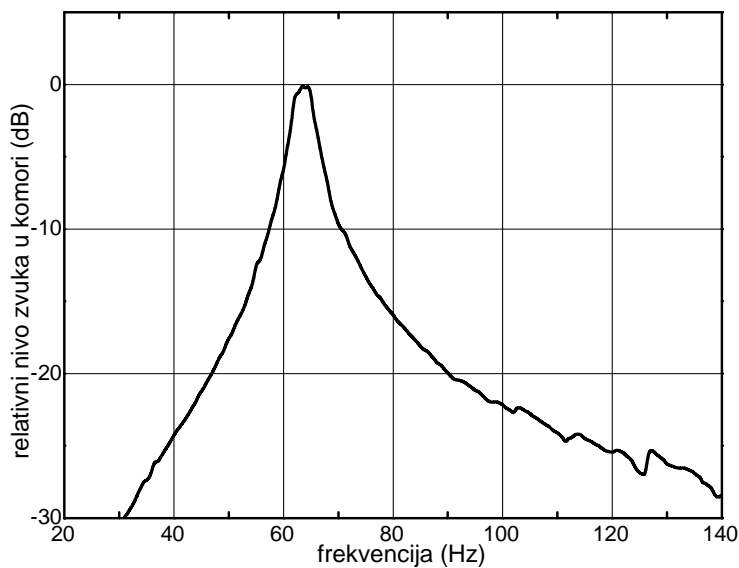
Slika V6.2 – Neki oblici akustičkih rezonatora koji su korišćeni u srednjovekovnim crkvama.

Akustički rezonatori su najstariji oblik akustičkih konstrukcija i korišćeni su još u antička vremena (akustička „prosta mašina“). Tokom srednjeg veka rezonatori su ugrađivani u zidove velikih crkava da bi delovali kao apsorberi zvuka. Pri tome se računalo na povećane gubitke zvučne energije koje ispoljavaju na rezonancama. U to vreme rezonatori su uglavnom pravljani kao posude od grnčarije. Na slici V6.2 prikazani su neki karakteristični oblici ugrađivanih rezonatora kakvi su pronalazeni u srednjovekovnim objektima. Na slici V6.3 prikazana je

fotografija originalnih rezonatora izvađenih iz svodova jedne stare crkve. To su standardni sudovi za vodu, a funkciju otvora rezonatora imala je rupa koja je naknadno pravljena na njihovom dnu.



Slika V6.3 – Fotografija originalnih akustičkih rezonatora od grnčarije izvađenih iz svodova jedne stare crkve.



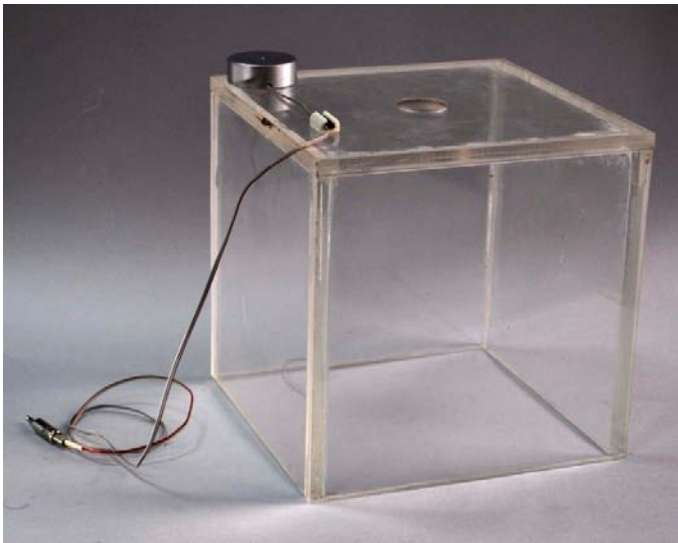
Slika V6.4 – Snimljena zavisnost pritiska u komori jednog od rezonatora sa slike V6.3 pri konstantnoj spoljašnjoj zvučnoj pobudi

Na slici V6.4 prikazana je izmerena relativna promena nivoa zvuka u komori jednog rezonatora sa slike V6.3 pri konstantnoj spoljašnjoj pobudi iz zvučnog polja. Vidi se da se pojava rezonance manifestuje porastom nivoa zvuka u komori. To je posledica porasta protoka kroz rezonator u oblasti rezonantne frekvencije. Sa dijagrama se može proceniti širina njegove rezonantne krive. U slučaju analiziranog rezonatora to je svega nekoliko Hz. Na frekvenciji rezonance proces apsorpcije koju ispoljava rezonator može biti veoma efikasan. Međutim, vidi se da je efekat rezonance, što znači i povećane brzine oscilovanja molekula vazduha što

proizvodi povećane gubitke, ograničen na vrlo uzak frekvencijski opseg u širini rezonantne krive, odnosno njegovog propusnog opsega.

V6.1 ODREĐIVANJE PARAMETARA AKUSTIČKOG KOLA HELMHOLCOVOG REZONATORA

Na vežbi se kao model Helmholtcovog rezonatora koristi kutija sa otvorom prikazana na slici V6.5. Kutija ima 5 stranica, dok šestu stranicu čini podloga na koju je kutija postavljena. Podloga mora biti od materijala koji omogućava dobro prijanjanje kutije, čime se sprečava „curenje“ zvuka na spoju. Na jednoj stranici kutije nalazi se otvor koji predstavlja induktivnost u ekvivalentnom električnom kolu. Na toj istoj površini unutar kutije ugrađen je mikrofonski kojim se beleži nivo zvuka u kutiji. Dimenzije kutije su 20 cm x 20 cm x 20 cm, prečnik otvora 3 cm, a dužina otvora (debljina zida kutije) je 1 cm.

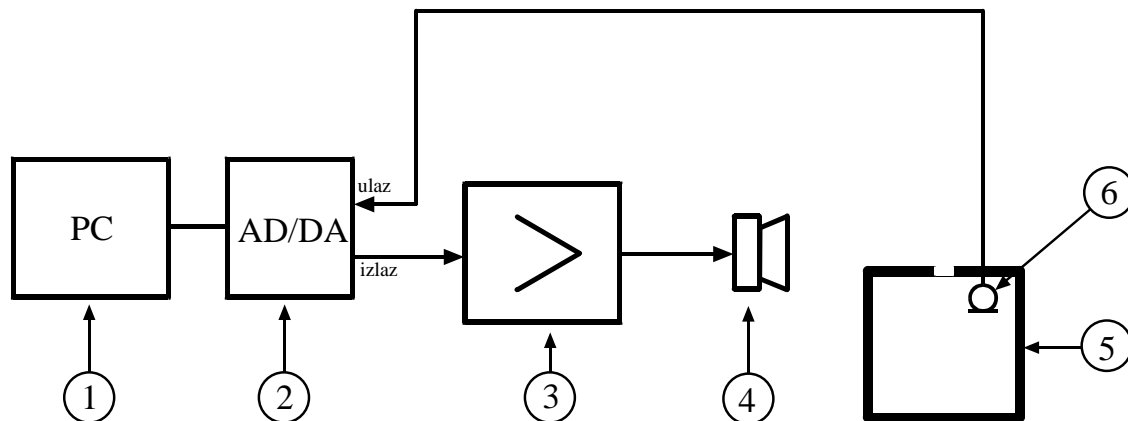


Slika V6.5 Izgled Helmholtcovog rezonatora koji se koristi na vežbi. Na gornjoj površini vide se otvor rezonatora i zaštita mikrofona.

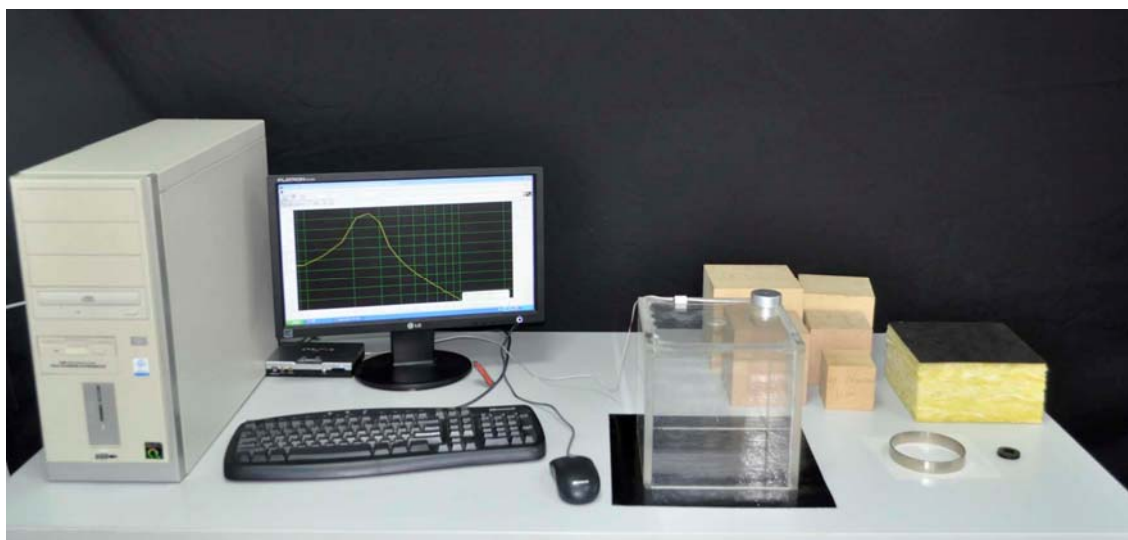
Na slici V6.6 prikazana je blok-šema postavke u kojoj se meri rezonantna kriva rezonatora. Za njenu realizaciju koristi se sledeća oprema:

12. računar sa odgovarajućim softverom za reprodukciju signala
13. audio interfejs (AD/DA konvertor)
14. pojačavač snage
15. zvučnik
16. rezonator
17. mikrofonski

Brojevi u slici odgovaraju brojevima sa spiska opreme. Na slici V6.7 prikazana je fotografija merne postavke u laboratoriji.



Slika V6.6 Blok-šema postavke za merenje rezonantne krive Helmholtcovog rezonatora



Slika V6.7 Fotografija merne postavke u laboratoriji

Zadatak u ovoj vežbi je da se analizom signala snimljenog u zvučnom polju unutar kutije za vreme spoljašnje zvučne pobude odredi rezonantna frekvencija rezonatora. Na osnovu toga potrebno je odrediti vrednosti akustičke kapacitivnosti, akustičke induktivnosti, akustičke otpornosti i korekciju dužine otvora l_{ef} , ako se zna da je akustička kapacitivnost komore čija je zapremina V :

$$C_a = \frac{V}{\rho c^2}$$

i akustička induktivnost otvora:

$$m_a = \frac{\rho l}{S}$$

gde je l dužina otvora, a S poprečni presek otvora. Rezonantna frekvencija rezonatora je:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{m_a C_a}}, \quad \text{to jest} \quad f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{m_a C_a}}$$

Q faktor ovakvog kola je:

$$Q = \frac{\omega_r R_a}{L} = \frac{\omega_r}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{f_r}{f_2 - f_1}$$

gde su f_r rezonantna frekvencija rezonatora, f_1 i f_2 donja i gornja granična frekvencija propusnog posega. Ove frekvencije se mogu očitati sa snimljene rezonantne krive.

V6.2 ODREĐIVANJE NEPOZNATE ZAPREMINE

Menjanjem unutrašnje zapremine komore menja se vrednost njegove rezonantne frekvencije. Zahvaljujući tome mogu će je u komoru rezonatora uneti neki predmet i na osnovu promene rezonantne frekvencije izračunati njegovu zapreminu, jer se time smanjuje zapremina komore rezonatora, a time i akustički kapacitet. U vežbi se na ovakav način određuje zapremina priloženih predmeta (drvene kocke).

Na osnovu prethodno izračunatih parametara Helmholtzovog rezonatora potrebno je izvesti teorijsku krivu zavisnosti rezonantne frekvencije od promene zapremine komore. Kada se u komoru rezonatora unese neki predmet (drvena kocka) meri se promena rezonantne frekvencije koja pri tome nastaje. Koristeći prethodno određenu zavisnost rezonantne frekvencije od promene zapremine komore određuje se kolika je zapremina unetog predmeta.

Pošto su dimenzije svih priloženih drvenih kocki poznate, a time i njihove zapremine, uporediti prethodno izmerene vrednosti zapremine predmeta sa tačnim vrednostima i konstatovati odstupanja.

V6.3 ODREĐIVANJE UTICAJA PRISUSTVA POROZNOG MATERIJALA U KOMORI I NA OTVORU CEVI

Prisustvo apsorpcionog materijala u komori ili na otvoru cevi menja parametre Helmholtzovog rezonatora pa time i oblik rezonantne krive. Njegov uticaj se manifestuje promenama vrednosti akustičke otpornosti sa šeme na slici V6.1. Uticaj apsorpcionog materijala zavisi od pozicije unutra rezonatora, odnosno od akustičkog protoka na poziciji gde se on nalazi.

Uticaja apsorpcionog materijala na oblik rezonantne krive treba ispitati na nekoliko slučajeva. Kao apsorpcioni materijal u vežbi se koristi akustički filc i komad staklene vune. Najpre na otvor cevi staviti komad akustičkog filca i skicirati promenu krive selektivnosti. Zatim u komoru uneti komad apsorpcionog materijala i skicirati promenu krive selektivnosti. U komoru treba uneti toliko apsorpcionog materijala da se približno popuni 80 % ukupne unutrašnje zapremine.

V6.4 ANALIZA UTICAJA PROMENE POPREČNOG OTVORA CEVI

Analizirati promenu rezonantne krive rezonatora menjanjem dimenzija otvora. Promenom dimenzije otvora menja se vrednost akustičke induktivnosti sa slike V6.1. U vežbi se promena prečnika otvora cevi postiže ubacivanjem priloženog gumenog prstena. Na osnovu izmerene promene rezonantne frekvencije utvrditi promenu akustičke induktivnosti i promenu efektivne dužine otvora kona nastaje smanjenjem prečnika otvora.

Merenje treba ponoviti sa postavljenim akustičkim filcom preko otvora. Uporediti uticaj postavljenog filca na otvoru cevi za dva poprečna preseka cevi.

IZVEŠTAJ : AKUSTIČKI REZONATOR

V6.1 ODREĐIVANJE PARAMETARA AKUSTIČKOG KOLA HELMHOLCOVOG REZONATORA

12. Prikazati izračunate parametre ekvivalentnog električnog kola: akustičku kapacitivnost komore, akustičku induktivnost cevi, efektivnu dužinu cevi i Q faktor kola.

V6.2 ODREĐIVANJE NEPOZNATE ZAPREMINE

1. Prikazati teorijsku krivu zavisnosti zapremine komore i rezonantne frekvencije na osnovu izračunatih parametara ekvivalentnog kola.
2. Na grafiku teorijske zavisnosti zapremine i rezonantne frekvencije prikazati rezultate merenja unetih zapremina (za pet kocki) i uporediti ih sa stvarnim zapreminama kocki.

V6.3 ODREĐIVANJE UTICAJA PRISUSTVA POROZNOG MATERIJALA U KOMORI I NA OTVORU CEVI

1. Nacrtati rezonantne krive za :
 - a. slučaj prazne komore,
 - b. slučaj kada je u komoru ubačen materijal koji popunjava 30% prostora komore,
 - c. slučaj kada je u komoru ubačen apsorpcioni materijal koji ispunjava 80% zapremine komore,
 - d. slučaj kada je filc postavljen preko otvora komore.

V6.4 ANALIZA UTICAJA PROMENE POPREČNOG OTVORA CEVI

1. Dodavanjem gumenih umetaka menjati veličinu otvora. Na osnovu izmerene frekvenicije rezonance odrediti efektivnu dužinu kanala u slučaju kada je na otvor postavljen gumeni uložak.
2. Skicirati promenu rezonantne krive u slučaju dve veličine otvora na koji je postavljen filc.

PITANJA ZA RAZMIŠLJANJE

1. Da li se može meriti spoljna zapremina predmeta koji su porozni?
2. Konstatovati kada je veća promena oblika rezonantne krive rezonatora: sa apsorpcionim materijalom postavljenim u komoru ili na sam otvor cevi.
3. U kom slučaju je veće procentualno povećanje dužine cevi: kod većeg ili kod manjeg otvora?

VEŽBA BROJ 7

ELEKTROAKUSTIČKI PRETVARAČI

Ovaj blok laboratorijskih vežbi bavi se tehnikama merenja karakteristika elektroakustičkih pretvarača. Prvi deo vežbe posvećen je analizi rada elektrodinamičkog zvučnika. U okviru tog dela vežbe demonstrira se jedna tehnika merenja frekvencijske karakteristike i karakteristike usmerenosti zvučnika. Merenja se vrše u modelu anehoične prostorije. Zatim se meri ulazna impedansa zvučnika. Analiza rada zvučnika bazirana je na ekvivalentnim električnim šemama. Vežba ima za cilj da prikaže uticaj promene akustičkih i mehaničkih parametara na rad zvučnika kao elektroakustičkog pretvarača, a time i na njegovu ulaznu otpornost. Akustički i mehanički parametri su u kolu prikazani kao odgovarajuće akustičke i mehaničke impedanse. Drugi deo ove vežbe posvećena je mikrofonom sa promenljivom karakteristikom usmerenosti.

TEORIJSKI UVOD - ZVUČNICI

Elektroakustički pretvarači su uređaji koji u prenosu zvučnih informacija predstavljaju posrednike između akustičkog i električnog domena. Zajednička odlika pretvarača koji su u najširoj upotrebi je da se u procesu pretvaranja električne u akustičku energiju ili obratno vrši najpre pretvaranje u mehaničku energiju. Mehanička energija sadržana je u oscilovanju membrane koja je nezaobilazni element najvećeg broja elektroakustičkih pretvarača kojima se kontrolisano pretvara električna u akustičku ili akustička u električnu energiju. Mehaničke elemente svakog pretvarača čini membrana sa svojom masom i elastičnošću njenog vešanja. Na ukupan rad elektroakustičkih pretvarača, odnosno na funkciju prenosa utiču elementi njihovog električnog, mehaničkog i akustičkog dela. Uticaj svih tih elemenata u radu pretvarača opisuje se ekvivalentnim električnim kolom sa koncentrisanim parametrima u kome se pojavljuju ekvivalentne induktivnosti, kapacitivnosti i otpornosti iz svakog od ovih domena. Na primeru analize ulazne električne otpornosti elektrodinamičkog zvučnika moguće je analizirati uticaj različitih parametara.

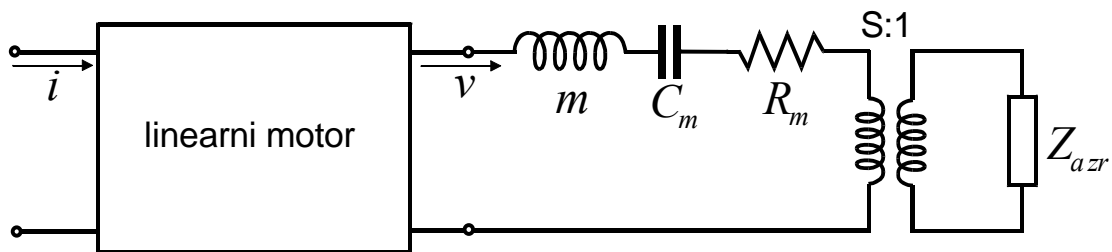
Rad elektroakustičkih pretvarača opisuje se sa nekoliko veličina od kojih su najvažnije frekvencijska karakteristika i karakteristika usmerenosti. Ove karakteristike se mere posebnim postupcima u kojima se obezbeđuju uslovi za posmatranje samo direktnog zvuka. Najčešće se takva merenja vrše u anehoičnim uslovima koji obezbeđuju prostiranje zvuka kao u slobodnom prostoru.

ELEKTRODINAMIČKI ZVUČNIK

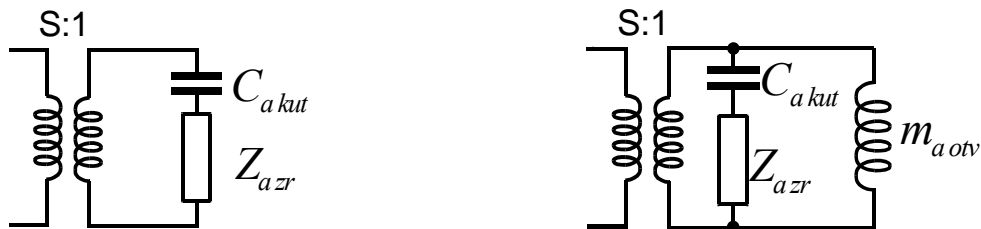
Elektrodinamički zvučnik predstavlja jedan složen sistem sastavljen od svog električnog, mehaničkog i akustičkog dela. Kada kroz namotaj kalema zvučnika protiče struja javlja se sila koja

pomera njegov kretni sistem za koji je fiksirana membrana. Na taj način se energija iz električnog domena pretvara u mehaničku energiju kretanja membrane. Membrana svojim kretanjem pomera molekule vazduha izvođeći ih iz ravnotežnog položaja i time stvara zvuk u okolnom vazduhu. Otpor kojim se sredina suprotstavlja kretanju membrane naziva se akustička impedansa zračenja. Njena veličina određuje koliki će se deo mehaničke energije kretanja membrane pretvoriti u akustičku energiju u vazduhu. Zbog malih vrednosti impedanse zračenja koeficijent korisnog dejstva zvučnika u vazduhu je relativno mali, samo par procenata.

Svi elementi koji čine električni, mehanički i akustički deo zvučnika utiču na rad zvučnika. Njihova međusobna interakcija može se predstaviti ekvivalentnom šemom i odgovarajućim četvoropolima kojim se modeluje pretvaranje jednog domena u drugi. Na slici V7.1 prikazana je ekvivalentna šema zvučnika ugrađenog u ploču.



Slika V7.1 Ekvivalentna šema zvučnika ugrađenog u ploču



Slika V7.2 Ekvivalentna šema akustičkog dela šeme zvučnika za slučaj kada je ugrađen u zatvorenu kutiju (levo) i u bas refleks kutiju (desno)

Na ekvivalentnim šemama pojavljuju se u mehaničkom delu kola mehanička induktivnost m koja je direktno proporcionalna masi membrane, zatim mehanička kapacitivnost C_m koja je proporcionalna krutosti vešanja membrane i neizbežni mehanički gubici modelovani mehaničkom otpornošću R_m . U akustičkom delu ekvivalentnog električnog kola pojavljuju se akustičke impedanse kao posledica postojanja zvučničke kutije i otvora na njoj (bas reflex kutija), kao i akustička impedansa zračenja. Završni deo ekvivalentne šeme zvučnika za slučaj kada je ugrađen u zatvorenu kutiju i bas reflex kutiju prikazani su na slici V7.2. Svi nabrojani elementi utiču na rad

pretvarača i promena pojedinih vrednosti može se detektovati posmatranjem ulazne impedance zvučnika.

Masa m membrane zvučnika ima najveći uticaj na donjoj graničnoj frekvenciji radnog opsega zvučnika. Kao posledica javlja se redna rezonanca (masa membrane i elastičnost njenog vešanja) u ekvivalentnom mehaničkom kolu na frekvenciji:

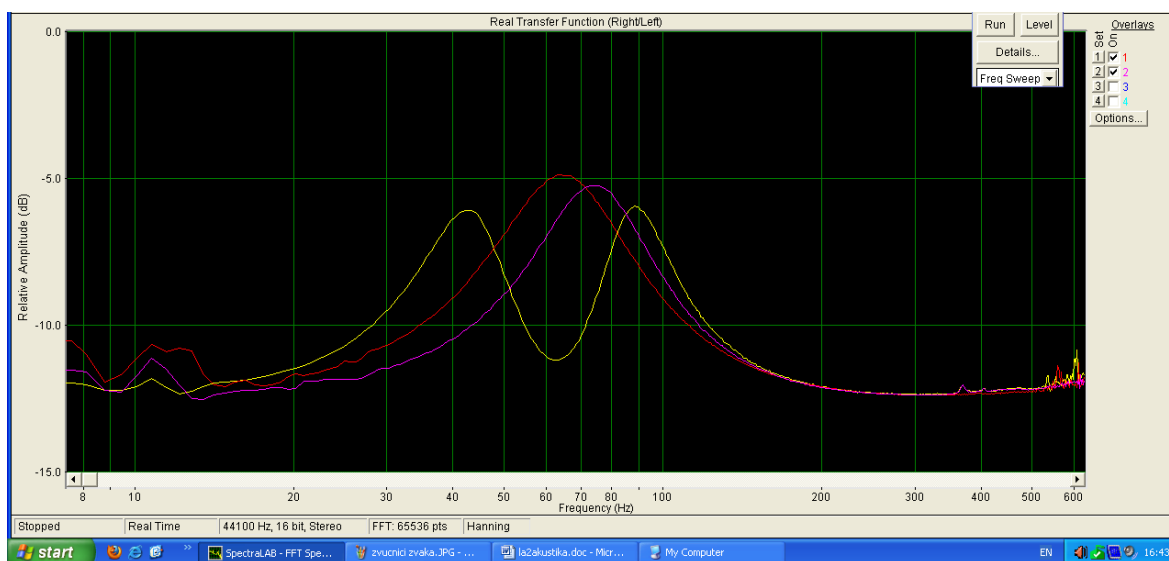
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_m m}}$$

Masa membrane može se menjati dodavanjem na neki pogodan način dodatne mase direktno na membranu, čime se smanjuje rezonantna frekvencija i širi radni opseg zvučnika. Mase membrane su realtivno male, pa je jedan od načina za njihovo merenje indirektno preko merenja promene frekvencije rezonance mehaničkog kola kada se na membranu doda poznata masa.

Zvučnik neugrađen u kutiju radi kao akustički dipol. Prednja i zadnja strana membrane rade u protiv fazi, što kao posledicu ima zonu u zvučnom polju gde se njihovo zbirno zračenje poništava. Ugrađivanje zvučnika u kutiju nastalo je kao posledica potrebe da se onemogući superponiranje korisnog zračenja prednje strane membrane sa protivfaznim zračenjem zadnje strane. Kao posledica takvog ugrađivanja u ekvivalentnom kolu pojavljuje se akustička kapacitivnost koja je srazmerna zapremini kutije. Ova kapacitivnost kada se preslika u mehanički deo ekvivalentnog kola postaje još jedna redno vezana kapacitivnost koja utiče na rednu mehaničku rezonantnu frekvenciju na taj način što je pomera ka višim frekvencijama. Ugrađivanjem zvučnika u kutiju smanjuje se se radni opseg zvučnika u kome on ostvaruje ravnu frekvencijsku karakteristiku. Potrebno je da kutija ima dovoljno veliku zapreminu da se ne bi ugrozila granična frekvencija samog zvučnika.

Da bi se povećalo zračenje na najnižim frekvencijama i proširio opseg njegovog rada, zvučnici se ugrađuju u takozvanu bas reflex kutiju. Takva kutija ima jedan otvor koji se modeluje kao akustička impedansa induktivnog karaktera sa gubicima i koja u ekvivalentno kolo unosi dodatnu rezonancu u paraloj grani (slika V7.2).

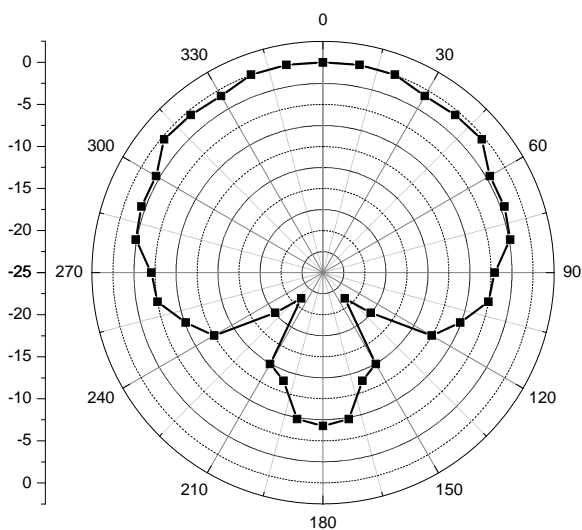
Zvučnik, kao jedan kontrolabilni elektroakustički pretvarač treba da ima funkciju prenosa takvu da ne menja karakteristike signala koji mu se dovode na ulaz. Drugim rečima pri konstrukciji zvučnika cilj je ostvarivanje što ravnije frekvencijske karakteristike u radnom opsegu zvučnika. Frekvencijska karakteristika zvučnika meri se na neki od standardnih načina za merenje funkcije prenosa sistema. Zvučnik se tada pobuđuje nekim širokopojsnim signalom koji može biti beli šum i sinusni *sweep* signal. Promene koje nastaju u radu zvučnika različitim ugrađivanjem ilustrovane su na slici V7.3



Slika V7.3 Ulazna impedansa zvučnika za slučaj različitih ugrađivanja: crvena linija - zvučnik slobodan, neugrađen u kutiju; ljubičasta linija – zvučnik ugrađen u zatvorenu kutiju; žuta linija – zvučnik ukrađen u bas-reflex kutiju.

Zvučnici kao izvori zvuka konačnih dimenzija poredljivi sa talasnim dužinama zvuka koji emituju pokazuju usmerenost zračenja koja je frekvencijski zavisna. Na višim frekvencijama, gde dimenzije membrane postaju velike u odnosu na talasnu dužinu emitovanog zvuka, različiti delovi membrane mogu se posmatrati kao tačkasti zvučni izvori, a zvučni pritisak u polju kao rezultat superpozicije zračenja mnoštva tačkastih izvora. Kao posledica ovog superponiranja zvučnik na višim frekvencijama postaje usmereni zvučni izvor koji na jednakim rastojanjima u različitim pravcima ne daje isti zvučni pritisak. Ova osobina zvučnih izvora opisuje se karakteristikom usmerenosti koja se prikazuje u obliku polarnih dijagrama, za oktavne ili trećinsko oktavne opsege. Na slici V7.4 je prikazan polarni dijagram usmerenosti jednog zvučnika na frekvenciji 5 kHz. Dijagram je dobijen merenjima u okviru laboratorijske vežbe.

Preduslov za merenje karakteristika zračenja zvučnika je postojanje uslova prostiranja kao u slobodnom prostoru. To je prostor u kome ne postoje refleksije. On predstavlja jednu idealizaciju, pošto u realnosti takvi uslovi ne postoje. Slobodni prostor podrazumeva da je fizički prostor u kome se prostora zvuk neomeđen preprekama u svim pravcima, što je u realnosti nemoguće ostvariti, jer čak iako se sve moguće prepreke prostiranju zvuka otklone, ostaje tlo kao neminovnost. Bez obzira na to čime je tlo pokriveno, to je jedan diskontinuitet na kome se javlja refleksija zvuka, i koja svojom pojavom usložnjava zvučno polje.



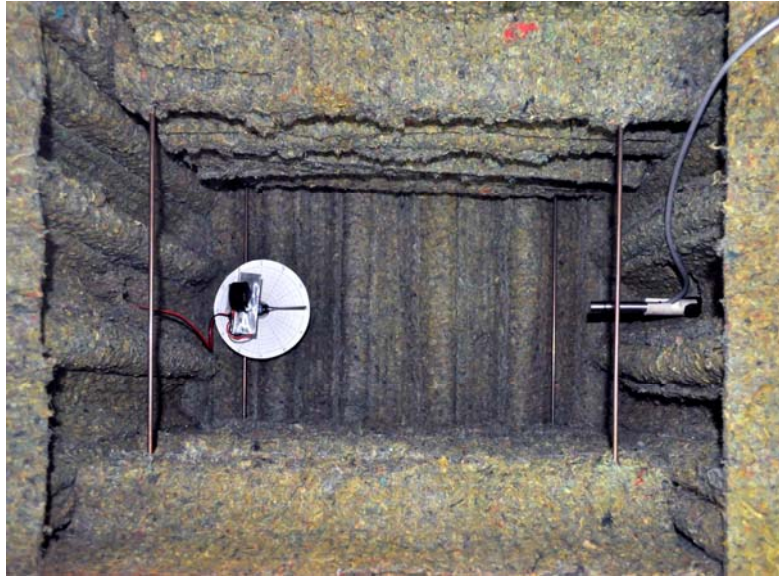
*Slika V7.4 Dijagram zračenja
jednog zvučnika na 5 kHz*

Idealan slobodni prostor se može realizovati samo u laboratorijskim uslovima. U te svrhe se uređuju posebne prostorije tako što se svih šest površina pokrivaju materijalima i konstrukcijama koje efikasno apsorbuju zvuk. Takva prostorija se naziva anehoična prostorija, a u žargonu uobičajeno nazvana "gluva soba". Tako je anehoična prostorija jedino mesto gde je, mada samo u laboratorijskim uslovima, realizovan slobodan prostor u kome nema pojave refleksija.

Anehoične prostorije se koriste u laboratorijama za ispitivanje raznih izvora zvuka, jer u njoj u svakoj tački postoji samo direktan zvuk iz izvora. Najčešća primena anehoičnih prostorija je za testiranje zvučnika i mikrofona, ali se takođe može meriti i zvučna snaga izvora (mereći intenzitet po nekoj postavljenoj zatvorenoj površini oko njega), itd.

U anehoičnim uslovima do mikrofona dospeva samo direktan zvuk, što je neophodno kada se vrši snimanje karakteristike mikrofona i zvučnika, jer su tu obezbeđeni uslovi da se analizira samo direktan zvuk koji dospeva do mikrofona.

U slučaju malih zvučnika koji rade samo na višim frekvencijama merenja se mogu vršiti i na fizičkim modelima anehoičnih prostorija. Izgled unutrašnjosti modela anehoične prostorije u kojoj je postavljena merna postavka za merenje frekvencijske karakteristike i karakteristike usmerenosti zračenja zvučnika prikazan je na slici V7.5. Na slici se u desnom delu vidi merni mikroskop, a u levom delu mali visokotonski zvučnik na obrtnom postolju. Ovom konfiguracijom simulirana je realna merna postavka za merenje karakteristika zračenja zvučnika. U realnim uslovima zvučnik se postavlja na obrtno postolje, a merni mikroskop na 1 m rastojanja u osi zvučnika.



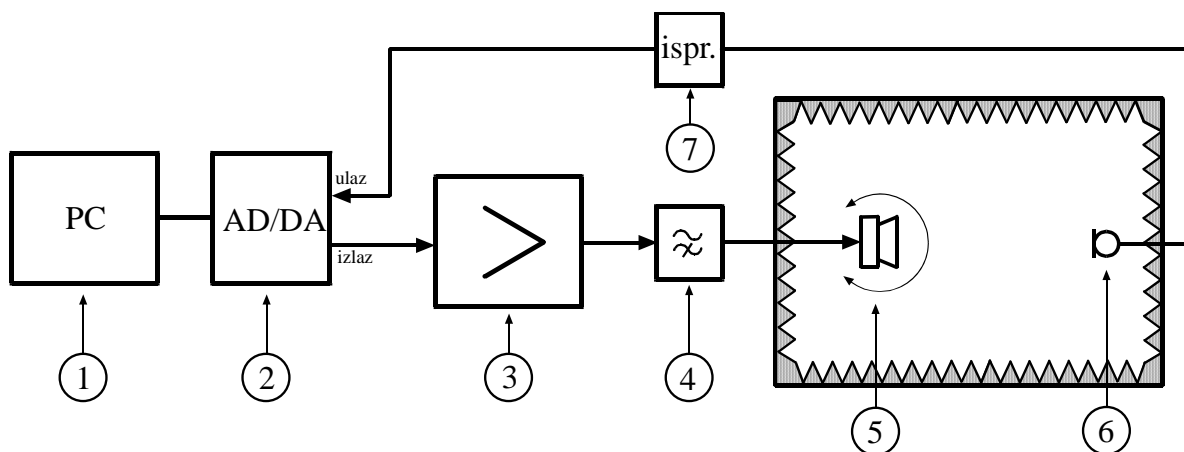
Slika V7.5 Izgled unutrašnjosti modela anehoične prostorije u kojoj se u okviru vežbe vrše snimanja karakteristika zračenja visokotonskog zvučnika.

V7.1 MERENJE FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE ZVUČNIKA

Na slici V7.6 prikazana je blok-šema postavke vežbe u okviru koje se meri frekvencijska karakteristika i karakteristika usmerenosti jednog zvučnika. Za realizaciju vežbe koristi se sledeća oprema:

1. računar sa odgovarajućim softverom za analizu
2. audio interfejs (AD/DA konvertor)
3. pojačavač snage
4. zvučnička skretnica
5. zvučnik koji se ispituje
6. merni mikrofonski
7. ispravljač za merni mikrofonski

Brojevi u slici odgovaraju brojevima sa spiska opreme. Na slici V7.7 prikazana je fotografija postavke vežbe u laboratoriji.



Slika

V7.6 Blok-šema merne postavke za merenje frekvencijske rakteristike i karakteristike usmerenosti zvučnika

Merni signal se emituje iz programa. Preko pojačavača snage signal se dovodi na zvučnik koji je smešten na posebnom obrtnom držaču u modelu anehoične prostorije. U istom modelu, na suprotnoj strani, nalazi se merni mikروفon. Za njegov rad neophodno je napajanje, što se postiže odgovarajućim ispravljačem, kroz koga signal prolazi do ulaza u računar. Između pojačavača snage i zvučnika postavljena je zvučnička skretnica da bi se ograničio frekvencijski opseg pobudnog signala.

Postupak merenja frekvencijske karakteristike podrazumeva da se na zvučnik šalje signal širokog spektra, beli ili roze šum, a mikrofonom se beleži dobijeni signal. Spektar signala koji je zabeležen mernim mikrofonom (ravne frekvencijske karakteristike) predstavlja frekvencijsku karakteristiku zvučnika. Roze šum je pogodan za analizu frekvencijske karakteristike zvučnika koja je dobijena analizom filtrima sa procentualno konstantnim propusnim opsegom (oktavni, 1/3 oktavni, 1/12 oktavni filtri).

V7.2 MERENJE KARAKTERISTIKE USMERENOSTI ZRAČENJA ZVUČNIKA

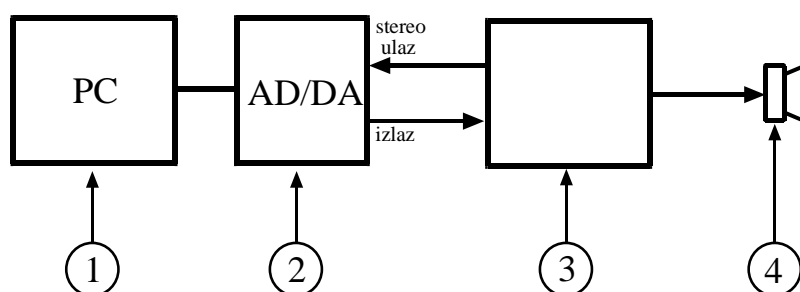
Snimanje karakteristike usmerenosti zvučnika je po svojoj prirodi snimanje frekvencijske karakteristike za različite uglove ose zvučnika i ose mernog mikrofona. Karakteristike usmerenosti se prikazuju za pojedine frekvencijske opsege (oktavne ili 1/3 oktavne). Zato je pogodno meriti frekvencijsku karakteristiku zvučnika u odgovarajućim opsezima. Očitavanjem vrednosti nivoa spektralne komponente u posmatranom opsegu za različite uglove zvučnika dobijaju se potrebni podaci za formiranje polarnih dijagrama njegovog zračenja.

V7.3 MERENJE ULAZNE IMPEDANSE ZVUČNIKA

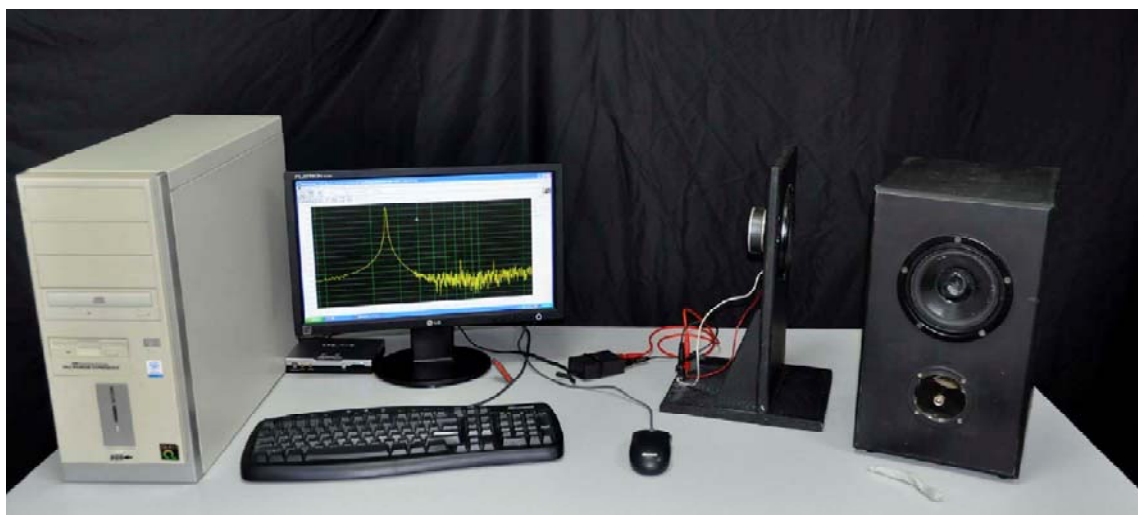
Na slici V7.7 prikazana je blok-šema postavke vežbe za merenje ulazne imedanse zvučnika. Za realizaciju vežbe koristi se sledeća oprema:

1. računar sa odgovarajućim softverom za analizu
2. audio interfejs (AD/DA konvertor)
3. razdelnik napona
4. zvučnik

Brojevi u slici odgovaraju brojevima sa spiska opreme. Na slici V7.8 prikazana je fotografija postavke vežbe u laboratoriji.



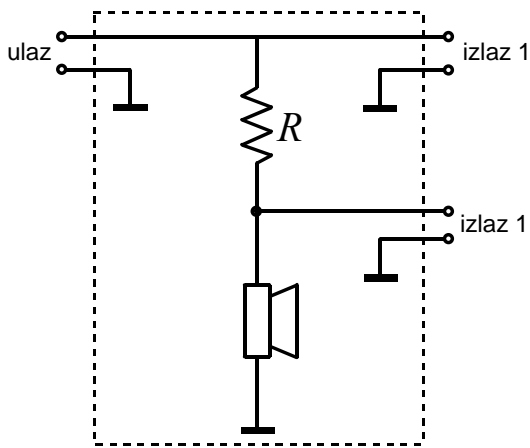
Slika V7.7 Blok-šema merne postavke za merenje ulazne impedanse zvučnika



Slika V7.8 Merna postavka za merenje ulazne impedanse zvučnika.

Pri merenju se koriste dva zvučnika. Isti model zvučnika ugrađen je u ploči i u kutiju, kao što se vidi na slici V7.8. Kutija ima mogućnost otvaranja kanala, čime može funkcionisati kao zatvorena kutija ili kao bas refleks kutija. Zvučnik se pobuđuje iz računara preko razdelnika napona u kome jednu

impedansu čini otpornik, a drugu zvučnik. Šema razdelnika napona prikazana je na slici V7.9. Zvučnik se može pobuđivati belim šumom ili sinusnim *sweep* signalom. Signali sa razdelnika napona se preko linijskog ulaza vraćaju u računar. Na osnovu dva signala sa razdelnika napona određuje se ulazna impedansa zvučnika.



Slika V7.9 Šema razdelnika napona koji se koristi u vežbi.

Ispitivanje uticaja promene akustičkih parametara na ulaznu otpornost vrši se merenjem ulazne električne otpornosti zvučnika kada je ugrađen u ploču, u kutiju i bas refleks kutiju. Bas refleks kutija formira se skidanjem poklopca sa otvora koji postoji na kutiji. Frekvencijska zavisnost impedanse zvučnika u zoni donje granične frekvencije odlikuje se rezonantnom frekvencijom. Ugradnjom zvučnika u kutiju ekvivalentna kapacitivnost kutije utiče na promenu frekvencije rezonance mehaničkog sistema zbog preslikavanja akustičke kapacitivnosti u ekvivalentno mehaničko kolo. Frekvencija rezonance zbog smanjenja ukupne kapacitivnosti pomera se ka višim vrednostima i time smanjuje radni opseg zvučnika. Pretvaranjem kutije u bas refleks kutiju dodaju se novi induktivni elementi u ekvivalentno kolo, što za posledicu ima pojavu složenije frekvencijske zavisnosti u obliku dva maksimuma (slika V7.3).

Ispitivanje uticaja mehaničkih parametara na ulaznu otpornost zvučnika može se postići dodavanjem mase na membranu zvučnika. U vežbi je na raspolaganju „živa guma“ čiji komadi se mogu lepiti na membranu. Povećanje mase membrane menja rezonancu ulazne impedanse na nižim frekvencijama. Na osnovu promene rezonantne frekvencije moguće je odrediti masu mebrane kada je poznata dodata masa. Ovakav postupak se koristi kao jedan od postupaka određivanja ugrađene mase membrane u proizvodnji zvučnika, jer je taj podatak važan za proračun karakteristika zvučnika. Proračun mase membrane zasniva se na izračunavanju rezonantne frekvencije po obrascu:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_m m}},$$

gde je m masa membrane, a C_m elastičnost vešanja.

IZVEŠTAJ : MERENJE KARAKTERISTIKA ZVUČNIKA

V7.1 MERENJE FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE ZVUČNIKA

Izveštaj treba da sadrži:

13. Prikaz frekvencijske karakteristike zvučnika u opsegu od 2 kHz do 16 kHz, linearno
14. Prikaz frekvencijske karakteristike zvučnika u opsegu od 2 kHz do 16 kHz, oktavno
15. Prikaz frekvencijske karakteristike zvučnika u opsegu od 2 kHz do 16 kHz, 1/3 oktavno

V7.2 MERENJE KARAKTERISTIKE USMERENOSTI ZVUČNIKA

Izveštaj treba da sadrži:

1. Tabelarni prikaz rezultata merenja nivoa zvuka na mestu mikrofona na frekvencijama 5 kHz, 10 kHz i 15 kHz za različite uglove (uglove menjati sa korakom od 15 stepeni).
2. Polarne dijagrame zračenja zvučnika na frekvencijama 5 kHz, 10 kHz i 15 kHz.

V7.3 MERENJE ULAZNE IMPEDANSE ZVUČNIKA

Izveštaj treba da sadrži:

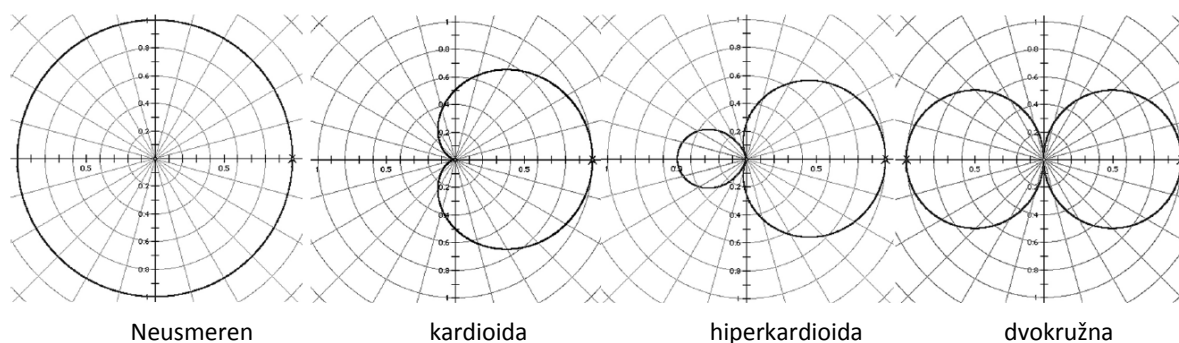
1. Prikaz frekvencijske zavisnosti ulazne impedanse zvučnika kada je:
 - a. Ugrađen u ploču
 - b. Ugrađen u kutiju
 - c. Ugrađen u bas refleks kutiju
2. Tabelarni prikaz frekvencije rezonance za tri prethodna slučaja
3. Prikaz promene frekvencijske karakteristike ulazne impedanse kada je na zvučnik ugrađen u kutiju postavljena dodata masa
4. Proračun mase mebrane zvučnika kada se na nju doda poznata masa od 5 g.

PITANJA ZA RAZMIŠLJANJE

1. Objasniti kako se međusobno razlikuju karakteristike usmerenosti zvučnika velikih i malih dimenzija.
2. Objasniti sa ekvivalentne šeme ulogu otvora na bas refleks kutiji.
3. Kako bi produženje cevi u otvoru bas refleks kutije delovalo na rezonantnu frekvenciju zvučničkog sistema?

V7.4 MERENJE USMERENOSTI MIKROFONSKOG SISTEMA SA PROMENLJIVOM KARAKTERISTIKOM USMERENOSTI

Jedna od važnih karakteristika mikrofona je njihova usmerenosti, koja predstavlja promenu osetljivosti sa uglom nailaska zvuka. Prema karakteristici usmerenosti vrši se akustička podela mikrofona na presione, gradijentne i kombinovane. Razlike u karakteristikama usmerenosti posledica su načina na koje zvučno polje deluje na membranu mikrofona. Na slici V7.10 prikazani su osnovni oblici usmerenosti mikrofona.



Slika V7.10 Osnovni oblici usmerenosti mikrofona

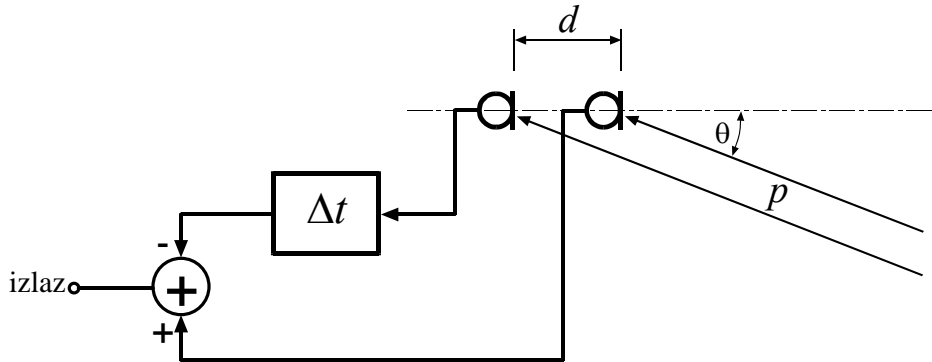
Presioni mikrofoni imaju neusmerenu karakteristiku koja je posledica činjenice da je kretanje membrane mikrofona srazmerno zvučnom pritisku. Pošto je pritisak skalarna veličina, membrana ima neusmerenu karakteristiku, odnosno ne favorizuje ni jedan pravac nailaska zvučnih talas. Na višim frekvencijama kućište mikrofona može da unese izvesnu usmerenost usled difrakcije na njemu kao prepreci u zvučnom polju.

Gradijentni mikrofoni imaju konstrukciju koja omogućava da membrana bude izložena zvučnom pritisku sa obe njene strane. Tada je kretanje membrane posledica razlike pritiska na njenim stranama, odnosno gradijenta pritiska. Ovakvi mikrofoni imaju dvokružnu karakteristiku koja se može opisati funkcijom $\Gamma(\theta) = \cos(\theta)$.

Kombinovani mikrofoni nastaju kao kombinacija neusmerenog i gradijentnog mikrofona. Sabiranjem signala jednog neusmerenog, presionog mikrofona i jednog dvokružnog koji se nalaze u istoj tački dobija se karakteristika usmerenosti koja se naziva kardioida.

U praktičnoj realizaciji gradijentnog i kombinovanog mikrofona umesto jedne membrane koriste se dve membrane, odnosno dva nezavisna mikrofona čiji se izlazni signali na odgovarajuće načine sabiraju. Principijelna šema takve kombinacije prikazana je na slici V7.11. Usmereni mikrofoni se sastoje iz dva neusmerena mikrofona istih karakteristika koji se nalaze na rastojanju d jedan od

drugog. Signal daljeg mikrofona $R(t)$ zakašnjen je za vreme τ i takav se oduzima od signala bližeg mikrofona $F(t)$.



Slika V7.11 Principijelna šema kombinacije dva neusmerena mikrofona kojom se postiže usmerenost takvog sistema.

Može se pokazati da je izlaz mikrofona:

$$Y(f, \theta) = S(f) \left(1 - e^{-j2\pi f(\tau + T \cos \theta)} \right) \quad (1)$$

gde je θ ugao pod kojim zvucni talas nailazi na mikrofona, f je frekvencija, $T = d/c$ je vreme kašnjenja zvuka od jednog do drugog mikrofona usled propagacije, d je udaljenost između mikrofona i c je brzina prostiranja zvuka. Realni deo gornje formule je:

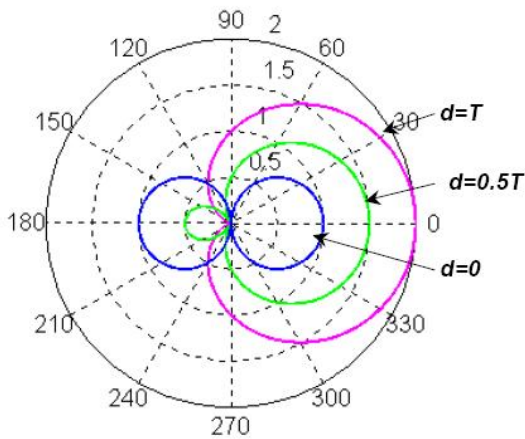
$$|Y(f, \theta)| = 2 \left| S(f) \sin \frac{2\pi f(\tau + T \cos \theta)}{2} \right| \quad (2)$$

Pošto je rastojanje d između dva mikrofona malo, važi aproksimacija ($fd/c \ll 1$) i pri tome je i uneto kašnjenje malo ($\tau \ll T$), onda je:

$$|Y(f, \theta)| = 2\pi f |S(f)(\tau + T \cos \theta)| = 2\pi f T |S(f)| P(\theta) \quad (3)$$

$$P(\theta) = \left| \tau / T + \cos \theta \right|$$

gde je $P(\theta)$ usmerenost mikrofona. Menjanjem kašnjenja τ , (elektronski ili akustički) između 0 i T moguće je dobiti različite karakteristike mikrofona. Na primer, za vrednost $\tau = 0$ dobija se dvokružna karakteristika, za $\tau = T$ kardioidna karakteristika, a za $\tau = T/2$ superkardioida. Na dijagramu su prikazane usmerenosti za date vrednosti τ .

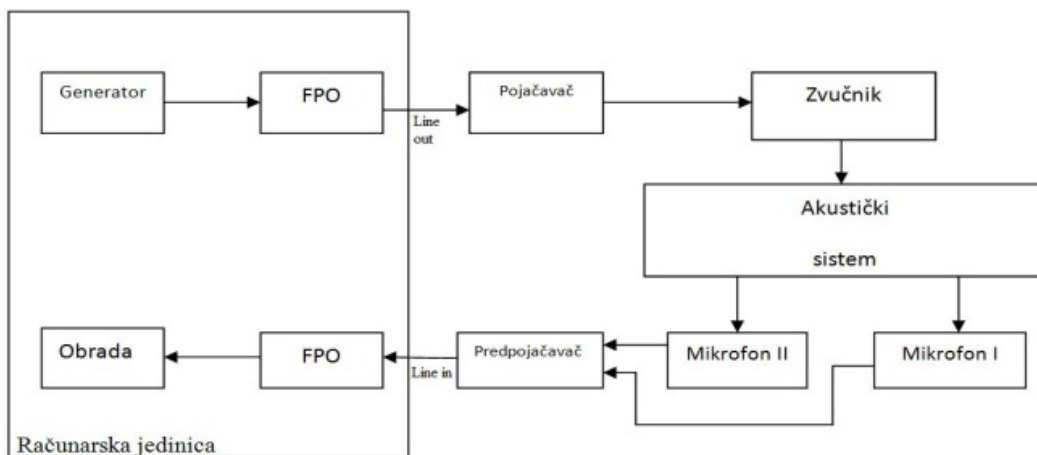


Slika V7.12 Oblici usmerenosti za različite vrednosti τ .

Iz izraza (3) i slike V7.12 vidi se da se menjanjem τ od 0 do T može kontrolisati neusmereni deo od 90 do 270 stepeni. Neusmereni deo se ne može premestiti u prednju zonu, pa na taj način zvuk koji dolazi sa prednje strane pod uglom θ od -90 do 90 stepeni ne može se poništiti.

Akustički usmereni mikrofoni su bazirani na istom principu ali su implementirani uz pomoć akustičkih sredstava. U takvim mikrofona razlika u nivoima zvočnog pritiska u dve tačke detektuje se tako što se membrana mikrofona izloži prednjem i zadnjem portovima mikrofona. Kašnjenje se obično postiže pomoću srazlike u putanji zvuka na putu ka zadnjoj strani membrane i specijalnog poroznog materijala postavljenog između membrane i zadnje strane mikrofona.

Blok šema za realizaciju bidirekcionog mikrofona sa dva mikrofona prikazana je na slici V7.13. Svi delovi su označeni na slici.



Slika V7.13 Blok šema sistema

Na izlazu računarske jedinice, signal se pojačava i dovodi na zvučnik. Isti signal, kroz akustički sistem registruju dva omnidirekciona mikrofona. Predpojačavač vrši pojačanje mikrofonskog

signala. Izlaz predpojačavača simbolično je prikazan jednim izlazom, iako ima dva. Na slici V7.14(a,b,c,d) prikazan je fizički izgled bidirekcionog mikrofona i potrebnih uređaja za povezivanje u merni sistem za merenje karakteristike usmerenosti.



a)



b)



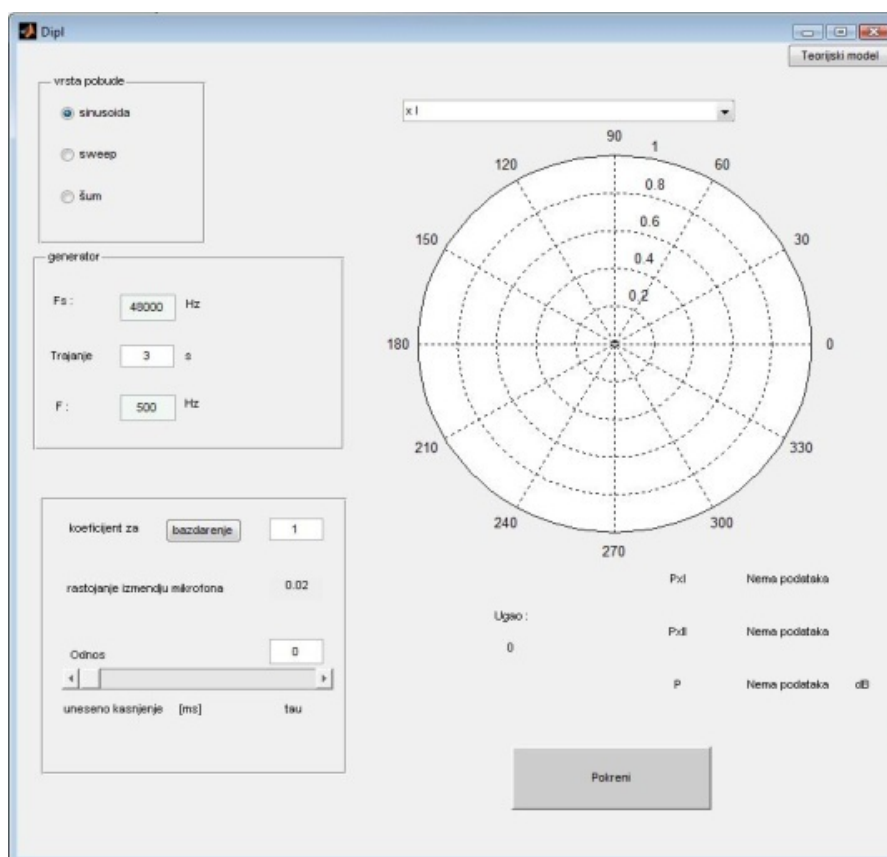
c)



d)

Slika V7.14 a) Hardverska realizacija sistema mikrofona sa promenljivom karakteristikom učestanosti; b) zvučnik i mikrofonski par u početnoj poziciji; c) pojačavač i pretpojačavač; d) mikrofonski par

Merenje karakteristike usmerenosti bidirekcionog mikrofona sa promenljivom karakteristikom realizuje se uz pomoć aplikacije koja je izvedena u MATLAB-u. Glavni prozor se može logički podeliti u četiri dela: deo za generator, deo za kašnjenje, grafički deo i deo za prikazivanje podataka. Izgled glavnog prozora prikazan je na slici V7.15.



Slika V7.15 – Izgled glavnog prozora za definisanje pobudnog signala

U delu za generator može se odabrati vrsta pobude: sinusoida, sweep signal ili filtrirani Gausov šum, kao i parametri signala tih pobuda. U polja F_s i F upisuje se frekvencija odabiranja i radna frekvencija, respektivno. U polje T se upisuje trajanje pobude. Povećanjem frekvencije odabiranja postiže se preciznije unošenje kašnjenja. Što je duža pobuda veća je i energija signala, pa je samim tim manji uticaj spoljašnjih faktora.

Deo za kašnjenje je glavni deo za pravljenje željene karakteristike. Kašnjenje se unosi preko odnosa τ i T , što direktno utiče na karakteristiku usmerenosti mikrofona. Pomeranjem slajdera ili unosom neke vrednosti može se videti koliko je kašnjenje uneto. Da bi se dobila željena karakteristika, neophodno je da oba mikrofona budu približno istih karakteristika, zbog toga je pre merenja neophodno izvršiti kalibraciju sistema. Pritiskom na dugme *baždarenje* pojaviće se obaveštenje o postavljanju mikrofona u odgovarajuću poziciju

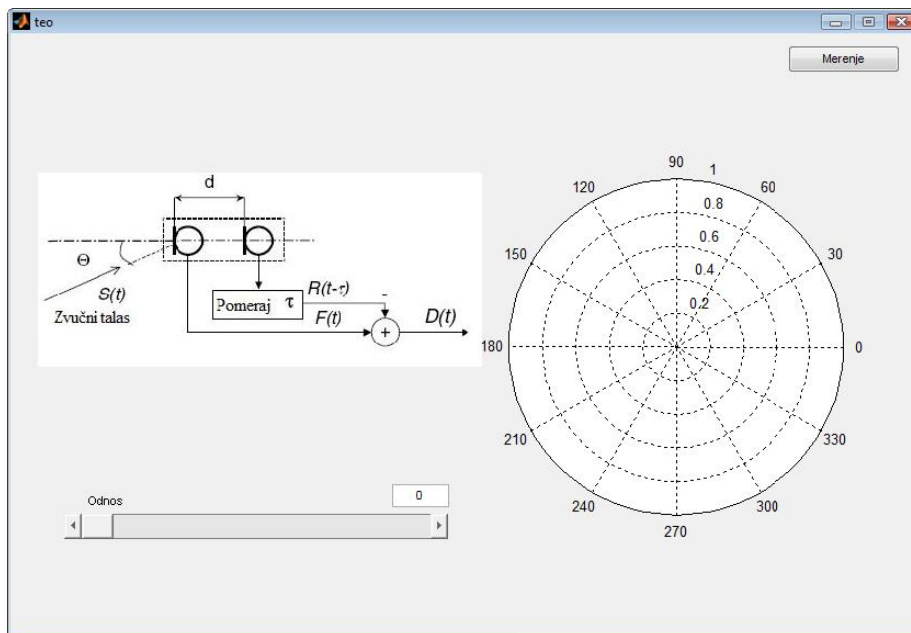
Pozicija za baždarenje predstavlja tako okrenut mikrofonski par da su oba mikrofona podjednako udaljeni od zvučnika tj. da zvučnik „leži“ u njihovoj osi (90°). Baždarenje se vrši na osnovu odabranih parametara u meniju kojim se definiše pobudni signal. Nakon izvršenog baždarenja, koeficijent će se najverovatnije promeniti, u zavisnosti od odnosa P_{xI} i P_{xII} , čije se vrednosti mogu očitati iz dela za prikaz podataka.

Nakon unetog željenog kašnjenja treba pokrenuti merenja. Najpre se pojavljuje obaveštenje korisniku da mikروفon treba postaviti u početnu poziciju. Početna pozicija je ona u kojoj zvučnik leži u osi mikrofonskog para (0°). Pritiskom na OK, počinje merenje. Za vreme merenja ne treba pomerati mikrofone.

Nakon prikupljenih podataka, korisnik se obaveštava da treba zarotirati mikروفon. U delu za prikaz podataka pojaviće se vrednost ugla na koji treba da se okrene mikrofonski par, snage mikrofona P_{xI} i P_{xII} kao i ukupna snaga združenih signala. Tek nakon pritiska na OK, snimanje se nastavlja i ponavlja se ovaj korak do kraja merenja.

Po završetku svih merenja pojaviće se obaveštenje da je merenje završeno i klikom na OK iscrtaće se karakteristika usmerenosti za odredjeni odnos k . Iz padajućeg menija iznad polarne karakteristike može se odabrati da li će se posmatrati karakteristika mikrofona I, mikrofona II ili karakteristika mikrofonskog sistema.

Za lakše shvatanje sistema, pritiskom na dugme *Teorijski model*, otvara se novi prozor, koji pokazuje idealan rad ovog sistema, te na osnovu ovog modela se može odrediti i za koje vrednosti odnosa τ i T , se dobija željena karakteristika



Slika V7.16 – Prozor u kome se prikazuje teorijski model mikrofonskog sistema

Odnos τ i T , za željenu karakteristiku, se može dobiti analitički, tako za bidirekcionu karakteristiku, čija je jednačina usmerenosti $\cos(\Theta)$, jasno je da odnos τ i T mora biti jednak 0, odnosno, ne unosi se kašnjenje u sistem.

Za hiperkardioidu je:

$$\Gamma(\vartheta) = 0.25 + 0.75 \cos \vartheta$$

Polarni obrazac se može izraziti na sledeći način:

$$\begin{aligned} \frac{\tau}{T} + \cos(\vartheta) &= \frac{\tau}{T} + \frac{4}{3} * 0,75 * \cos(\vartheta) = \\ &= \frac{4}{3} * \left[\frac{\tau}{T} * \frac{3}{4} + 0,75 * \cos(\vartheta) \right] \end{aligned}$$

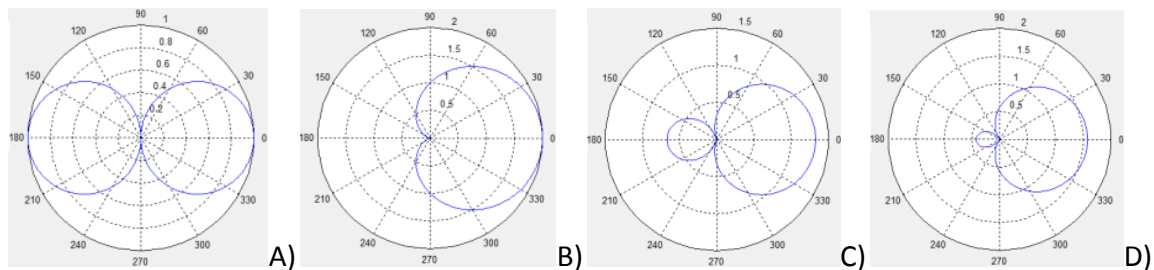
Da bi se dobila hiperkardioida neophodno je da slobodan član bude $\frac{1}{4}$, pa stoga

$$\frac{\tau}{T} * \frac{3}{4} = \frac{1}{4} \Rightarrow \frac{\tau}{T} = \frac{1}{3} = 0.33$$

Sličnim postupkom dobijamo odnose i za ostale karakteristike:

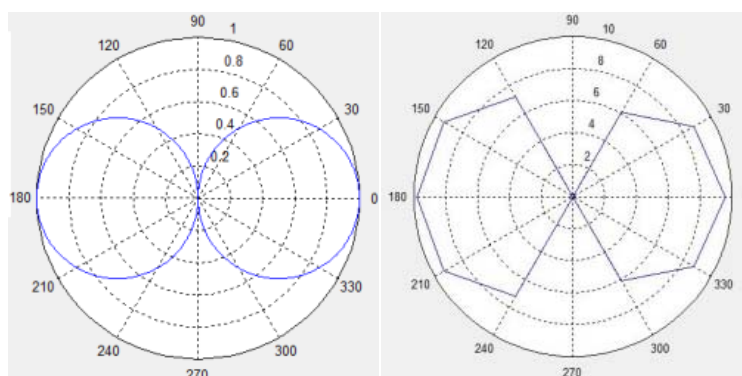
$$\begin{aligned} -\frac{\tau}{T} &= 0.58, \text{ za super kardioidu i} \\ -\frac{\tau}{T} &= 1, \text{ za kardioidu} \end{aligned}$$

i unošenjem ovih vrednosti odnosa u teorijski model, vizuelno se uverava u ovu tvrdnju. Ovo je prikazano na slici V7.17.



Slika V7.17 Izgled polarnih diajgrama za određen odnos τ i T ; A) $\frac{\tau}{T} = 0$ za dvokružnu, B) $\frac{\tau}{T} = 1$ za kardioidnu C) $\frac{\tau}{T} = 0.33$ hiperkardioidnu i D) $\frac{\tau}{T} = 0.58$ za superkardioidnu karakteristiku

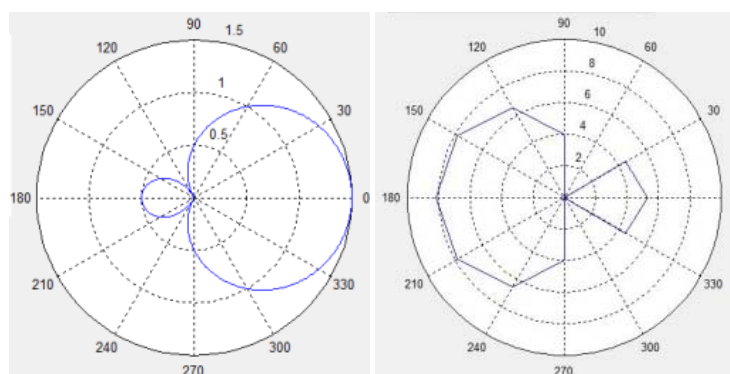
Realni uslovi prilikom merenja predstavljaju blagi žamor više govornika u okruženju koji paralelno rade vežbe i eventualno visok nivo ambijentalne buke ako je otvoren prozor. Na slici V7.18 prikazani su oblici usmerenosti izmereni u takvim uslovima.



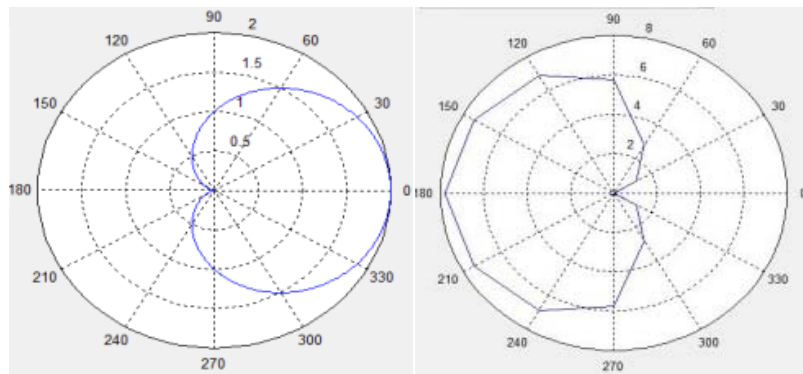
Slika V7.18 Izgled karakteristike usmerenosti za odnos 0: teorijski model sa leve strane; dijagram dobijen merenjem sa desne strane.

Na osnovu teoretskog modela vidi se da se za $\frac{\tau}{T} = 0$ dobija dvokružna karakteristika. Zadnja petlja izmerene karakteristike usmerenosti je nešto nižeg nivoa, verovatno zbog nižeg nivoa ambijentalne buke u trenutku merenja karakteristike.

Primer izmerene karakteristike za odnos 0,5 prikazan je na slici V7.19. Upoređujući karakteristiku dobijenu merenjem i karakteristiku teorijskog modela za ovaj odnos τ i T , dobija se karakteristika čija se nula nalazi na približno 120° u odnosu na pravac direktnog zvuka. Najzad, na slici V7.20 prikazan je rezultat koji se dobija za slučaj kardiodne usmerenosti.



Slika V7.19 Izgled karakteristike za odnos 0,5: teorijski model sa leve strane; dijagram dobijen merenjem sa desne strane.



Slika V7.20 - Izgled karakteristike za odnos 1: teorijski model sa leve strane; dijagram dobijen merenjem sa desne strane.

IZVEŠTAJ : MERENJE USMERENOSTI MIKROFONSKOG SISTEMA SA PROMENLJIVOM KARAKTERISTIKOM USMERENOSTI

Izveštaj treba da sadrži:

16. Prikaz dobijenih karakteristika usmerenosti za pobudu sinusnim signalom i tri vrednosti kašnjenja ($t/T=0$, $t/T=0.5$ i $t/T=1$) na frekvenciji 500 Hz i trajanju pobudnog signala od 3 s
17. Prikaz dobijenih karakteristika usmerenosti za pobudu sinusnim signalom i tri vrednosti kašnjenja ($t/T=0$, $t/T=0.5$ i $t/T=1$) na frekvenciji 1000 Hz i trajanju pobudnog signala od 3 s
18. Prikaz dobijenih karakteristika usmerenosti za pobudu sinusnim signalom i tri vrednosti kašnjenja ($t/T=0$, $t/T=0.5$ i $t/T=1$) na frekvenciji 2000 Hz i trajanju pobudnog signala od 3 s
19. Prikaz dobijenih karakteristika usmerenosti za pobudu sinusnim *sweep* signalom i tri vrednosti kašnjenja ($t/T=0$, $t/T=0.5$ i $t/T=1$) i trajanju pobudnog signala od 5 s
20. Prikaz dobijenih karakteristika usmerenosti za pobudu šumom i tri vrednosti kašnjenja ($t/T=0$, $t/T=0.5$ i $t/T=1$) i trajanju pobudnog signala od 5 s

PITANJA ZA RAZMIŠLJANJE

3. Šta bi se moglo postići sa usmerenošću sistema povećavanjem broja mikrofona?
4. Kako bi se na rezultat odrazilo smanjenje rastojanja između mikrofona?