



# ZAŠTO SE VRŠE MJERENJA?

Mjerenja u elektroakustici izvode se radi ispitivanja

- ❑ prirodnih zvučnih slika,
- ❑ ispitivanja naprava za stvaranje, primanje i reprodukciju zvuka, te
- ❑ za izračunavanje akustičkih svojstava medija kojima se širi zvuk.

Mjerenja možemo podijeliti na:

- ❑ **električna mjerenja**
- ❑ **akustična mjerenja**
- ❑ **fiziološka mjerenja**

## Akustična mjerenja (prikazali smo na vježbama)

- ❑ Mjerenje veličina zvučnog polja
- ❑ Mjerenje razine glasnoće zvuka
- ❑ Analiza zvuka
- ❑ Mjerenje vremena odjeka
- ❑ Mjerenje koeficijenta apsorpcije
- ❑ Mjerenje akustičke izolacijske moći pregrada

## Fiziološka mjerenja

### Mjerenja praga čujnosti – tonska audiometrija

Obavljaju se audiometrom koji se sastoji se od generatora sinusnog napona, kalibriranog potencijometra i slušalica. Uređaj se baždari umjetnim uhom i ispitivanjem osoba normalnog sluha



## Električna mjerenja

- ❑ Izlazna impedancija
- ❑ Ulazna impedancija
- ❑ Faktor pojačanja
- ❑ Linearnost pojačanja
- ❑ Frekvencijski odziv
- ❑ Frekvencijska širina pojasa
- ❑ Fazni odziv
- ❑ *Slew Rate*
- ❑ Maksimalni izlazni napon
- ❑ Mjerenja šuma
- ❑ Dinamičko područje
- ❑ Odnos signal/šum
- ❑ Ekvivalentni ulazni šum (EIN)
- ❑ Faktor potiskivanja zajedničkog signala (CMRR)
- ❑ Ukupno harmonijsko izobličenje (THD)
- ❑ Ukupno harmonijsko izobličenje + šum (THD+N)
- ❑ Preslušavanje
- ❑ Intermodulacijska izobličenja (IMD)
- ❑ Istosmjerni *offset*
- ❑ Q faktor
- ❑ Impulsni odziv
- ❑ Križna korelacija
- ❑ Ispitivanje elektroakustičkih pretvarača

# Tonska audiometrija (TA)

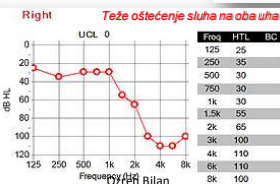
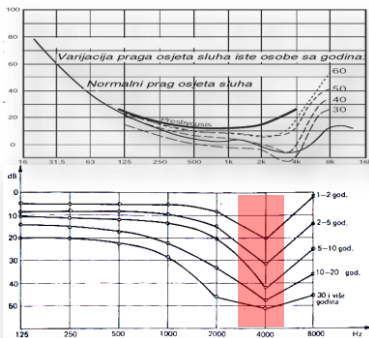
**Tonska audiometrija** znači **određivanje najmanje glasnoće čistog tona** kojeg ispitanik čuje (praga sluha).

Ispituje se uz pomoć tonskog audiometra sa slušalicama u za to predviđenoj audiometrijskoj kabini, tihoj komori.

Audiometrijska kabina izolirana je od vanjske buke.

Ispitivanje se provodi na nekoliko frekvencija, od niskih do visokih tonova. Dobivene točke se spajaju i tako se dobiva grafički prikaz praga sluha.

Na grafu je oblik krivulje *prezbiakuzije* uslijed izloženosti buci



Ispituje se **zračna vodljivost**, koja je prirodni način slušanja gdje zvuk zrakom kroz zvukovod dolazi na bubnjić i prenosi se dalje, te **koštana vodljivost** gdje se zvuk prenosi direktno na kost iza uha vibratorom i zaobilazi zvukovod, bubnjić i slušne koščiće.

Najmanja dob za tonsku audiometriju je po prilici tri godine, što varira od djeteta do djeteta. Vrlo je važno da tonsku audiometriju uzvodi audiološki tehničar, koji će prepoznati nehotično i hotično pogrešno pokazivanje praga sluha.

U prvom slučaju kod velikih razlika u pragu sluha između dva uha uključit će zaglušivanje boljeg uha (u protivnom ton pušten na bolesnom uhu čuje se na drugoj strani, pa se na bolesnoj strani dobiva *bolji* rezultat). U drugom slučaju prepoznaje ispitanika koji je spreman *lažirati* nalaz zbog koristi.

**Govorni audiogram** mjeri postotak razabiranja riječi u uvjetima bez i s pozadinskom bukom.

## Govorna audiometrija (GA)

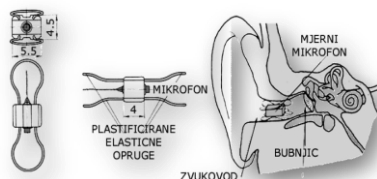
Dakle, umjesto čistog tona koristi se riječ koju ispitanik ponavlja. Mjeri se prag razabirljivosti, porast razabirljivosti porastom glasnoće i maksimalna razabirljivost.

Pretraga uključuje nekoliko razina duž slušnog puta od tonskog audiograma.

# Timpanometrija, timpanogram (TG)

U uho se postavlja sonda koja u sebi ima tri kanala:

- minijaturni zvučnik,
- mikروفон za snimanje vraćenog/reflektiranog zvuka i
- kanal kojim se mijenja tlak u zvukovodu s mjeracem.



**Timpanogram je krivulja koja pokazuje koliko se zvuka koji je pušten u zvukovod odbilo o bubnjić i vratilo u mikروفon.** U normalnim uvjetima tlak iza bubnjića mora biti jednak atmosferskom, što je znak dobre funkcije Eustahijeve tube, kanala koji spaja srednje uho s početnim dijelom ždrijela.

U zdravom uhu je najmanja refleksija zvuka od bubnjića kad je tlak u zvukovodu nepromijenjen. Ako iza bubnjića postoji negativan tlak (slabije radi E. tuba), optimalno područje provođenja zvuka postiže se tek kad u zvukovod primijenimo negativan tlak.

Očitavši taj tlak na uređaju indirektno, doznajemo tlak u srednjem uhu. Ako je iza bubnjića tekući sadržaj (sekret, gnoj, krv...), promjenom tlaka refleksija se ne mijenja, krivulja timpanograma je ravna. Dakle, **timpanometrija nije metoda mjerenja sluha, nego govori o tlaku u srednjem uhu i njegovoj podatljivosti** (elastičnost sistema bubnjić - slušne košćice). Pogodna je i za malu djecu jer nije potrebna suradnja. Ako postoji rupica na bubnjiću, timpanometrija se ne može izvesti. U tom slučaju se uz pomoć istog uređaja mjeri prohodnost Eustahijeve tube.

22.9.2013.

Ozren Bilan

7

## Kohleostapesni refleks (STAR-STApesni Refleks)

Uređaj za timpanometriju koristi se i za određivanje stapesnog refleksa. **Kad se u uho pusti zvuk određene jakosti, refleksno se stisne mišić u srednjem uhu i promijeni podatljivost (pomičnost, elastičnost) sistema slušnih košćica**, odnosno smanji provođenje zvuka prema unutarnjem uhu.

Smatra se da je riječ o zaštitnom refleksu od prevelike buke. Refleks se koristi u dijagnostičke svrhe jer se signal do mišića prenosi putem ličnog živca, pa se može odrediti je li oštećenje ličnog živca iznad ili ispod spomenutog mišića.

Kad je oštećenje sluha uzrokovano poremećajem receptora u pužnici, glasnoća zvuka potrebna za izazivanje refleksa je manja negoli je normalno. Takav podatak služi za određivanje mjesta oštećenja sluha. Ukrućenje slušnih košćica kod bolesti srednjeg uha također se otkriva stapesnim refleksom.

**Otoskleroza** je primjer takvog oboljenja, a predstavlja relativno čest uzrok izlječivog oštećenja sluha.

STAR se kao i timpanogram može izvesti bez suradnje ispitanika.

22.9.2013.

Ozren Bilan

8

# Evocirani slušni potencijali (*BERA, ABR, BSR...*)

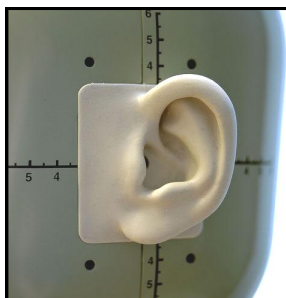
Za ispitivanje funkcije slušnog puta dalje **od uha prema mozgu**, koristi se snimanje pobuđenih potencijala moždanog debla.

Pretraga se provodi u zamračenoj tihoj komori ležeći. Ispitanik mora biti potpuno miran i opušten, a na glavi ima slušalice i sluša zvukove kratkog trajanja u nizu. Na oba uha ili iza njega, te na čelu ili ispod ruba kose na zatiljku ima zalijepljene elektrode.

Zvučni podražaj pobuđuje električne impulse u slušnom živcu, koji putuju prema mozgu. Živčane niti se prekapčaju u tzv. jezgrama, gdje postoje nakupine živčanih stanica. Kad impuls stigne u jezgru, odašilje se zajednički električni impuls većeg broja stanica, što se snima.

Mjerenjem vremena potrebnog za stizanje impulsa do određene jezgre procjenjuje se funkcija slušnog puta i donose zaključci o mogućim poremećajima. Kod navedenog snimanja koriste se glasni zvukovi, puno glasniji od praga sluha.

BERA se koristi i za traženje praga sluha kod osoba koje ne mogu surađivati, najčešće kod male djece. Dijete se mora prije snimanja pripremiti, da na pregled dođe umorno, jer se pretraga provodi na uspavanom djetetu. Prije početka se daje sredstvo za spavanje/umirenje.



## Screening *BERA*

**Screening *BERA*** je automatizirano snimanje kojim se s velikom sigurnošću potvrđuje **ima li osoba oštećenje sluha**.

Osoba mora biti mirna, a snimanje je mnogo kraće i jednostavnije od standardnog postupka.

Na glavu se prisloni slušalice s elektrodama i nije potrebno lijepljenje.

Ako je potrebna preciznija dijagnostika ili osoba nije prošla test automatizirane *BERA*-e, potrebno je standardno snimanje.

# Otoakustička emisija (OAE)

Otoakustička emisija (OAE) je novija pretraga, temeljena na zvuku stvorenom u pužnici, a snima se u tihoj komori. Postoji spontana emisija zvuka te nekoliko vrsta izazvane emisije. U uho se stavlja **sonda** sa zvučnikom i mikrofonom, a ispitanik ne mora ništa pokazivati.

Rezultat se očitava uz pomoć kompjutera.

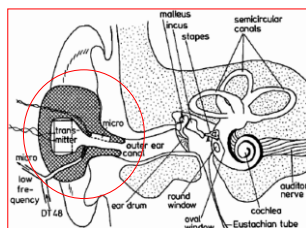
Otoakustička emisija dokazuje i **kohlearno pojačanje zvuka**. OAE su **zvukovi koji nastaju u kohlei, a mjere se na bubnjiću, nakon propagacije kroz srednje uho.**

OAE nastaje refleksijom kohlearnog putujućeg vala sa nepravilnosti kohlee ili uslijed nelinearnih elemenata koji uzrokuju izobličenja kohlee.

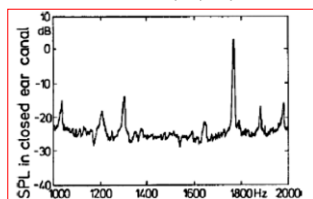
Izostanak otoakustičke emisije povezan je s oštećenjem receptora, osjetilnih stanica u pužnici. Pretraga služi za potvrdu receptorskog oštećenja, prije nego što ono postane vidljivo na tonskom audiogramu.

OAE se kao i BERA koristi u ranoj dijagnostici sluha u djece. U roditeljima se provodi sveobuhvatni probir novorođenčadi na oštećenje sluha otoakustičkom emisijom.

Ako osoba ne prođe test, odnosno pozitivna je na oštećenje sluha OAE, može se reći da oštećenje vjerojatno postoji, no ne može se reći koliko je. Dodatna obrada i BERA daju preciznije informacije.



Izgled **sonde** za mjerenje otoakustičke emisije i presjek uha



Izmjereni spektar otoakustičke emisije 11

# Električna mjerenja

- Izlazna impedancija
- Ulazna impedancija
- Faktor pojačanja
- Linearnost pojačanja
- Frekvijski odziv
- Frekvijska širina pojasa
- Fazni odziv
- Slew Rate
- Maksimalni izlazni napon
- Mjerenja šuma
- Dinamičko područje
- Odnos signal/šum
- Ekvivalentni ulazni šum (EIN)
- Faktor potiskivanja zajedničkog signala (CMRR)
- Ukupno harmonijsko izobličenje (THD)
- Ukupno harmonijsko izobličenje + šum (THD+N)
- Preslušavanje
- Intermodulacijska izobličenja (IMD)
- Istosmjerni offset
- Q faktor
- Impulsni odziv
- Križna korelacija
- Ispitivanje elektroakustičkih pretvarača

# Izlazna impedancija

Izlazna impedancija promatranog elektro-akustičkog uređaja ispituje se usporedbom izlaznog signala sa i bez tereta. Npr. ako kroz uređaj prosljedimo sinusni signal frekvencije 1 kHz i izmjerimo napon na izlazu, koji je jednak 0 dBV (1 Veff), uz pomoć osciloskopa bez priključenog tereta, a zatim izlaz opteretimo sa 600 oma i ponovno izmjerimo napon. Pretpostavimo da je napon oslabio za 6.02 dBV (0.5 Veff). U tom slučaju znamo da je izlazna impedancija uređaja 600 oma.

Priključenjem tereta na izlazu uređaja napravili smo naponski djelitelj kojeg čine izlazna impedancija uređaja i impedancija tereta. Kako je napon oslabio za 50%, znamo da je isti pad napona i na izlaznoj impedanciji uređaja. Dakle, izlazna impedancija uređaja, u ovom slučaju, jednaka je impedanciji tereta, a to je 600 oma. Što na teretu napon manje padne, to je niža izlazna impedancija. Današnje izlazne impedancije su vrlo niske i iznose oko 50 do 100 oma.

Jednadžba kojom možemo izračunati izlaznu impedanciju je:

$$Z_{OUT} = 600 [(V1/V2)-1]$$

gdje je:

- $Z_{OUT}$  je izlazna impedancija u omima
- $V1$  razina neopterećenog izlaza u V
- $V2$  razina izlaza opterećenog sa 600 oma

# Ulazna impedancija

Ulazna impedancija mjeri se slično kao i izlazna impedancija. U ovom slučaju koristimo ulaznu impedanciju uređaja da bi opteretili funkcijski generator s izlazom poznate impedancije; najčešće 600 oma.

Npr. ako generiramo signal frekvencije 1 kHz, napona 0 dBV na generatoru izlazne impedancije 600 oma, pa izlaz generatora oslabi za 6.02 dB, tada znamo da je ulazna impedancija uređaja (tj. teret na izlazu generatora) također 600 oma. Formula je

$$Z_u = 600 / [(V1/V2)-1]$$

Gdje je:

- $Z_u$  ulazna impedancija uređaja u omima
- $V1$  napon u V neopterećenog signal generatora funkcija sa 600 omskom izlaznom impedancijom
- $V2$  razina izlaznog signala istog generatora opterećenog ulaznom impedancijom uređaja kojeg mjerimo

# Faktor pojačanja

Pojačanje uređaja mjeri se usporedbom ulaznog i izlaznog napona.

Pojačanje se izražava faktorom ili u decibelima. Npr. na ulazu uređaja je napon od 1 kHz sinusni ton amplitude 100 mVeff, a na izlazu je 1 kHz sinusni ton amplitude 1 Veff.

Pojačanje je onda:

$$1 \text{ Veff} / 100 \text{ mVeff} = 1 / 0.1$$
$$\text{Pojačanje} = 10$$

u decibelima:

$$20 \log (1 \text{ Veff} / 100 \text{ mVeff})$$
$$20 \log (10)$$
$$\text{Pojačanje (dB)} = 20 \text{ dB}$$

# Linearnost pojačanja

Ako mjerimo uređaje čija osnovna namjena nije promjena dinamike signala (to su npr. kompresori, limiteri i ekspanderi dinamike) oni bi trebali imati **potpuno isto pojačanje signala bez obzira na razinu pobude**. Dakle, postavimo li takvom uređaju faktor pojačanja na 2, primjenjujući signal pobude od 0 dBV na 1 kHz, taj faktor pojačanja trebao bi biti uvijek isti pri frekvenciji od 1kHz, bez obzira na razinu pobudnog signala.

Taj faktor mogao bi se promijeniti za neke druge frekvencije pobudnog signala, kao što je slučaj npr. s frekvencijskim filtrima, ali pri istoj pobudnoj frekvenciji trebao bi uvijek biti isti. U tom slučaju kažemo da uređaj ima **linearnu prienosnu funkciju pojačanja**. Međutim, to najčešće nije slučaj.

Zbog toga mjerimo pojačanje elektroakustičkog uređaja pri različitim amplitudama pobudnog signala. Rezultati tih mjerenja najčešće se prikazuju na dijagramu na kojem je apscisa - ulazna amplituda, pobudnog signala, a odstupanje od nazivnog pojačanja na ordinati.

Iako svi elektroakustički uređaju pokazuju ova odstupanja u maloj mjeri, rezultat ovog mjerenja **najznačajniji je pri mjerenju izobličenja signala vrlo malih amplituda pri analognoj digitalnoj pretvorbi**.

# Fazni odziv

Fazni odziv je sličan frekvencijskom odzivu, s tom razlikom da ne promatramo razinu odziva, nego promjenu faznog kuta na različitim frekvencijama.

Pri mjerenju se promatra fazni kut između ulazne i izlazne komponente spektra. Grupno kašnjenje sustava koji se mjeri redovito treba uzeti u obzir. Detalji su dani u poglavlju o mjerenju faze.

Fazni odziv prikazuje se slično kao i frekvencijski odziv. Na apscisi je logaritamski prikazana frekvencija, a na ordinati fazni kut u stupnjevima.

Moguće je prikazati fazni kut kao višekratnik promjene  $\pm 180^\circ$ , što se često naziva *wrapped*. Ako fazu prikazujemo s kontinuiranom promjenom često se prikaz naziva *unwrapped*.

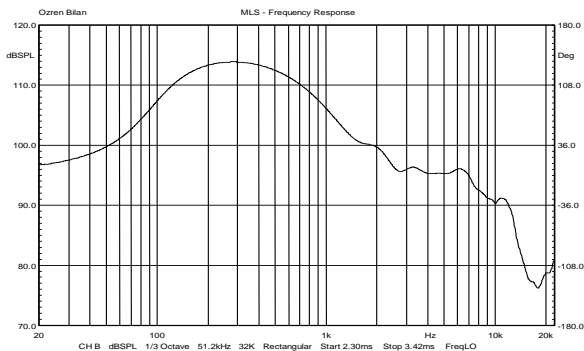
Diskutabilna je potreba linearne faze elektroakustičkih pretvarača, a posebno je složeno pitanje mjerenja akustičke faze zvučnika.

# Akustička faza zvučnika

Poteškoće je dobivanju vrlo jednostavne vizualne informacije iz krivulja faznog odziva sadržana je u činjenici da su one posljedica sumiranja dvaju učinaka. Prvi učinak je taj što **svaki zvučnik ima vlastiti fazni odziv**. Drugi učinak je **utjecaj vremena preleta** koji djeluje na rezultat daleko više, nego prvi učinak. Utjecaj vremena preleta je kašnjenje i u svakoj točki prostora ovaj je odziv različit. Potrebno je odijeliti ova dva učinka; to se može napraviti, ali složenim postupkom.

Za sad prihvatimo da objašnjenje ovih postavki leži u složenoj matematičkoj analizi koju nećemo ponavljati. Ovdje ćemo samo navesti da mjerni sustav ima mogućnost eliminiranja vremena preleta na nekoliko različitih načina, od kojih svaki ima vlastitu točnost. Postupit ćemo na najtočniji i najsloženiji način. Uvest ćemo pojam tzv. **Minimalne faze** što predstavlja bit čitavog postupka.

Slijedeći fazni dijagram visokotonskog zvučnika, na slici, dobiven je izborom Minimum Phase u podešavanju MLS mjerenja i ponovnim proračunom faze. Neki sustavi definirani su kao sustavi **minimalne faze**. Po definiciji, njihov **fazni odziv može se izračunati iz amplitudnog odziva**. Dakle, sa sustavima Minimalne faze stvar je relativno jednostavna jer im je dovoljno poznavati amplitudni odziv za određivanje faze.



Drugi tip faze je **Ekscesna faza** koja predstavlja algebarsku **razliku prave faze i minimalne faze**. To je upravo ono što će nam pomoći da odvojimo utjecaj vremena preleta na vlastiti odziv faze samog zvučnika. Pri tome nećemo koristiti ekscesnu faznu direktno nego kao post proces, tzv. **Excess Group Delay**. Slijedeći graf prikazuje ekscesno grupno kašnjenje zvučnika u ovisnosti o frekvenciji.

Dijagram nije prikazan u obliku *Enhanced Metafile Graphics* nego kao *Screen Shoot* s monitora kako bi se uočio marker na 2.36 ms.

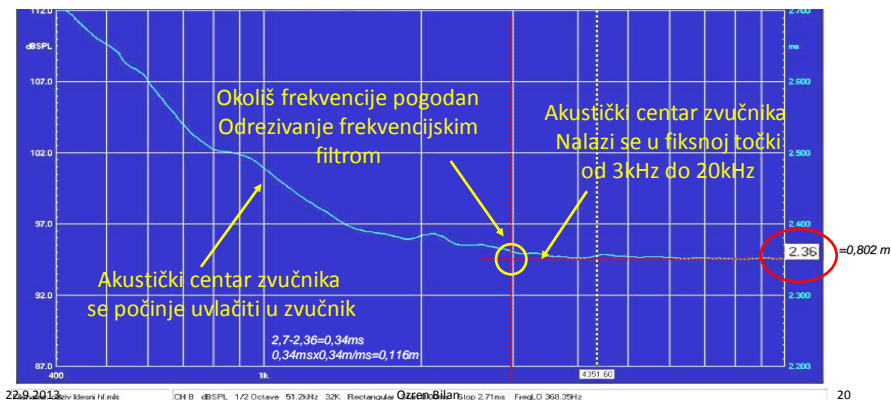
22.9.2013.

Ozren Bilan

19

Graf je dobiven izborom **Excess** u dijalogu podešavanja i odabirom **Group Delay**. Ovaj graf u biti predstavlja **udaljenost zvučnog izvora od mikrofona u ovisnosti o frekvenciji**. Možemo primijetiti da akustički centar zvučnika nije u fiksnoj točki nego se mijenja promjenom frekvencije.

Sve dok je udaljenost **konstantna**, što definira linearni dio dijagrama, riječ je o sustavu **minimalne faze** i postoji točno definiran **akustički centar**. Možemo se primijetiti da su rezultati mjerenja pouzdani do **360 Hz** zbog vremenskog prozora. Budući da mjerimo visokotonski zvučnik, analizirat ćemo područje od **2k do 20 kHz**. To je frekvencijsko područje u kojem markerom možemo očitati konstantnih **2.36 ms**. Možemo napomenuti da se i odrezna frekvencija filtra odabire u ovom području, u kojem se zvučnik ponaša sa svojstvom minimalne faze. Na **400 Hz** akustički centar se uvlači **11,6 cm**. Za usporedbu kod vrhunskih monitor zvučnika uvlačenje na **20kHz** je oko **350cm**.



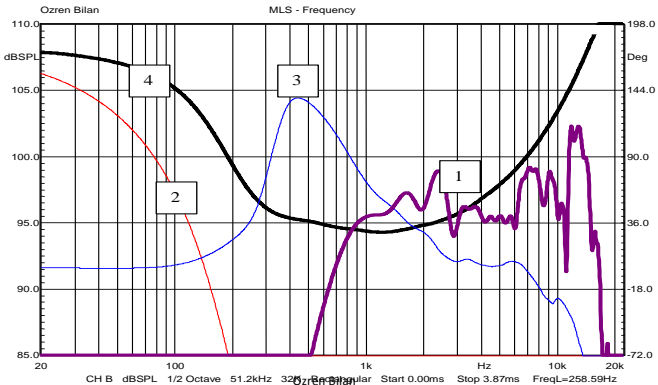
22.9.2013. Ozren Bilan

CH B dB SPL 1/2 Octave 51.2kHz 32K Rectangular Start 2.30ms Stop 3.42ms FreqLO 358 Hz

20

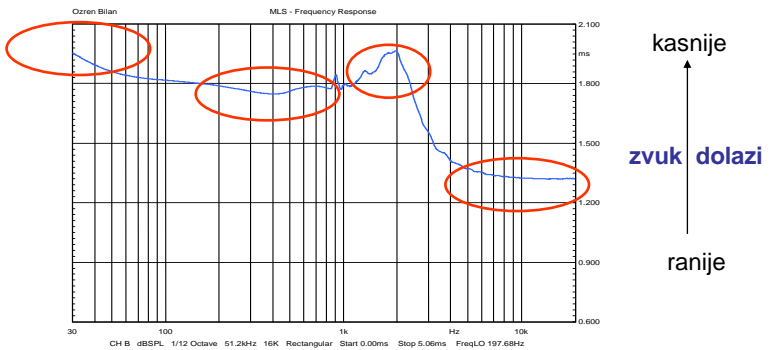
Vrijednost 2,36ms ćemo iskoristiti da aktiviramo funkciju **Time Shift** koja će **eliminirati vrijeme preleta**. Iz dijaloga za **Processing Tools** biramo **Time Shift** i **upisujemo vrijednost koju smo očitali iz dijagrama tj., 2.36 ms**. Konačno dobijemo prikaz procesirane faze, minimalne faze i amplitudnog odziva visokotonskog zvučnika.

- 1 - frekvencijski odziv HF
- 2 - prava faza (normal unwrapped)
- 3 - Minimalna faza (unwrapped)
- 4 - procesirana faza (dobivena preko Ekscesnog grupnog kašnjenja postprocesom Time Shift od 2.36 ms)



22.9.2013.

21



Bez detaljnijih komentara prikazat ćemo i rezultate mjerenja jednog **cjelovitog zvučničkog sustava s frekvencijskim filtrom koji unosi kumulativni učinak**, kao i primijenjena konfiguracija sustava. Detaljnije ćemo se osvrnuti samo na **ekscesno grupno kašnjenje**.

Ekscesno grupno kašnjenje sustava iznosi oko **1.9 ms za bas**, a oko **1.35 ms za visoke tonove**. Očito je ponašanje **sustava neminimalne faze** jer je **različito vrijeme dolaska signala do slušatelja**.

Prvo dolaze visoke frekvencije, zatim dolaze frekvencije u pojasu od 300-600 Hz, zatim dolaze frekvencije u pojasu od 1 kHz do 3 kHz, a posljednje dolaze frekvencije ispod 40 Hz. Ova pojava naziva se **vremensko razmazivanje (time smear)**.

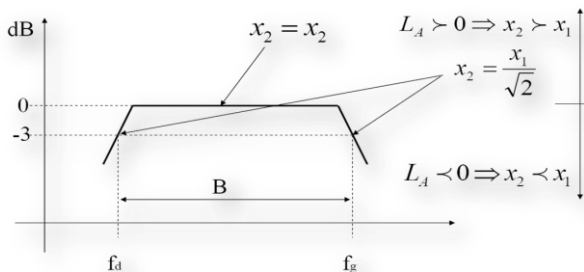
22.9.2013.

Ozren Bilan

22

# Frekvencijska širina pojasa

Svaki elektroakustički uređaj pokazuje slabljenje na krajevima frekvencijskog područja. Frekvencijska širina pojasa (*bandwidth*) je širina pojasa u Hz od točaka s odzivom od -3 dB, relativno nazivnom pojačanju na srednjim frekvencijama (uobičajeno na 1 kHz).



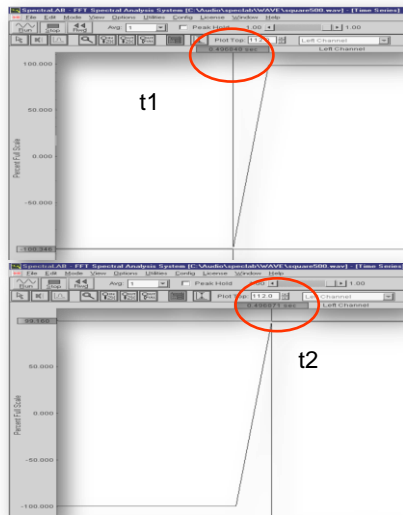
# Slew Rate

Ako neki elektroakustički uređaj treba promijeniti naponsko stanje na izlazu, s neke male vrijednosti na neku veliku vrijednost; npr. narinemo li na pojačalo snage step funkciju amplitude 1V, 100W pojačalo, ulazne osjetljivosti 1V, trebat će promijeniti izlazni napon s 0 V, na  $28.3V/8\Omega$ .

Ta promjena bi se trebala izvršiti trenutno, dakle, u vremenu  $t=0$ . Zbog raznih razloga to najčešće nije slučaj.

Pogledamo li  **nagib ruba izlaznog impulsa**, ovo vrijeme najčešće ima neko trajanje reda  $\mu s$ . Izmjerimo li kolika je  **naponska promjena u  $1\mu s$** , to je upravo *Slew Rate* pojačala izraženim u  $V/\mu s$ .

Red veličine vrlo kvalitetnih pojačala snage je viši od  $300 V/\mu s$ .



# Kako provjeravamo *Slew Rate*?

Vrijednost možemo provjeriti na slijedeći način. Efektivna vrijednost izlaznog napona je:

$$U_{\text{efektivno}} = U_{\text{vrh-vrh}} / 2^{1/2}$$

Izlazna snaga pri maksimalnom izlaznom naponu je:

$$P = U^2 / R$$

Izlazni napon onda je:

$$U = (PR)^{1/2}$$

Vrijeme porasta možemo izračunati, poznamo li **frekvencijsku širinu pojasa**:

$$RT = 0.35 / B$$

Maksimalna gornja granična frekvencija onda je:

$$f_{\text{MAX}} = SR / U_{\text{VRŠNO}} 2 \pi$$

Poznavanjem maksimalne gornje granične frekvencije, određujemo *Slew Rate* kao:

$$SR = U_{\text{VRŠNO}} 2 \pi f_{\text{MAX}} \text{ [V/}\mu\text{s]}$$

## Maksimalni izlazni napon

Svaki uređaj može na izlazu dati neki maksimalni pozitivni i negativni izlazni napon koji se ne može prijeći. Taj napon definiran je nizom čimbenika od kojih su najvažniji napon napajanja uređaja, tip primijenjenih aktivnih elemenata i struktura kojom se realizira pojačanje. Taj maksimalni izlazni napon uobičajeno nije najveći napon koji uređaj može dati na izlazu nego napon koji je određen stupnjem izobličenja.

Ako na ispitivani audio uređaj narinemo sinusni signal i promatramo izlaz uređaja dok istovremeno povećavamo pojačanje, primijetiti ćemo kako pri određenom izlaznom naponu uređaj više ne može pojačati ulazni signal. vizuelno ćemo to primjetiti kao odrezivanje vrhova (prema *eng. clipping*). Daljnjim povećanjem izlaznih razina odrezani dio će sve više i više poprimiti oblik kvadratnog valnog oblika.

Ravni dio valnog oblika je maksimalni izlazni napon uređaja. Naravno, to nije način mjerenja maksimalnog izlaznog napona. U trenutku kao se vizuelno primjeti odrezivanje sinusnog valnog oblika, promatrani uređaj već sigurno ima oko 10% izobličenja. uobičajeno je specificirati maksimalni izlazni napon pri razini izobličenja oko 0.1% ili 1% što se mijenja od proizvođača do proizvođača.

Važno je zapamtiti da je maksimalni izlazni napon **neovisan o stupnju pojačanja** jer u principu nije poznata razina ulaznog signala. Jednostavno, to je maksimalna razina izlaznog signala.

# Mjerenja šuma

Svaki elektronički uređaj daje šum. Čak i sami pasivni elementi kao što su otpornici uzrok su šuma. Tome je uzrok gibanje molekula uslijed topline pa se taj šum naziva **termalni šum**.

Ako promatrani elektroakustički uređaj nema na ulazu priključen nikakav signal, a voltmetrom izmjerimo efektivnu vrijednost signala na izlazu dobit ćemo efektivni napon šuma na izlazu. Ta vrijednost nije nam od osobite važnosti jer je izmjereni napon u frekvencijskom području koje je mnogo veće od audiofrekvencijskog. Zbog toga se **izlazni napon filtrira na audiofrekvencijsko područje**.

Širina pojasa u kojem se mjeri napon šuma nije standardiziran i ovisi o proizvođaču da li će definirati to područje. to znači da se bez poznavanja širine frekvencijskog pojasa ne mogu uspoređivati izmjerene vrijednosti različitih proizvođača. Pri ovom mjerenju potrebno se osigurati da na ulaz uređaja ne dolaze nikakvi vanjski signali koji bi pogoršali rezultat. Ako na ulazu uređaja nije ništa priključeno nego je ulaz *neterminiran*, šum će biti mnogo veći nego ako ga spojimo u kratko. Međutim, **pravilno je zaključiti ulaz impedancijom koju će uređaj vidjeti pri radu**.

Potrebno je zapamtiti da pri specificiranju šuma **treba specificirati i impedanciju kojom je zaključen ulaz, kao i frekvencijsku širinu mjerenog šuma**.

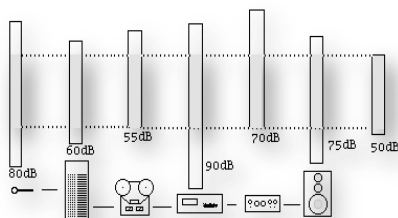
# Dinamičko područje

**Razlika između maksimalne razine signala i razine šuma naziva se dinamičko područje.** Pojam dinamičkog područja izuzetno je koristan pri razmatranju prolaska audio signala kroz čitav niz uređaja. Dinamičko područje je razlika razina u dB između maksimalnog izlaznog napona i praga šuma pri kojem je signal neupotrebljiv. Dinamičko područje ne smije se zamijeniti s odonosom signal/šum

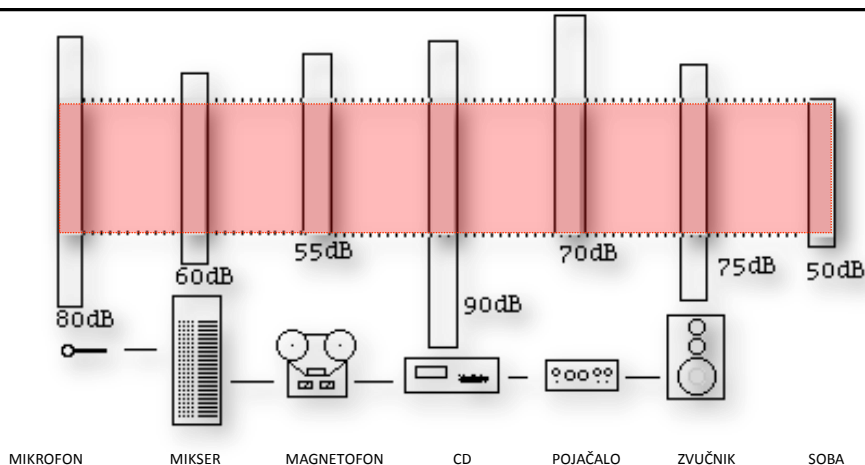
Navedene vrijednosti tipične su za uređaje visoke kakvoće. Valja naglasiti, kako u svim navedenim primjerima ipak postoji mogućnost poboljšanja odnosa signal/šum ipak najveća ograničenja dinamičkom području nameće prostorija za reprodukciju. Visoke razine zvučnih tlakova izazvat će primjedbe susjeda i ukućana, dok pri najnižim razinama uvijek postoji vanjska buka i buka kućanskih aparata.

Na dijagramu je vidljivo neprilagođenje dinamičkog područja miksera i uređaja za magnetsko snimanje zvuka.

Mikser ulazi u područje preopterećenja prije magnetofona, što će sustav oštetiti za oko 5-6 dB dinamičkog područja. To se može spriječiti podešavanjem ulaznih potencijometara na magnetofonu. Isto tako vidljivo je da su dinamičke mogućnosti CD reproduktora potpuno neiskorištene unutar opisanog sustava. Pravilna uporaba bilo kojeg uređaja unutar audio sustava podrazumijeva prilagođenje vlastitog dinamičkog područja uređaja i dinamičkog područja uređaja koji prethodi u nizu. Odnos najtišeg i najglasnijeg zvuka koji se realizira sa svakim sustavom zove se dinamičko područje.



neprilagođenje dinamičkog područja



Prikaz dinamičkog područja sustava:

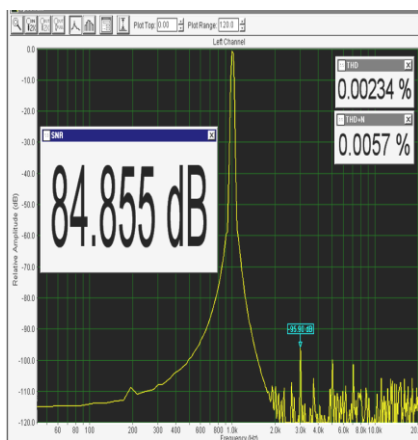
oko 40 dB CD-a je neiskorišteno, DXD sustav još je širi za >30dB.  
Ispitivanje slušalicama dinamičkog pojasa sluha daje 40 – 60 dB

## Odnos signal/šum

Iako je odnos signal/šum sličan dinamičkom području to nije isto.

Odnos signal šum izražava razliku nazivne preporučljive radne razine i praga šuma.

Uobičajeno je **preporučljiva radna razina** 0 dBVU što odgovara izlaznom naponu razine +4 dBu ili -10 dBV, što određuje tip uređaja.



# Ekvivalentni ulazni šum (EIN)

EIN je posebni slučaj mjerenja šuma mikrofonskih pretpojačala. Ulazni šum je u tom slučaju toliko nizak da se ne može točno izmjeriti. Ako ga ipak izmjerite, sigurno vam je potrebno novo mikrofonsko pretpojačalo. U tom slučaju **signal se pojača, izmjeri se izlazni šum i ta vrijednost podijeli se faktorom pojačanja sklopa, odnosno oduzmu se razine.**

Odatle i dolazi riječ – *ekvivalentno*, jer vrijednost nije izmjerena direktno nego izračunata.

Pri određivanju EIN potrebno je obratiti pozornost na **faktor pojačanja** mikrofonskog pretpojačala. Na pretpojačalo se narine vrlo slabi signal i postavi se pojačanje od +60 dB, dok se istovremeno mjeri ulazni i izlazni napon pretpojačala. Kada je izlaz pretpojačala 1000 puta veće amplitude od ulaza, isključiti se generator i izmjeri izlazni napon šuma. Prethodno se ulaz pretpojačala terminira s otpornikom od 150 oma između pinova 2 i 3 muškog XLR konektora. Izlazni šum izmjeri se u dBu i od izmjerene vrijednosti oduzme se 60 dB pojačanja pretpojačala.

Dobivena vrijednost je EIN u dB i obično iznosi od -120 do -130 dBu.

# Faktor potiskivanja zajedničkog signala (CMRR)

Svaki uređaj profesionalne izvedbe redovito ima simetrične ulaze i izlaze. To znači da za svaki ulaz i izlaz postoje dva priključka. Jedan je pozitivan ili neinvertirajući, a drugi negativan ili invertirajući. Simetrični ulaz će pri radu oduzeti napon invertirajućeg ulaza od napona neinvertirajućeg ulaza i rezultatni napon prosljediti uređaju. Diferencijalni ulaz vrši matematičku operaciju oduzimanja  $+1 - (-1) = 2$  i prosljeđuje signal s pojačanjem 6.02 dB. Sav šum koji se inducira u prijenosnim linijama u obje linije je isti i simetrični ulaz će pri radu oduzeti i šum u linijama:  $\text{šum} - \text{šum} = 0$ . To znači da simetrični ulazi eliminiraju šum u linijama.

Budući da je šum u kabelu zajednički za oba ulaza (invertirajući i neinvertirajući) zovemo ih *zajednički mod* i budući da zajednički mod sam sebe poništava oduzimanjem, kažemo da se *potiskuje*. Sposobnost diferencijalnog ulaza da eliminira signal koji je isti u obje grane naziva se **potiskivanje zajedničkog moda signala**. Izražava se u dB, a mjeri se na slijedeći način.

Generator sinusnog valnog oblika priključiti se na obje grane simetrične linije (pinovi 2 i 3 XLR konektora). Izmjeri se ulazna razina koja je oko 60 dB niža od ulaza. Razlika razina u dB je *potiskivanje zajedničkog moda* ili CMRR. Međutim, pri mjerenju postoji mali problem. Budući da simetrični ulaz najbolje funkcionira kada mu se narine napon sa simetričnog izlaza (što znači da su impedancije u obje grane prilagođene, a ne da su naponi simetrični) CMRR uređaja može se promijeniti ako je priključen na neprilagođene impedancije.

# Ukupno harmonijsko izobličenje (THD)

Ako idealni sinusni valni oblik narinemo na ulaz uređaja kojeg ispitujemo, pa pogledamo naponski oblik na izlazu, otkrit ćemo kako je valni oblik na izlazu različit od onoga na ulazu. Razlika se očituje u tome što će uređaj generirati harmonike iznad osnovne frekvencije - fundamentala, pobudnog napona. Izmjerimo li **ukupni iznos energije svih harmonika prema energiji fundamentala** moći ćemo točno odrediti koliko je izobličenje signala. Što su veće amplitude harmonika, veće je izobličenje.

Ukupno harmonijsko izobličenje najčešće se izvodi tako što na ulaz elektroakustičkog uređaja (npr. pojačala snage) narinemo čisti sinusni valni oblik, pa izvršimo FFT analizu izlaznog signala koja prikaže amplitude individualnih harmonika. Sumiramo li kvadrate amplituda harmonika, izvadimo korjen iz sume kvadrata, pa podijelimo s amplitudom fundamentalnog tona i rezultat pomnožimo sa 100. Dobiveni rezultat je ukupno postotno izobličenje. Logaritmiramo li postotni THD i pomnožimo ga 20 puta dobijemo THD u dB.

$$\% \text{ uk. harm. izobličenje} = [\sum A_i^2]^{0.5} / A_f$$

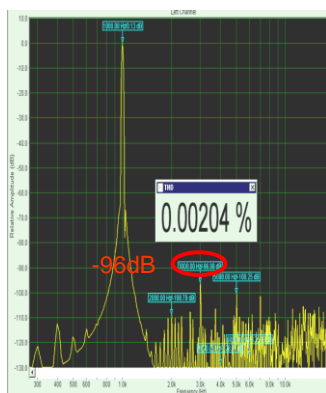
$$\text{dB THD} = 20 \log (\% \text{ ukupno harmonijsko izobličenje})$$

## Mjerenje THD

Teoretski, pri nastanku harmonijskog izobličenja nastaje beskonačan broj harmonika. Naravno, razina mnogih viših harmonika nalazi se ispod razine šuma sustava.

Pri mjerenju razine individualnih harmonika ne mogu se izmjeriti razine svih, pa se ponekad ukupno harmonijsko izobličenje specificira u obliku: npr. *THD do 8. harmonika*. To znači da i iznad 8. harmonika postoji energija izobličenja, ali je zanemariva ili je ispod razine šuma sustava.

Mjerimo li ova izobličenja ručno, potrebno je mnogo vremena da bi se izmjerile razine svih harmonika. Zbog toga se koriste računalski programi koji te proračune vrše automatski kao na slijedećoj slici. Npr. 3 harmonik -96dB.



# Postotno izobličenje harmonika

Iz gornjeg rezultata možemo izračunati postotno izobličenje bilo kojeg harmonika.

Izmjerit ćemo razinu fundamentalnog tona (0dB) i izračunamo razliku u dB osnovnog tona i harmonika.

Ako, npr. 3. harmonik ima razinu -96 dB. Primijenit ćemo relaciju:

$$\% \text{ izobličenje} = 100 \times 10^{-dB \text{ razlike} / 20} =$$

$$100 \times 10^{-dB 96 / 20} = 0.00158 \%$$

## Ukupno harmonijsko izobličenje + šum (THD+N)

Širokopojasni šum koji nastaje u uređaju također doprinosi slabljenju kakvoće signala. Poseban tip mjerenja ukazuje na dodatni izvor slabljenja audio signala. Mjerenje je slično mjerenju ukupnog harmonijskog izobličenja, ali je mnogo brže, izvodi li se mjerenje ručno. Budući da pri mjerenju **promatramo iznos energije različit od signala pobude**, na ulaz elektroakustičkog uređaja narinemo idealni sinusni valni oblik.

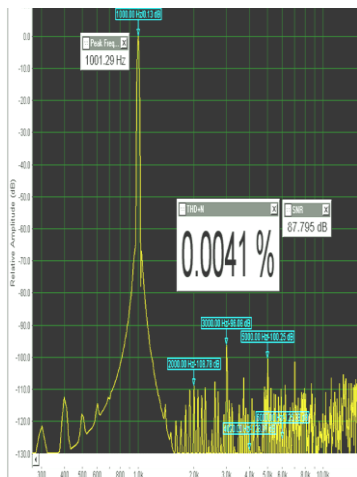
Na izlazu uređaja signal propustimo kroz uskopropusni filter, ugođen na točnu frekvenciju ulaznog valnog oblika i **na izlazu u potpunosti eliminiramo izvorni valni oblik**.

Sve ono što preostane nakon eliminiranja pojačanog pobudnog valnog oblika su produkti izobličenja i šum.

Preostali dio signala izmjerimo voltmetrom koji mjeri **efektivnu vrijednost signala**.

Pri tome se najčešće signal frekvencijski filtrira kako bi vrijednost izmjerenog napona odgovarala subjektivnoj vrijednosti percipiranog šuma.

Rezultat ovog mjerenja **dijeli se efektivnom vrijednosti napona fundamentalnog tona na izlazu**. Rezultat se može prikazati kao postotno izobličenje ili u dB.



## Istosmjerni ofset

Mjeri se ispitivanjem istosmjernog napona na izlazu sklopa.

Minimalan je s ulazom uređaja u kratkom spoju.

Na izlaznim pojačalima snage tolerira se minimalna vrijednost istosmjernog napona na izlazu reda do **10 mV**, a u praksi vrijednost je mnogo manja.

Ako je vrijednost veća, najčešće treba upariti ili podesiti ulazni diferencijalni par tranzistora.

## Ispitivanje elektroakustičnih pretvarača

Ispituju se

- mikrofoni,
- zvučnice i
- slušalice.

Mjerenjima se određuje za mikrofone karakteristika osjetljivosti, karakteristika usmjerenosti, nelinearna izobličenja, fazna izobličenja, impulsni odziv kojim se određuje kako mikrofoni reagira na impulsne pojave, električna impedancija.

# Ispitivanje mikrofona

## Efikasnost mikrofona

Mikrofon se promatra kao izvor energije koji napaja četveropol određene ulazne impedancije. Da bi saznali kolika je snaga mikrofona kojeg ispitujemo, a koju on prenosi u slučaju pravilnog priključenja ulaznoj impedanciji kruga na koji je priključen, on se pri tlaku od  $1 \text{ N/m}^2$  uspoređuje mikrofonom sa snagom od  $P_0=0.001 \text{ W}$ . **Ovaj odnos u decibelima naziva se efikasnost.**

## Frekvencijska karakteristika mikrofona

Prikazuje ovisnost osjetljivosti mikrofona u dB o frekvenciji.

## Usmjerena karakteristika mikrofona

Prikazuje oblik usmjerne karakteristike koja može biti kružna, osmičasta, kardiodna, hiperkardiodna itd.

## Harmonička izobličenja mikrofona

Redovito su vrlo malena jer je titrajni sustav izuzetno male mase.

## Tranzijentna izobličenja

Dinamički tračni mikrofon prenosi pravokutni signal. Ostali tipovi mikrofona nemaju tako dobru tranzijentnu karakteristiku pa mijenjaju boju instrumenata. Mikrofon s radnom frekvencijom ispod radnog područja ističu niske frekvencije, a mikrofon s rezonantnom frekvencijom iznad radnog područja ističu visoke frekvencije. Karakteristika drugih je visoka razumljivost i sonornost. Mikrofon s rezonantnom frekvencijom u sredini radnog područja imaju svijetlu boju, ali su im tranzijentna izobličenja najveća od svih drugih tipova.

## Naponi smetnje

Napon šuma mikrofona određuje najniži korisni napon koji se mikrofonom može prenijeti. Uzrok šumova su termička gibanja, potresanja sustava pri radu, zračne struje kao i elektromagnetske smetnje.

## Impedancija mikrofona

Kompleksni unutrašnji otpor kojeg mikrofon pruža kao generator napona. Prema impedanciji mikrofoni se dijele na niskoomske (10 - 600 oma) i visookoomske (825 - 80 koma).

## Korisnost mikrofona

Vrlo je mala zbog slabog prilagođenja akustičke impedancije zraka mehaničkoj impedanciji membrane i dvostruke pretvorbe akustičke energije u mehaničku, pa u električnu energiju. Zvučnicima se određuje frekvencijska karakteristika, karakteristika usmjerenosti, frekvencijska karakteristika korisnosti, karakteristika faznih izobličenja, električna impedancija, reprodukcije prijelaznih pojava, Q faktor itd. Za ispitivanje slušalica koristi se umjetno uho, a za serijsko ispitivanje mikrofona umjetna usta. Umjetno uho je kondenzatorski mikrofon s posebno oblikovanom predkomorom u obliku uha.

# Elektroakustička mjerenja primjenom računala

Računala su omogućila vrlo veliki kvalitativni i kvantitativni skok u načinu i brzini izvođenja mjerenja u elektroakustici i akustici uz znatno smanjenje cijene mjernih uređaja.

Općenito, računalski temeljene elektroakustičke mjerne sustave možemo podijeliti na dva tipa.

- ❑ Mjerni sustavi temeljeni na **zvučnoj kartici** i posebnom softveru (Spectra Lab, ARTA)
- ❑ Mjerni sustavi temeljeni na **posebnoj mjernoj kartici** i softveru (CLIO)

Osnovna razlika među sustavima je **točnost rezultata** izvršenih akustičkih mjerenja. Kod **prvog tipa** mjernih sustava točnost ovisi o elementima mjernog sustava (mikrofoni, zvučna kartica, brzina procesora računala). Njihove značajke još nisu međunarodno normirane, pa je potrebno posvetiti pozornost: frekvencijskom odzivu, harmonijskim izobličenjima, osjetljivosti mjernih mikrofona, a posebno mehaničkoj buci (tvrdog diska i ventilatora) primijenjenog PC sustava. Naputke specificiraju preporuke Microsoft PC97, PC98 ili Intel AC97. Posebno su kvalitetni računarski spektralni analizatori čiji programi rade uz primjenu zvučne kartice računala.

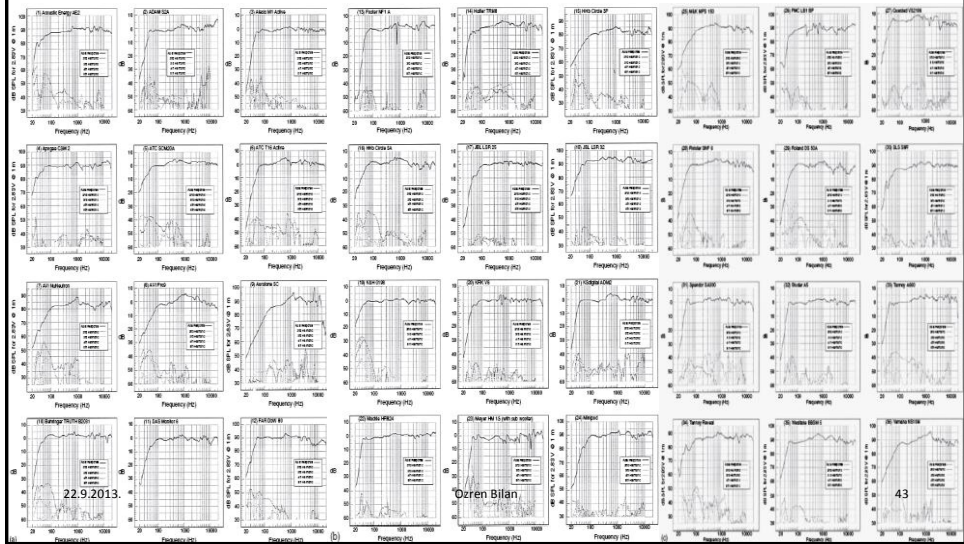
Programi koriste **zvučnu karticu** za AD pretvorbu, a digitalizirani audio signal tada se propušta kroz FFT algoritam, koji signal transformira iz vremenskog područja u frekvencijsko područje. Informacija u frekvencijskom području konvertira se u spektar koji se prikazuje na centralnim frekvencijama. Ovu transformaciju vrši procesor primijenjenog računala. Pri tome primijenjena zvučna kartica mora biti **istosmjerno spregnuta**, kako bi omogućavala prolaz istosmjernim signalima, potrebnim za točnu reprodukciju impulsa, kao i za ramp signale. Zvučna kartica treba biti **full duplex** tipa kako bi omogućavala **istovremeno snimanje i reprodukciju**. Sva izobličenja i šum trebaju biti niski.

Iako sustavi imaju vrlo velike potencijale, točnost i popularnost, ne mogu se približiti kakvoći posebno konstruiranih mjernih sustava, zbog ograničenja koju nameću nesavršeni operacijski sustavi, kao i potrebna dodatna oprema.

**Drugi tip** sustava temeljen je na **ISA** ili **PCI** kartici s vlastitom A/D i D/A pretvorbom, temeljenoj najčešće na delta-sigma pretvaraču. Ovakvi mjerni sustavi omogućavaju visoku točnost mjerenja, **neovisno o primijenjenom računalu**.

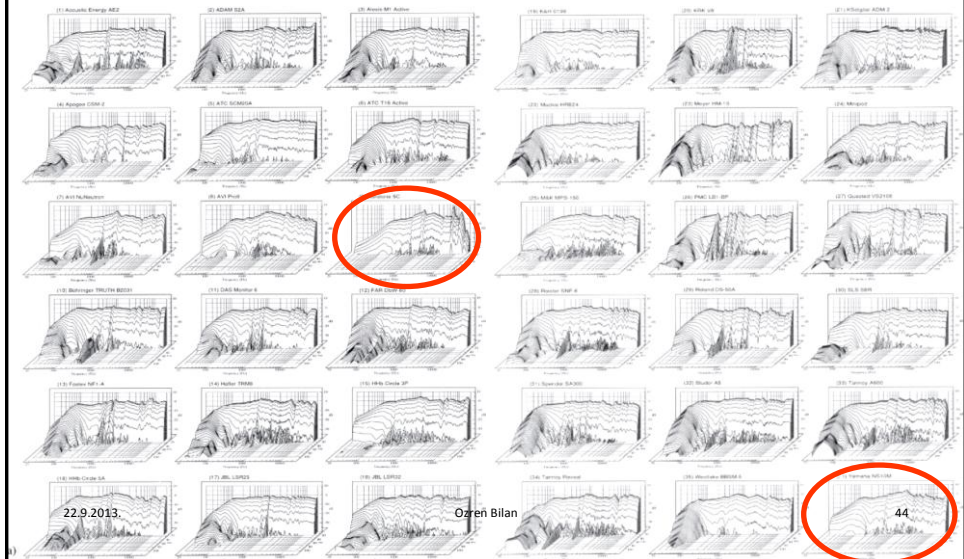
# Vrednovanje zvučničkih sustava

## Frekvencijski odziv 36 monitora



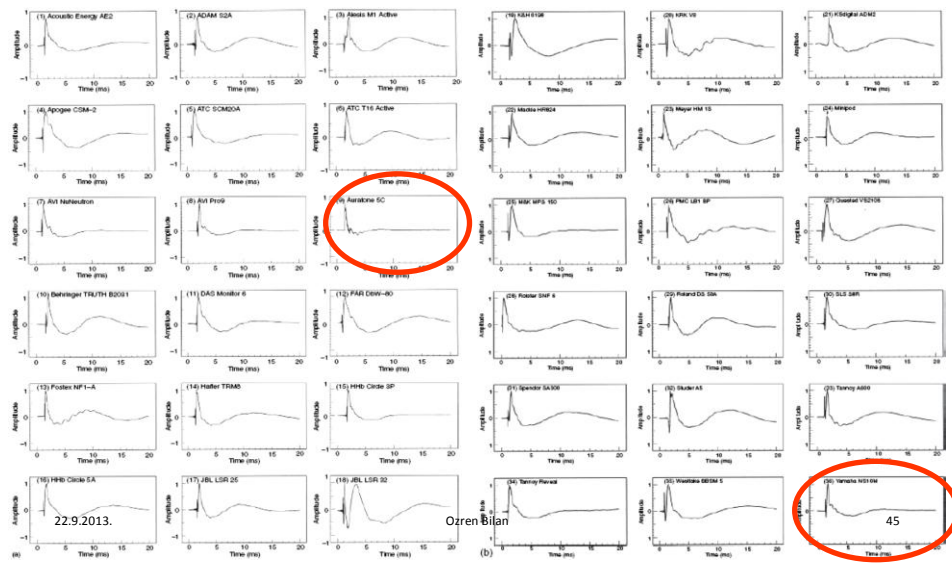
# Vrednovanje zvučničkih sustava

## Dijagram istitravanja (*waterfall*) 36 monitora



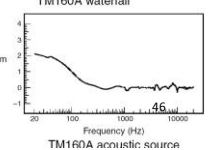
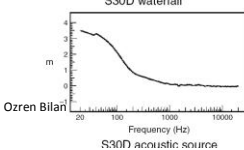
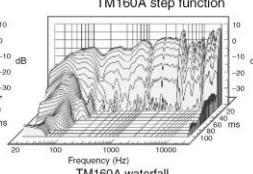
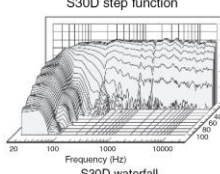
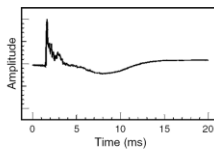
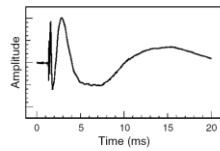
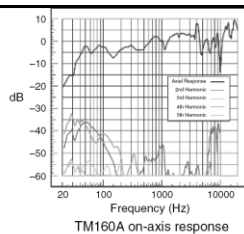
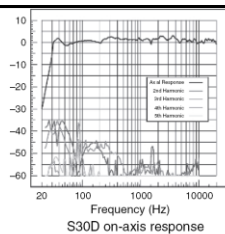
# Vrednovanje zvučničkih sustava

## Step odziv 36 monitora



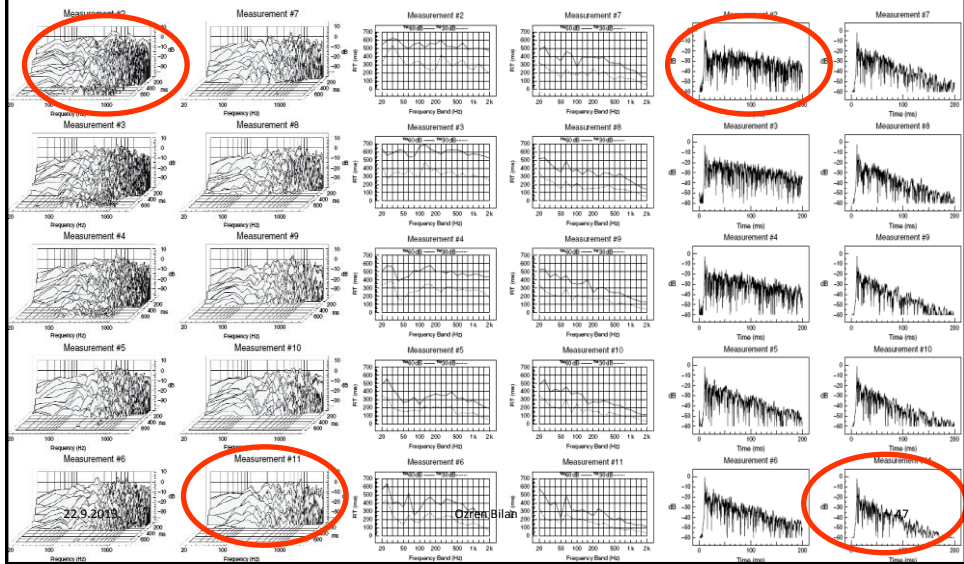
## SLUČAJNA USPOREDBA

- Kako je moguće da ova dva zvučnika budu namijenjena za za identičnu uporabu ?
- Kako je moguće da proizvođači ne specificiraju prikazane parametre ?



# Vrednovanje akustike prostora

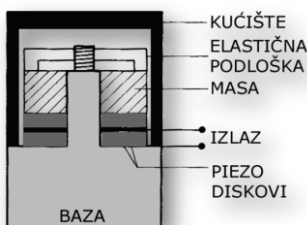
U prostoriju su postepeno dodavani akustički materijali



## Analiza vibracija

Vibracije pri radu strojeva ili kućišta zvučnih kutija su štetne pojave koje mogu biti uzrok brojnim kvarovima ili zvučnim koloracijama. Otkrivanje uzroka i izvora vibracija omogućava njihovo eliminiranje i poboljšanje rada strojeva te manje štete i dugotrajniji radni vijek. Pri mjerenju vibracija koriste se akcelerometri.

Akcelerometri su elektroakustički pretvarači koji na svojim izlaznim stezaljkama daju napon proporcionalan akceleraciji koja na njih djeluje. Najrasprostranjeniji su tlačni piezoelektrični akcelerometri. Njihova konstrukcija prikazana je na slici



# Građa akcelerometra

Element pretvorbe akceleracije u napon sastoji se od dva piezoelektrična prstena na kojima je postavljena mehanička masa. Spoj ostvaruje kruta elastična podloška, a cijeli sustav montiran je na metalno kućište sa debelom bazom.

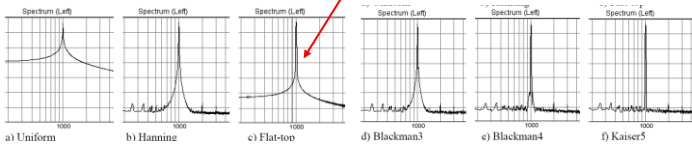
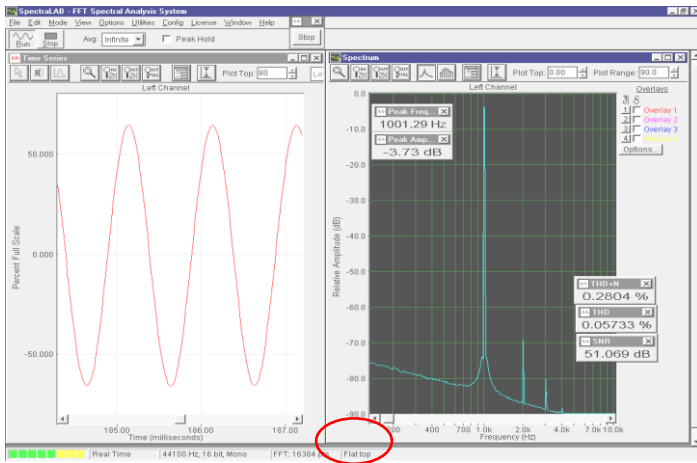
Ako se sustav akcelerometra podvrgne vibracijama, **masa će djelovati promjenjivom silom na piezoelektrične prstenove**. Zbog piezoelektričnog efekta nastat će promjenjivi napon proporcionalan sili tj. akceleraciji mase. Na frekvencijama mnogo nižim od rezonantne frekvencije elastične podloške i titrajne mase, akceleracija mase bit će jednaka akceleraciji čitavog sustava pa će **generirani napon biti proporcionalan akceleraciji** kojom je podvrgnut sustav akcelerometra. Akcelerometri se izrađuju u različitim oblicima za različite namjene pri mjerenju vibracija.

Osim mjerenja vibracija strojeva, zanimljivi su za **vrednovanje i analizu vibracija zvučnih kutija**, jer omogućavaju uvid u efikasnost ukrućenja stranica kutija.

## Analiza ukupnog harmonijskog izobličenja

Ako na ulaz nekog audio uređaja dovedemo samo jednu frekvenciju npr. 1 kHz, a na izlazu se uz tu pojave još neke frekvencije, na višekratnicima pobudne, koje nisu postojale na ulazu, govorimo o harmonijskim izobličenjima. Ukupno harmonijsko izobličenje je odnos snage harmonika prema snazi osnovnog tona i izražava se postotkom. Što je iznos izobličenja manji, to u odzivu ima manje harmonika pa kažemo kako je odziv čistiji. Tipično mjerenje ukupnog harmonijskog izobličenja vrši se s referencijalnom frekvencijom od 1 kHz.

Referencijalna frekvencija propušta se kroz audio uređaj, a ukupno izobličenje izračunava se iz spektra. Iz oblika grafa harmonijskog izobličenja vidimo dominantna izobličenja neparnih harmonika, što može ukazivati na diferencijalni par na ulazu ispitivanog audio sklopa. Ovdje je vrlo važno primijetiti kako izobličenja zvučne kartice i referencijalnog signala moraju po svojim karakteristikama daleko nadmašiti uređaj koji se mjeri. Čistoća signala generatora direktno ovisi o izobličenju primijenjene zvučne kartice. Treba znati i to kako standardne zvučne kartice računala imaju daleko veća izobličenja, nego posebne kartice s vlastitim A/D pretvaračima.



Izgleđ spektra sinusnog signal 1kHz filtriran s raznim prozorima

22.9.2013.

Ozren Bilan

51

## Intermodulacijsko izobličenje (IMD)

Intermodulacijsko izobličenje je mjera izobličenja koje nastaje **miješanjem ili interakcijom dva ili više tonova**. Zbog nelinearnosti prijenosnih funkcija audio uređaja, dolazi do modulacije i miješanje komponenti spektra.

Razina intermodulacije proračunava se tako da se prvo odrede frekvencije i razine dvaju najjačih tonova u spektru, a onda se proračunava ukupna snaga svih frekvencija koje su produkt intermodulacije. Iznos intermodulacijskog izobličenja je onda odnos produkata intermodulacije prema efektivnoj vrijednosti sume snage najjačih tonova u spektru.

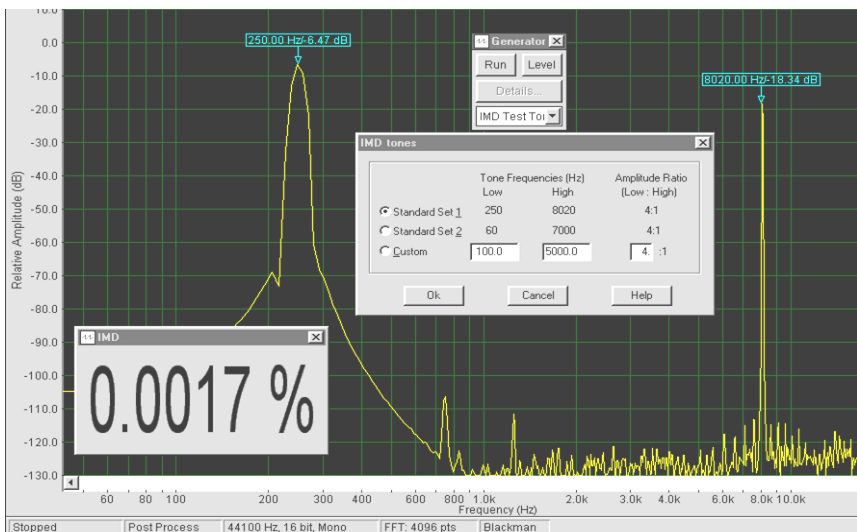
Generator za tipično mjerenje intermodulacije, prema međunarodnim normama, radi tonove na 250 Hz i 8020 Hz, pri čemu je viša frekvencija oslabljena 12 dB (odnos 4:1) u odnosu na nižu frekvenciju.

Kako bi se potisnule slučajne komponente šuma i poboljšala točnost mjerenja, primjenjuje se vrlo dugo vrijeme usrednjavanja.

22.9.2013.

Ozren Bilan

52



Mjerenje IMD izobličenja s normiranim setom frekvencija  
 250 Hz i 8020 Hz odnos amplituda 4:1  
 60 Hz i 4000 Hz odnos amplituda 4:1

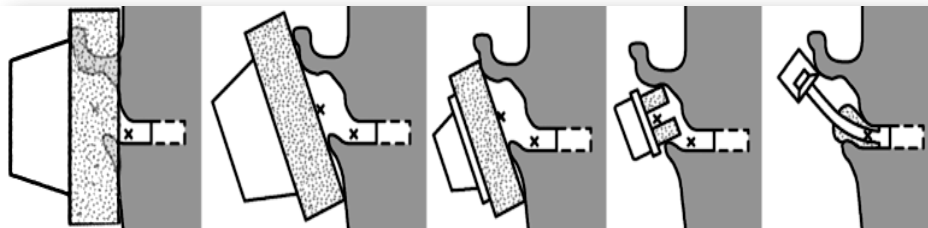
## ISPITIVANJE FREKVENCIJSKOG ODZIVA SLUŠALICA

Tri glavna načina su:

- izjednačavanje subjektivne glasnoće pomoću zvučnika,
- mjerenja razine zvučnog tlaka na stvarnom uhu,
- mjerenja pomoću simulatora.

Prve dvije metode, su starije metode, pogodne za razvojne laboratorije, a danas se za rutinska ispitivanja koriste simulatori.

# Tipovi slušalica



Circumauralne

Supraauralne

Supraconcha

Intraconcha

Insertne



22.9.2013.

## VRSTA NAUŠNOG DIJELA

*Circumauralne* - u potpunosti zatvaraju uho

*Supraauralne* - djelomično prekrivaju uho

*Supraconcha* - prekrivaju conchu

*Intraconcha* - ulaze u conchu

*Insertne* - ulaze u zvukovod

## OTVORENE / ZATVORENE

*otvorene, zatvorene*

*otvorene, zatvorene*

*otvorene*

*otvorene, zatvorene*

*otvorene, zatvorene*

Ozren Bilan

55

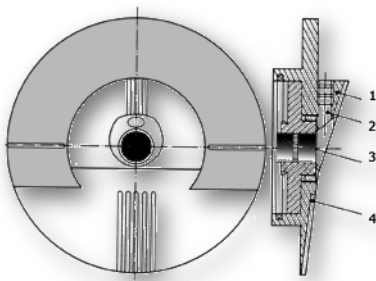
# Simulatori i umjetno uho

Simulacija impedancije bubnjića je manje važna od geometrije uške za većinu slušalica. U praksi, umjetno uho koje se koristi u laboratorijima ima slijedeća svojstva:

- Robusno je
- Simulira glavne oblike uške (*pinne*)
- Ima približno jednak volumen zraka između slušalice i uha
- Simulira tipično akustično istjecanje
- Prilagođava se i *supraauralnim* i *circumauralnim* slušalicama.

Standardizirana umjetna uha za mjerenje u telekomunikacijama i elektroakustici prema ITU-T57 i ITU-TP57

a) Tip 1, b) Tip 3.2 c) Tip3.3.



22.9.2013.

Ozren Bilan

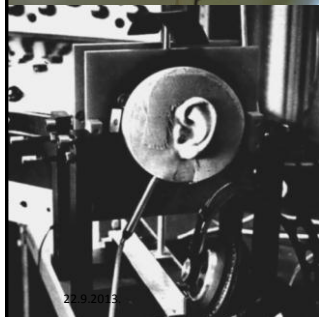
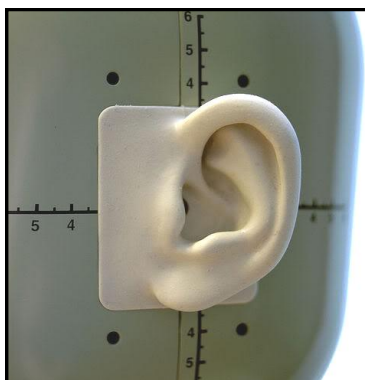
56

## Simulatori uha

Simulatori uha su naprave koje se sastoje od mjernog mikrofona i sučelja koje simulira fizikalna svojstva ljudskog uha. Oni omogućavaju realistične simulacije uvjeta pri kojima se koriste slušalice i telefonske slušalice na ljudskom uhu.

Tip ITU-T57 3.2 omogućava pojednostavljenu simulaciju ušne školjke prema ITU-T P.57 preporukama. Pri mjerenju stereofonskih slušalica, primjenom ovog simulatora, dobiju se rezultati koji su realističniji nego rezultati dobiveni s Tip 1 simulatorom.

Tip 3.3. simulatora zaključen je vjernom replikom ušne školjke izrađene od *elastomera*. Umjetno uho od meke gume za laboratorijsku upotrebu prikazano je na *slici*. Tkanina oko uha simulira istjecanja zbog kose.



Ozren Bilan

57

## Simulator glave i torza

Za znanstvena ispitivanja upotrebljava se umjetno uho sa simulacijom bubnjića i uške ugrađenih u umjetnu glavu sa ili bez simulacije bubnjića. Takvi sustavi imaju namjenu:

- mjerenja atenuacije slušne zaštite,
- frekvencijskog odziva slušalica
- mjerenje slušnih pomagala



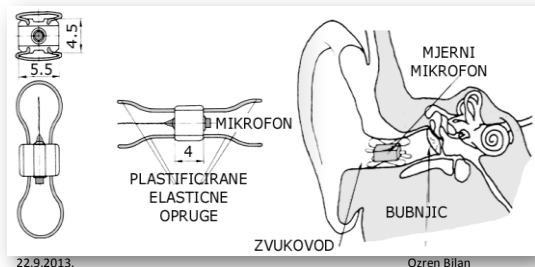
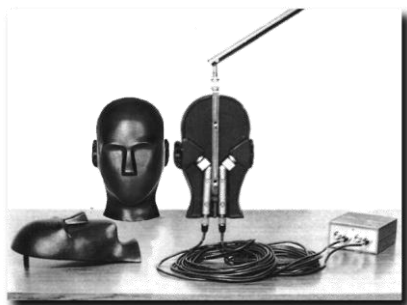
Za mjerenja atenuacije značajna je koštana vodljivost koja se ne može simulirati mehanički pa se tu koriste matematičke metode. Simulacije bubnjića prije se izvodila pomoću *Sučelja Zwislotski*. Točno ispred membrane kondenzatorskog mikrofona nalaze se četiri rupe od kojih svaka vodi do posebne komore, a koje zajedno simuliraju impedanciju bubnjića. Površina zvukovoda od 0.44 cm<sup>2</sup> približno je određena dijametrom od 7.48 mm. Duljina zvukovoda od 12.7 mm odgovara efektivnoj duljini zvukovoda do vrha umetnutog ušnog pomagala. Međutim, za slušalice je ova duljina produžena i kombinirana sa simulacijom uške. Danas se koriste simulatori uha i bubnjića definirani ITU preporukama.

22.9.2013.

Ozren Bilan

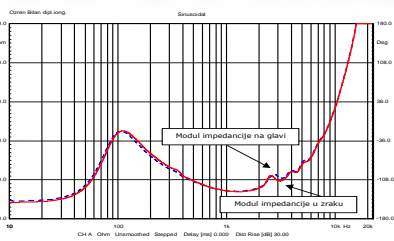
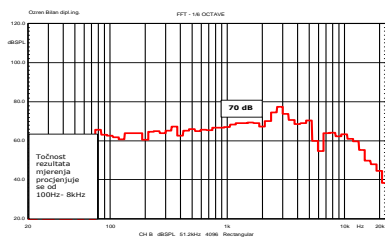
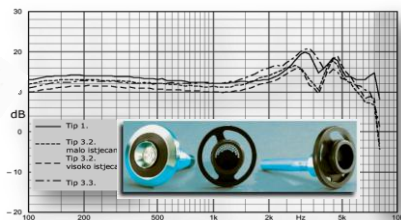
58

- Umjetna glava za binauralno snimanje u presjeku s mikrofonima i napajanjem,
- Simulator glave i torza
- Mjerni mikrofon za mjerenja u zvukovodu



## Mjerenje simulatorom uha

- Frekventijski odziv istih otvorenih elektrodinamičkih supraconcha slušalica snimljen sa četiri tipa simulatora
- Mjerenje otvorenih elektrodinamičkih supraconcha slušalica



# Tipični rezultati mjerjenja kvalitetnih uređaja

uređaj	Frekvencijska širina pojasa <i>at -3 dB</i> (kHz)	Linearnost 40-12.5 kHz (dB)	Šum CCIR468 wtd (dB)	Rezerva Headroom (dB)	Izobličenje -10 dB (dB)	fazni pomak/jitter (°)	podrhtavanje (%)
16-bit compact disc	20-20	±0.3	-60	+18	-60	0 ± 0	0.00
Professional analogue tape, 38 cm/s	20-22	±0.5	-50	+10	-60	20 ± 10	0.03
Compact cassette, chrome, Dolby B	30-16	±2.0	-53	+8	-60	90 ± 30	0.08
FM broadcast, off air, with NICAM link	20-15	±1.0	-50	+9	-50	0 ± 0	0.00
VHS hi-fi, FM sound carrier system	20-20	±1.0	-71	+15	-50	1 ± 0	0.00
Hi-8 video, 8 bit digital, companded	20-15	±1.0	-65	+12	-50	4 ± 0	0.00

22.9.2013.

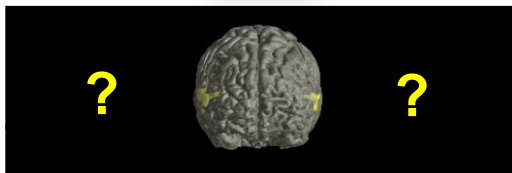
Ozren Bilan

61

## Centralni paradoks prema A. Benade, 1994

Elektroakustičkom sustavu možemo vrlo detaljno izmjeriti mnoge parametre, ali rezultate nije lako logički povezati s onim što čujemo.

To je glavni zadatak psihoakustike – povezati izmjerene rezultate s percepcijom zvuka i odrediti mjerenja koja imaju dobru korelaciju s percepiranim zvukom



22.9.2013.

# KORELACIJA SUBJEKTIVNIH I OBJEKTIVNIH KARAKTERISTIKA

**Subjektivne karakteristike elektroakustičkih uređaja** definiraju se prema dokumentu *IEC 268-13 Sound System Equipment*, koji definira nezavisne perceptualne karakteristike vrednovanjem subjektivne kakvoće.

**Perceptualne karakteristike** kojima treba posvetiti pozornost pri ispitivanju su:

**Definiranost i čistoća tona** u rasponu *vrlo čisto* do *vrlo nečisto*

**Mekoća tona** u rasponu *vrlo meki* visoki tonovi do *vrlo tvrdi*

**Punoća** basova u rasponu *puni* basovi do *tanki* basovi

**Svjetlina** u rasponu *vrlo svijetli visoki tonovi* u odnosu na *spektar* do *tamni visoki tonovi* u odnosu na *spektar*

**Bliskost** opisuje srednje tonove u rasponu *blisko* - *udaljeno*

**Prozračnost** u rasponu *otvoren spektar* do *zatvoren spektar*

**Glasnoća** u rasponu *sažeto* do *vrlo glasno*

**Izobličenja** u rasponu *nizak* do *vrlo veliki* šum i izobličenja

**Muzikalnost** - vrednovanje prihvatljivosti sustava u rasponu od 1-10

**Vjernost** - sustava u odnosu na prirodan zvuk u rasponu od 1 do 10

## Prostornost pri reprodukciji

Prostornost pri reprodukciji vrednuje se još i:

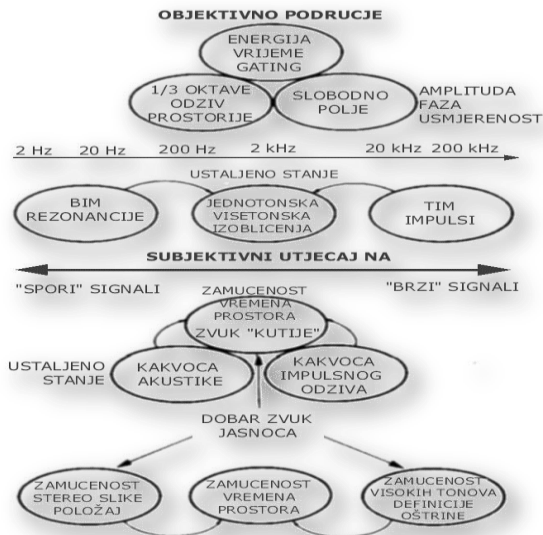
**Definiranom zvučnom slikom**, na što ukazuju stabilna lokacija i stabilnost položaja instrumenata pri reprodukciji.

**Kontinuirana prostornost zvučne slike** opisuje vjernost rasporeda izvora po dubini i širini zvučne scene.

**Širina zvučne scene** opisuje širinu lokacije instrumenata

**Dubina zvučne scene** opisuje osjet udaljenosti izvora

**Reprodukcijski dojam** opisuje reverberacijsku karakteristiku prostora i uronjenost slušatelja u zvučno polje



Stručnjaci za elektroakustička mjerenje ustanovili su kako se najmanje šest elektroakustičkih mjerenja dobro podudara sa subjektivnim vrednovanjem zvuka.

22.9.2013.

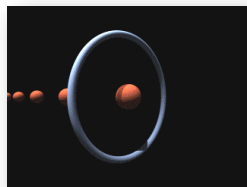
Ozren Bilan

65

## Mjerenja koja se dobro podudaraju sa subjektivnim vrednovanjem zvuka

Tih šest mjerenja su:

- trećinskooktavni frekvencijski odziv,
- vremenska distribucija energije,
- gating,
- mjerenja u slobodnom polju,
- intermodulacija niskih frekvencija (BIM),
- dvotonska ustaljena izobličenja i
- tranzijentna intermodulacija.



Rezultati ovih mjerenja pokazuju utjecaj na subjektivna područja kakvoće zvuka sustava. Rezultati navedenih mjerenja direktno ukazuju na kakvoću akustike prostorije, nepreciznost prostorno-vremenskih informacija, kakvoću impulsnog odziva, kakvoću stereo slika i lokalizaciju izvora, kakvoću prostorno vremenskih informacija te kakvoću visokih tonova, definicije i oštine.

22.9.2013.

Ozren Bilan

66

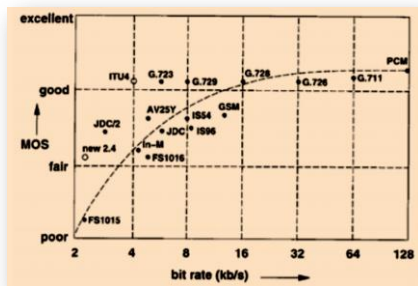
# Vrednovanje *codeca*

Subjektivno vrednovanje zvuka, npr. vrednovanje *codeca*, obavljaju se prema preporuci ITU-R, 1994. *Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems*. ITU-R Recommendation BS.1116. Geneva, 1994. Općenito, možemo opisati uvjete testiranja kao:

- Trostruki podražaj / skrivena referenca / dvostruko slijepi postupak
- Ispitni materijal snimljen na DAT uređaju u postavi Ref/A/B/Ref/A/B
- BS.1116 opisivanje pri stupnjevanju *Temeljne audio kakvoće*

brzina, izlaz, *bitrate* (bit/s)

- kvaliteta
  - objektivna mjerila (*klasične* metode, izobličenje signala i SNR, nisu dobra mjerila za ljudsku percepciju rekonstruiranog signala)
  - subjektivna mjerila (često važnija od objektivnih!)
  - kašnjenje
  - algoritamsko kašnjenje u koderu na izvoru - koliko traje kodiranje
  - kod dekodiranja - koliko traje dekodiranje?
  - sinkronizacija s ostalim medijima u višemedijskoj aplikaciji
  - otpornost na gubitke
  - važno za prijenos preko mreže
  - primjena na ostale zvukove koji nisu govor, npr. *fax* i *modemske signale*, te glazbu
  - složenost sklopovlja i programa
  - cijena izvedbe
- 22.9.2013.

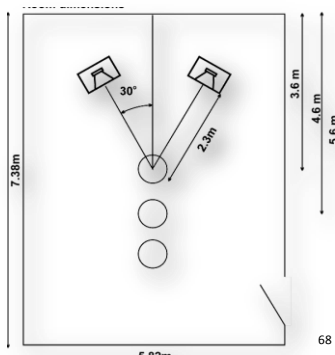


Ovisnost kvalitete i brzine kodera

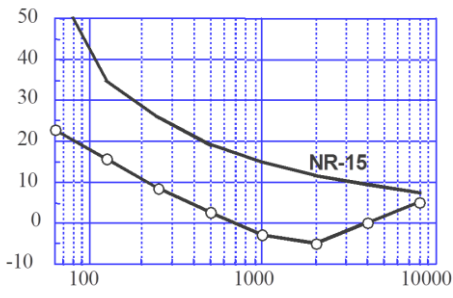
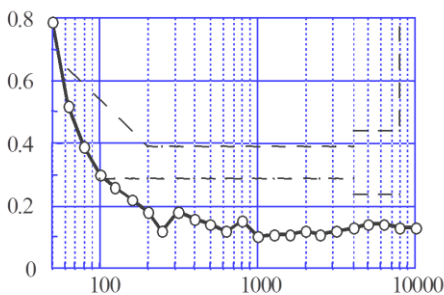
## Primjer

- Dimenzije** prostorije: dužina 7.3m, širina 5.8m, visina 3.3m.
- Površina** 42.95 m<sup>2</sup> i **volumen** 141.74 m<sup>3</sup> (slika)
- Slušatelji su na **udaljenosti** 2.30 m, 3.20 m i 4.15 m.
- Visina akustičkih centara zvučnika je 1.32 m.
- Razine** na mjestima slušatelja su: A= 85, B= 83 i C= 81.5 dB.
- Pri ispitivanju, uređaji se **prikazuju tablično**

Kom	opis	Model
1	Digitalni Audio Tape	PCM-7050
1	D/A pretvarač	DCS 952
2	Zvučnički sustav	2S-3003
1	Pojačalo snage	PRO-20



- ❑ **Vrijeme odjeka** prostorije treba prikazati dijagramom.
- ❑ **Srednje vrijeme odjeka**, prema standardu BS.1116 prikazano je crtkano. Prostorija ima kraće vrijeme odjeka od preporučenog.
- ❑ **Razinu buke** u prostoriji treba prikazati dijagramom.
- ❑ Razina buke na mjestu slušatelja zadovoljava **kriterij NR-15**.



22.9.2013.

Ozren Bilan

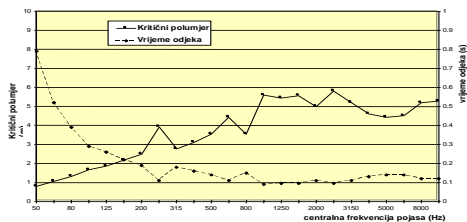
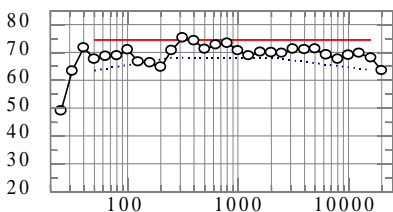
69

## Zahtjev za položaj slušatelja

Jedan od zahtjeva pri subjektivnom ispitivanju je da se **slušatelji trebaju nalaziti na udaljenosti većoj od kritičnog polumjera**.

Kritični polumjer je udaljenost od izvora na kojoj je razina direktnog zvuka jednaka razini ječnog zvuka. Može se izraziti iz:  $Q/4\pi r = 4(1-\alpha)/S a$ .

Pri uvjetima u ispitnoj prostoriji, i aproksimaciji faktora usmjerenosti zvučnika, koji se linearno mijenja, od 1 na 50 Hz (kružna karakteristika) do 4 na 10 kHz, dobije se dijagram prikazan na slici:



Na mjestu slušatelja treba snimiti frekvencijski odziv i prikazati kritični polumjer:

22.9.2013.

Ozren Bilan

70