

ANALIZA, SINTEZA I MJERENJE KARAKTERISTIKA ELEKTRODINAMIČKOG ZVUČNIKA U POTPUNO ZATVORENOJ KUTIJI



U radu je analizirana, sintetizirana i izmjerena karakteristika elektrodinamičkog zvučnika u potpuno zatvorenoj kutiji:

- Odabran je zvučnik kojim se može realizirati potpuno zatvorena mala zvučnička kutija.
- Analiziran je zvučnik u potpuno zatvorenoj kutiji i dokazano je da je riječ o visokopropusnom filtru drugog reda. Temeljem analize realizirana je zvučna kutija.
- Primjenom sigma-delta mjernog sustava izmjerene su osnovne karakteristike.

UVOD

Želimo li od elektroakustičkog sustava izvući maksimum kvalitete zvuka, nužan uvjet je sustav smjestiti u pogodnu okolinu kako bi mogao funkcionirati. Pogodna okolina je akustički obrađena prostorija za slušanje, slušaonica ili multimedijalna prostorija. Drugi neophodan uvjet je vrhunska kvaliteta zvučnika i njihova točna postava u prostoriji te pravilno sprezanje s pojačalom.

Za dobivanje bilo kakvog korisnog zvuka dinamičkim zvučnikom neophodno ga je ugraditi u kutiju. Zvučnik je moguće ugraditi u:

- otvorenu kutiju,
- zatvorenu kutiju ili
- kutiju s lijevkom.

U potpuno zatvorenoj kutiji cilj nam je potpuno poništiti stražnje zračenje membrane i apsorbirati ga unutar kutije tako da zvučni val kojeg zvučnik emitira sa stražnje strane – u kutiju, ne može djelovati na zvučni val koji se emitira s prednje strane – van kutije. Sistemi zvučnika u potpuno zatvorenoj kutiji se izrađuju u većim dimenzijama da bi akustička elastičnost zatvorenog zraka bila veća od elastičnosti ovjesa zvučnika.

DINAMIČKI ZVUČNIK

- U svojoj biti dinamički zvučnik pretvara električnu energiju, koju mu zvučničkim vodovima predaje izlazno pojačalo snage, u akustičku energiju - zvuk. Zbog toga zvučnik nazivamo i elektroakustičkim pretvaračem.
- Dinamički zvučnik ima tri osnovne mehaničke strukture – membranu koja pobuđuje zrak na titranje, zavojnicu koja pobuđuje membranu na titranje i centrator sustava, u biti elastičnu oprugu, koja vraća membranu i zavojnicu u početni položaj.
- Uobičajena je podjela dinamičkih zvučnika po osjetljivosti, efikasnosti i linearnosti.
- Efikasnost se izražava omjerom akustičke i električne snage.
- Osjetljivost pokazuje izmjereni zvučni tlak na osi zvučnika pri zadanoj ulaznoj snazi i udaljenosti (najčešće 1 W/1m).

SASTAVNI DIJELOVI DINAMIČKOG ZVUČNIKA

- Zavojnica zvučnika izrađuje se najčešće od bakra koji je čvrst i ne puca prilikom savijanja. Koristi se za najveće električne snage.
- Nosač zavojnice nosi zavojnicu u magnetskom polju procjepa i spaja zavojnicu s membranom i centratorom. Nosači zavojnica od impregniranog kartona su najlakši, ali i najmanje kruti te temperaturno nestabilni. Rijetko se koriste na ozbiljnim zvučnicima.
- Membrana je najvažnija komponenta zvučničke strukture. Ona omogućava povezivanje strukture koja emitira zvuk i zračnog opterećenja sa zavojnicom uz istovremeno djelovanje kao mehanički pretvarač.
- Poklopac ili centralna kupola zvučnika postavlja se u cilju sprječavanja ulaza stranih tijela i prašine u procijep zvučničkog magneta. Pored toga, kupola ventilira zavojnicu pa tako poboljšava hlađenje.

THIELE-SMALL PARAMETRI

- Sve osobine mehaničkih elemenata zvučnika membrane, zavojnice i elastičnosti možemo predstaviti s tri Thiele-Smallova parametra: f_s , V_{AS} , Q_T (pri čemu Q_T ovisi o Q_E i Q_M)
- Q-faktor, Q_{ts} , je mjera dobrote rezonancije zvučnika ovješnog u zraku. Definiran je relacijom $f_s/(f_h - f_l)_s$, gdje su f_h i f_l gornja i donja frekvencija s vrijednostima impedancije od -3dB prema vrijednosti impedancije na frekvenciji f_s rezonancije zvučnika.
- Ukupni Q_T faktor dobit ćemo tako da produkt električnog i mehaničkog faktora podijelimo njihovom sumom.
- Rezonantna frekvencija ovisi o pokretnoj masi zvučnika i elastičnost ovjesa.
- -Ekvivalentna zapremnina ovisi o elastičnosti ovjesa i značajkama membrane.
- -Električni Q faktor opisuje "*krutost amortizera*" u funkciji pokretne mase, elastičnosti ovjesa i snazi elektromehaničkog pretvarača.
- -Mehanički Q faktor ovisi o pokretnoj masi, elastičnosti ovjesa i mehaničkom otporu ovjesa.

PRIMJENJIVOST POJEDINOG ZVUČNIKA ZA ODREĐENI TIP KUTIJE

- Mjera primjenjivosti pojedinog zvučnika u nekom tipu konstrukcije kutije je tzv. EBP, tj. učinak efikasnosti i širine pojasa. Prema R.H. Small-u pokazuje prikladnost pojedinog zvučnika za određeni tip zvučničke kutije. Jednak je kvocijentu f_s/Q_t , tj. kvocijentu rezonancije zvučnika u zraku i ukupnog Q faktora.
- Zvučnik za potpuno zatvorenu kutiju trebao bi imati EBP od 50 do 99, a za bas refleks od 100 do 149. U principu te su vrijednosti orijentacione i ne treba ih se čvrsto pridržavati, ali mogu biti dobar indikator primjenjivosti na početku projekta.
- Za zvučnički sustav s potpuno zatvorenom kutijom primjenjivi su zvučnici sa relativno visokim Q_{TS} faktorom, na manjim od 0.3. Pored toga potrebna je relativno niska rezonancija zvučnika u zraku F_s .

-
-
-

POTPUNO ZATVORENA KUTIJA

- **Potpuno zatvorena kutija** ili tzv. kompresijska kutija je najjednostavniji tip kutije u kojoj zvučni val kojeg zvučnik emitira sa stražnje strane – u kutiju, ne može djelovati na zvučni val koji se emitira s prednje strane – van kutije.
- Sve potpuno zatvorene kutije su sustavi drugog reda pa ispod donje odrezne frekvencije guše niskofrekvencijski odziv nagibom od 12dB / oktavi.
- **Materijali za izradu zvučničke kutije** su homogeni materijali velike gustoće, poput vodootporne šperploče, bez šupljina, debljine 19 mm ili deblji npr. 24 mm se preporučuje za zvučničke kutije koje se često prenose. Za zvučničke kutije koje su namijenjene za permanentne instalacije preporučuje se srednje gusta iverica ili medijapan ploča s oznakom MDF (Medium Density).
- **Raspored zvučnika na prednjoj ploči**
Za najbolju ujednačenu karakteristiku odziva u vodoravnoj ravnini, zvučnici trebaju biti postavljeni jedan iznad drugog. Uz to, os kašnjenja signala između zvučnika (tzv. referentna os) mora biti usmjerena prema poziciji slušatelja.

-
-
-

DIFRAKCIJSKI GUBICI

- Rubovi prednje ploče generiraju refleksije zvučne energije uslijed difrakcije. Te pojave uzrokuju postepeno slabljenje impulsnog odziva, karakteristike usmjerenosti i frekvencijskog odziva zvučnika.
- Pobudu difrakcijskog vala predstavlja val koji se širi neposredno po prednjoj ploči kutije.
- Zaobljavanjem rubova zvučničke kutije ili oblaganjem prednje ploče akustički apsorpcijskim materijalom, ova pojava se može u velikoj mjeri smanjiti.

Izvor difrakcijskog vala pored rubova kutije, može biti bilo koji diskontinuitet na prednjoj ploči kutije (npr. kućište zvučnika, pribor za montažu zvučnika, kućište i membrana drugih zvučnika koji su montirani na prednjoj ploči, otvori na kutiji itd.) Najjednostavniji način da se ova mjesta zaštite od difrakcijske pobude jest da se ona oblože apsorpcijskim materijalom.

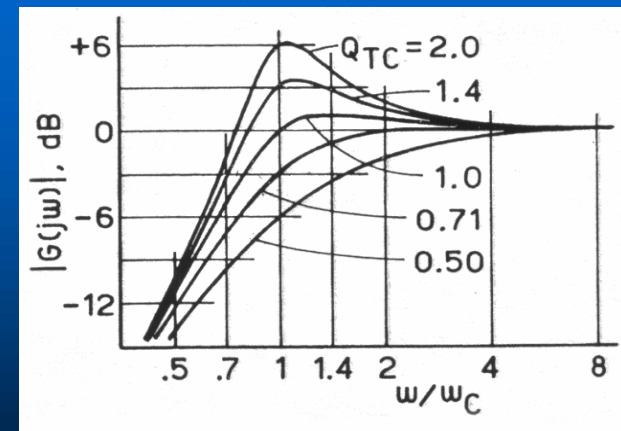
Q_{TC} sustava

- Q_{tc} je Q faktor potpuno zatvorene kutije koji određuje impulsni odziv sustava. Općenito je pravilo da za vrlo niski Q_{tc} treba vrlo velika kutija. Q_{tc} sustava se izračunava iz Q faktora zvučnika i Q faktora zvučničke kutije.
- $Q_{tc} = 0,5$ je *kritično prigušeni* sustav i daje vrlo definiran ali tanki bas s idealnim impulsnim odzivom pri čemu je relativni zvučni pritisak -6 dB na rezonanciji sustava.
- $Q_{tc} = 0,577$ rezultira *Besselovim* odzivom s maksimalno linearnom karakteristikom kašnjenja.
- $Q_{tc} = 0,707$ rezultira *Butterworth* odzivom s maksimalno linearnim amplitudnim odzivom pa se najčešće koristi.
- $Q_{tc} = 1,0$ poznat je kao *popularni* bas. Daje bogati bas i dobar tranzijentni odziv.
- $Q_{tc} = 1,4$ Daje vrlo *bogati* bas ali loš tranzijentni odziv.
- $Q_{tc} = 2,0$ Vrlo *bogati debeli* bas i vrlo loš tranzijentni odziv.

FREKVENCIJSKI ODZIV

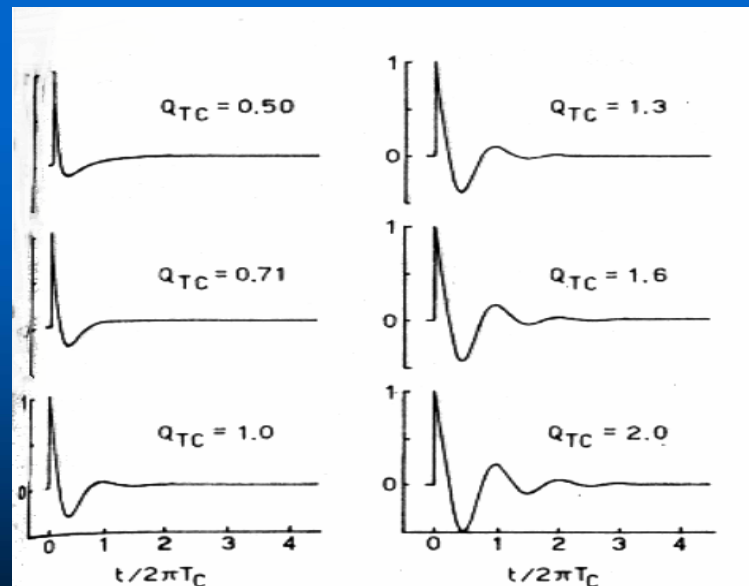
- Funkcija odziva u sustavu zatvorene kutije predočena je izrazom:
- To je funkcija visokopropusnog filtera drugog reda s nagibom 12 dB/oktavi. U njoj su sadržane informacije o svojstvima amplitude niske frekvencije, fazi, kašnjenju i impulsnom odzivu sustava zatvorene kutije. Taj sustav je sustav minimalne faze, stoga su navedene karakteristike međusobno povezane, prilagođavanje jedne određuje svojstva drugih. Na slici je prikazano nekoliko tipičnih krivulja odziva, uz ljestvicu frekvencije normaliziranu na ω_c . Krivulja za $Q_{TC} = 0.50$ je kritično prigušeni odziv drugog reda. Za izraz $Q_{TC} = 0.71$ krivulja je Butterworth drugog reda (B2) maksimalno linearni odziv. Više vrijednosti Q_{TC} dovode do nadvišenja u odzivu, zajedno s relativnim proširenjem pojasne širine koja je početno veća od relativnog vrhunca odziva.

$$G(s) = \frac{s^2 T_C^2}{s^2 T_C^2 + s T_C / Q_{TC} + 1}$$



TRANZIJENTNI ODZIV

- Tranzijentni odziv je odziv sustava zatvorene kutije na impulsnu ili step pobudu.
- Za vrijednosti Q_{TC} koje su veće od 0.50 odziv je oscilirajući uz povećanje vrijednosti Q_{TC} koje doprinose povećanju amplitude i vremenu opadanja.



UČINKOVITOST I POMAK

- Učinkovitost sustava zatvorene kutije u području širine frekvencijskog spektra, ili referentna učinkovitost sustava, predstavlja referentnu učinkovitost zvučnika koji djeluje uz određenu vrijednost mase zračnog opterećenja kućišta sustava.
- Funkcija pomaka sustava zatvorene kutije $X(s)$ koja je naznačena u izrazu predstavlja nisko propusnu filter funkciju drugog reda.

$$\eta_0 = \frac{4\pi^2}{c^3} \cdot \frac{f_S^3 V_{AT}}{Q_{ES}}$$

$$\eta_0 = \frac{4\pi^2}{C_3} \cdot \frac{f_S^3 V_{AT}}{Q_{EC}}$$

$$X(s) = \frac{1}{s^2 T_C^2 + s T_C / Q_{TC} + 1}$$

USPOREDBA KOMPJUTERSKOG I RUČNOG PRORAČUNA

- $F_c = 100 \text{ Hz}$
- $V_c = 22 \text{ l}$
- $\eta = 0.221 \%$

$$f_K = f_S \frac{Q_{TC}}{Q_{TS}} = 88.77 \frac{1.76}{1.63} = 95.8 \text{ Hz}$$

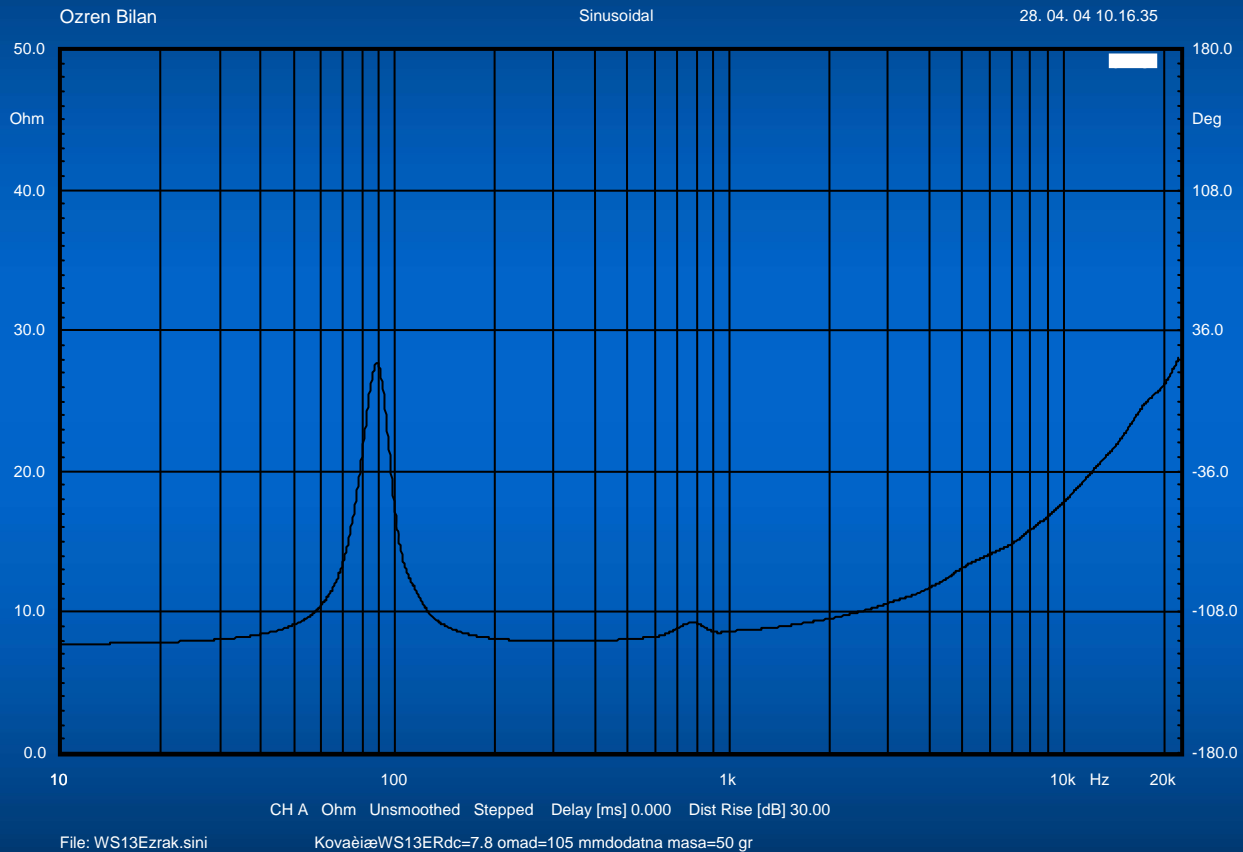
$$V_K = 0.87 \frac{V_{AS}}{\left(\frac{f_K}{f_S}\right)^2 - 0.87} = 22,51$$

$$P_{AR(\max)} = 0.424 \cdot \frac{f_K^4 \cdot V_D^2}{X_{MAX}^2} = 0.22 \text{ W}$$

$$\eta_o = \frac{4\pi^2}{C^3} \cdot \frac{f_S^3 \cdot V_{AS}}{Q_{ES}} = 0.272\%$$

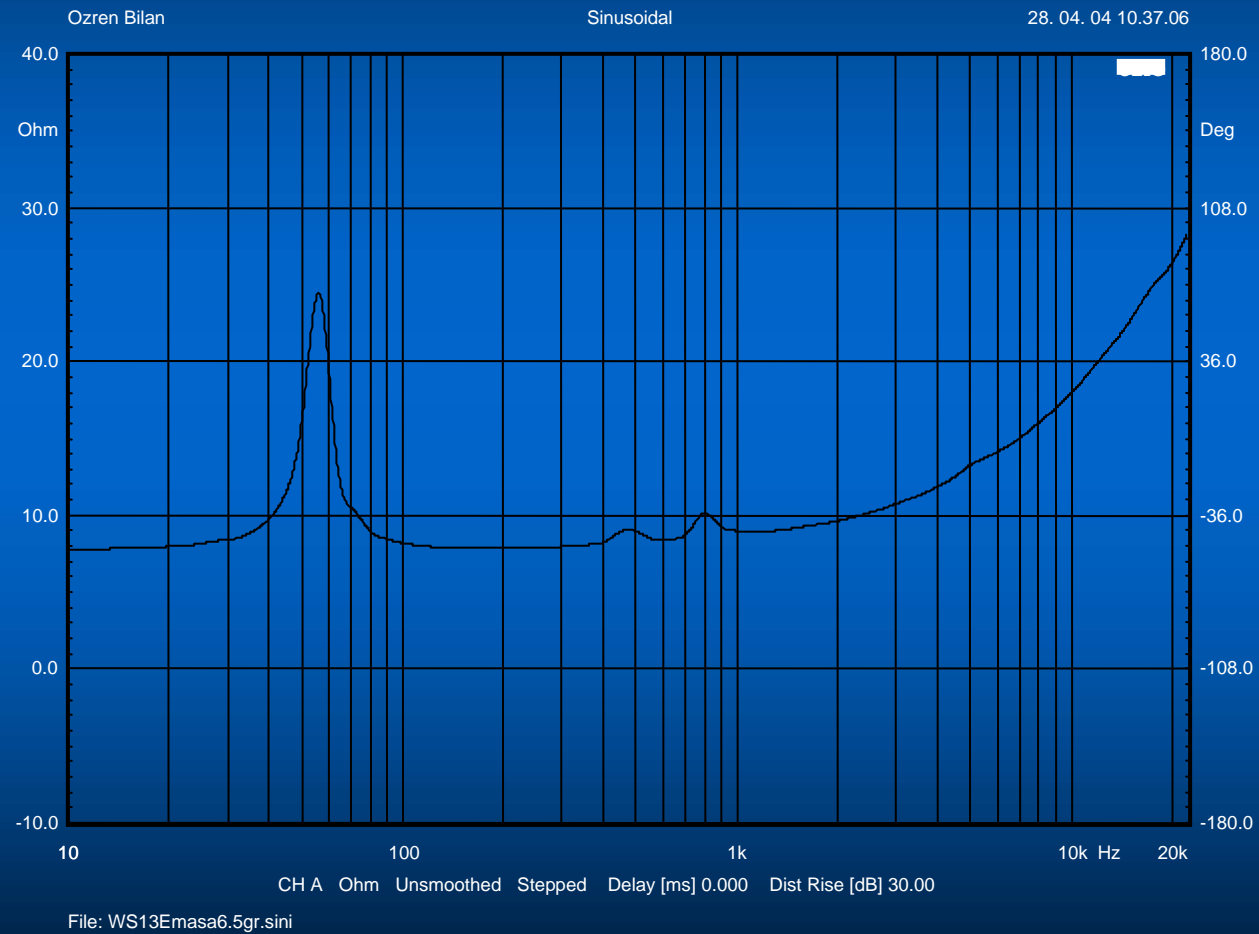
Teoretska analiza i rezultati mjerenja pokazali su dobro slaganje, obzirom da nam nije bio poznat način mjerenja T-S parametara od strane proizvođača zvučnika.

REZULTATI MJERENJA

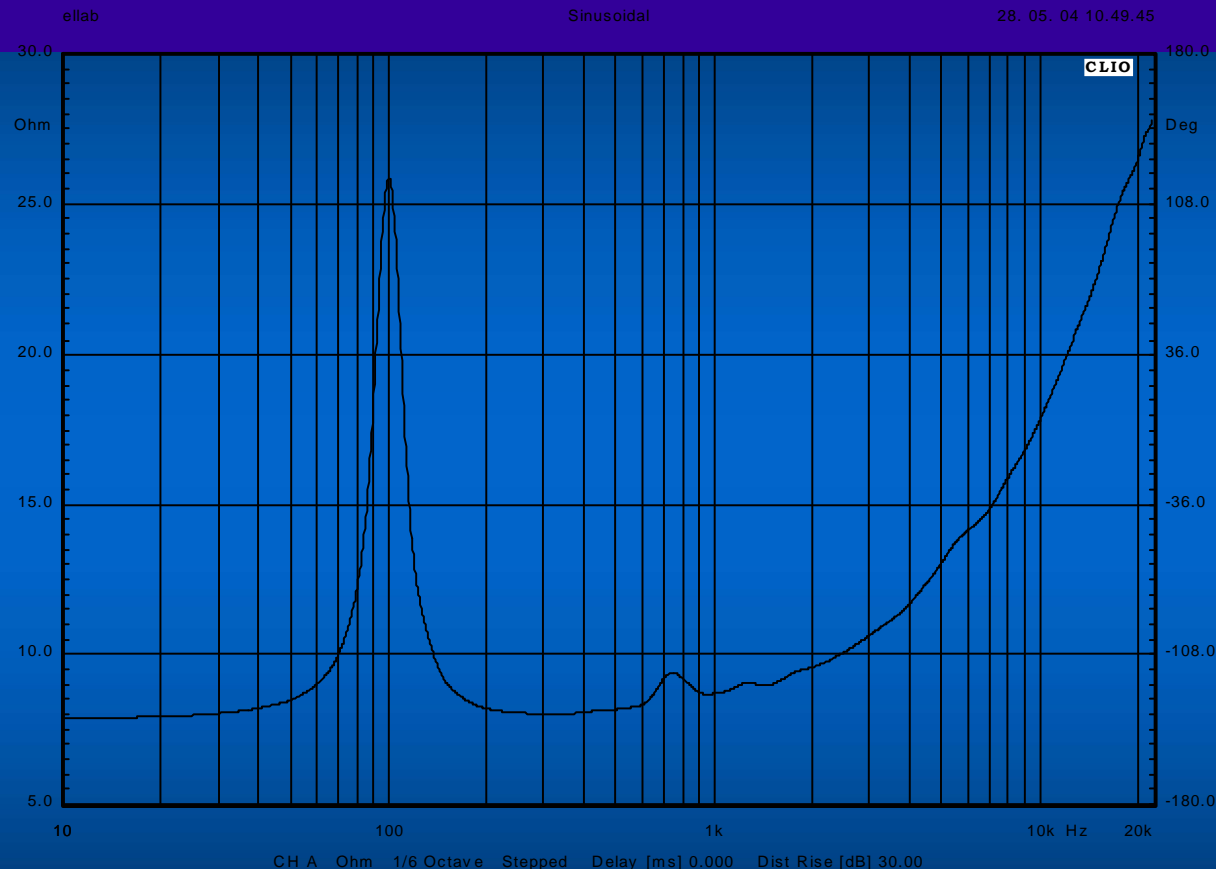


FFT MODUL IMPEDANCIJE ZVUČNIKA U ZRAKU

Fft modul impedancije zvučnika sa dodanom masom

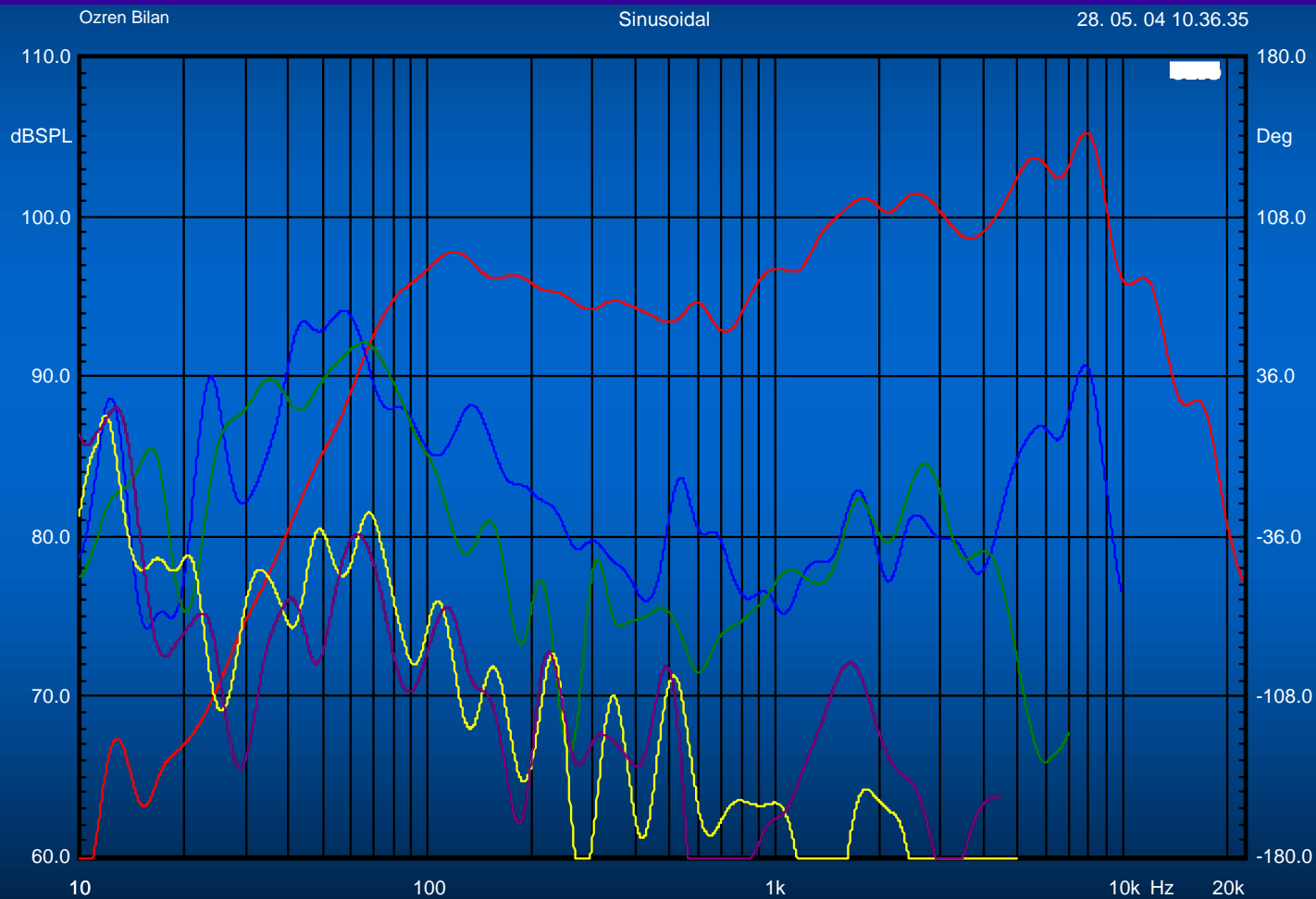


Fft modul impedancije zvučnika u kutiji



FFT Modul impedancije zvučnika u kutiji volumena 22 litre. Vrh na krivulji modula impedancije odgovara rezonantnoj frekvenciji zvučnika u danoj kutiji i iznosi 95 Hz. Definiran je pomoću pokretne mase membrane i ansambla zavojnice, elastičnosti ovjesa zvučnika i elastičnosti zraka unutar kutije.

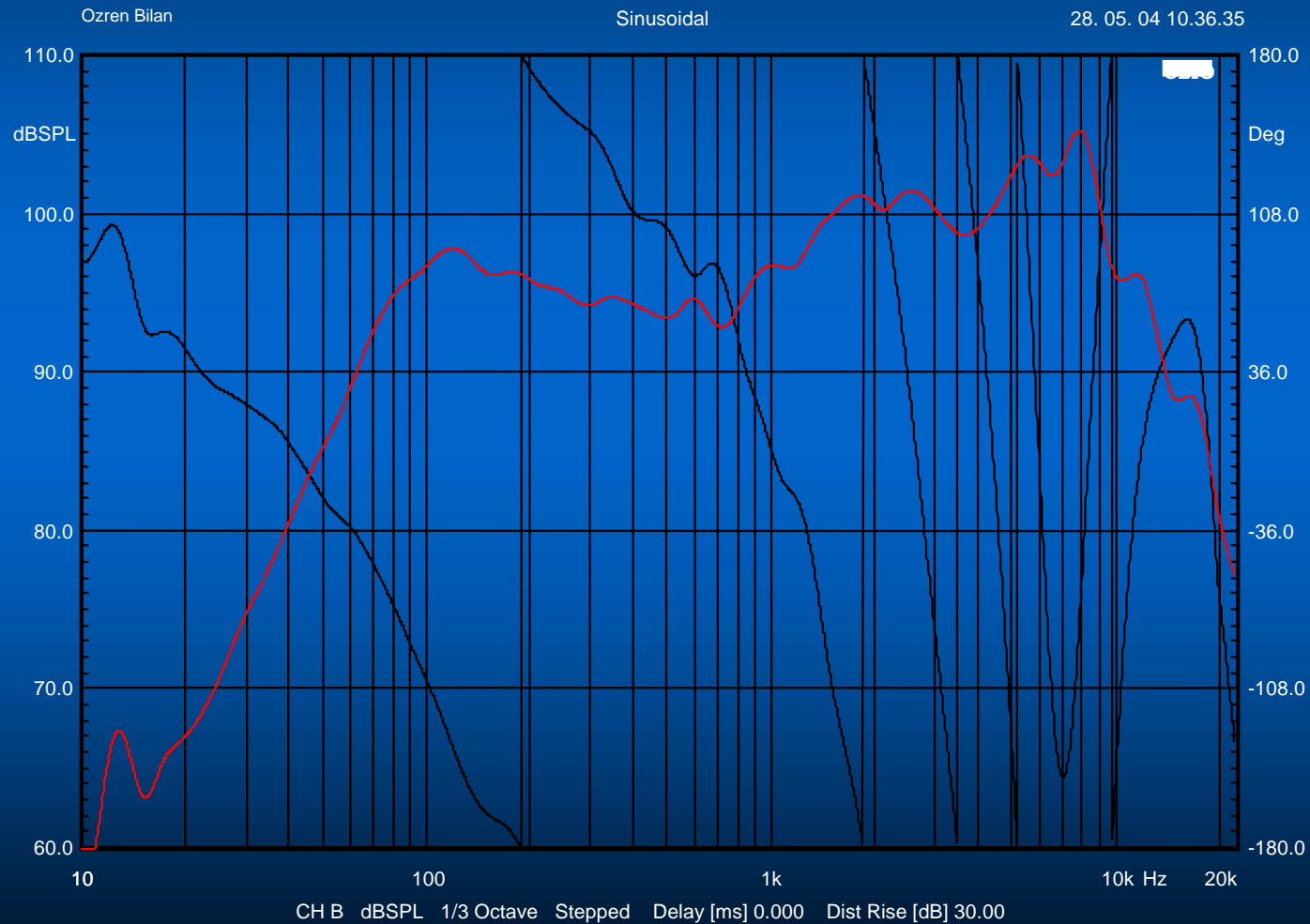
Izobličenja harmonika od 2. do 5.



CH B dB SPL 1/3 Octave Stepped Delay [ms] 0.000 Dist Rise [dB] 30.00

File: WS13E sinusni sweep.sin

Frekvencijski odziv koračnim klizajućim tonom i fazni odziv



File: WS13E sinusni sweep.sin

REALIZIRANA ZVUČNIČKA KUTIJA

Dimenzije zvučničke kutije u obliku idealnog paralelopipeda - "zlatni rez"

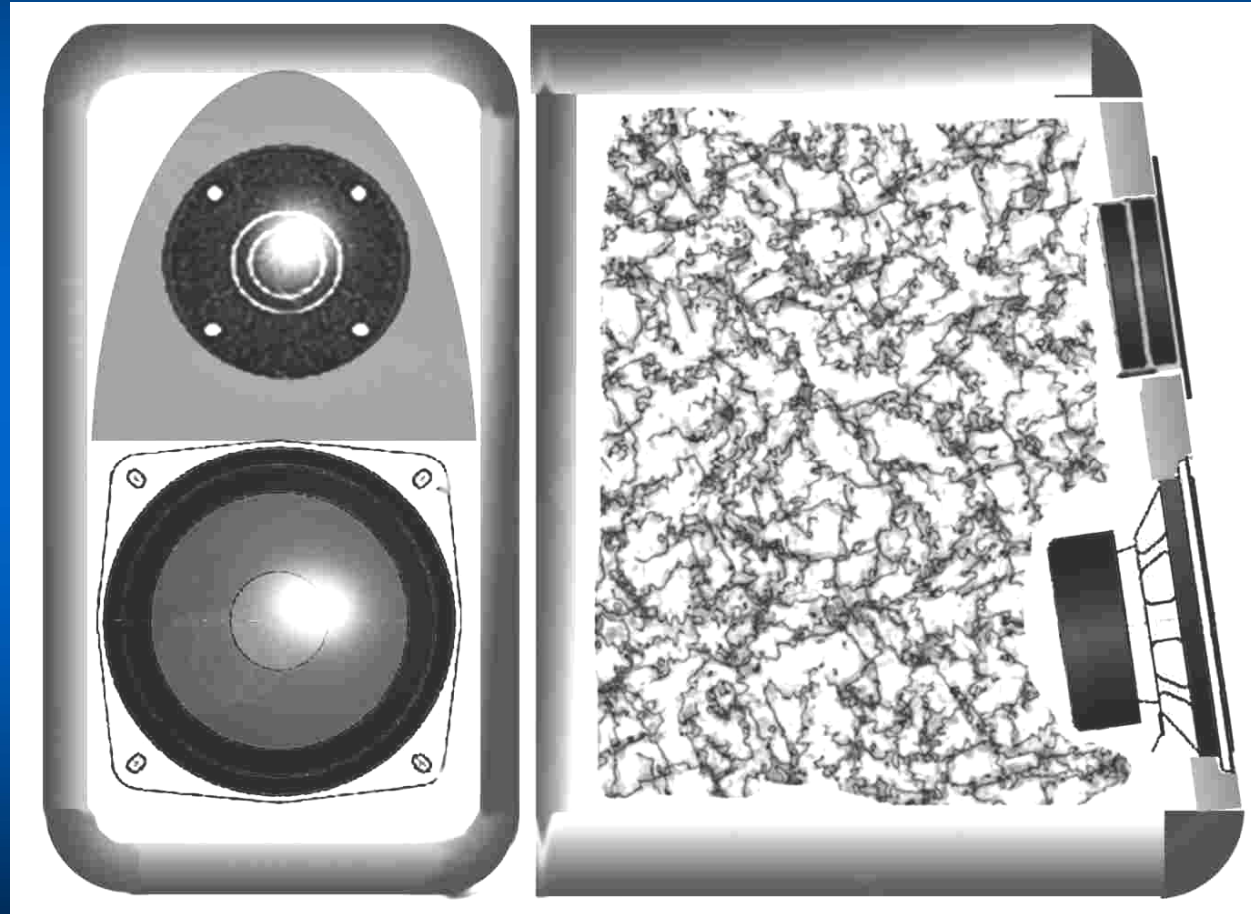
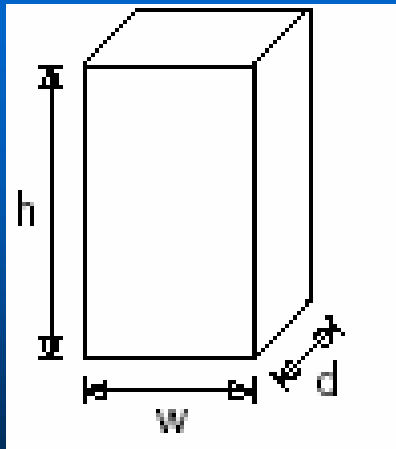
Vol = 20,00 lit

Oblik: Optimalna prizma

$h = 44,50$ cm

$w = 27,50$ cm

$d = 17$ cm



ZAKLJUČAK

- U radu smo: analizirali zvučnik u potpuno zatvorenoj kutiji i pokazali da je riječ o visokopropusnom filtru drugog reda.
- To je funkcija visokopropusnog filtera drugog reda s nagibom 12 dB/oktavi. Ona sadrži informacije o svojstvima amplitude niske frekvencije, fazi, kašnjenju i impulsnom odzivu sustava zatvorene kutije. Taj sustav je sustav minimalne faze, stoga su navedene karakteristike međusobno povezane jer prilagođavanje jedne određuje svojstva drugih. U audio-sustavima obično se smatra kako su najvažnije ujednačenost i raspon frekvencijskog odziva. Teoretski smo analizirali realizaciju zatvorene zvučničke kutije.
- Temeljem T-S parametara iz kataloga smo odabrali zvučnik kojimu smo primjenom sigma-delta mjernog sustava izmjerili Thiele Small karakteristike.
- Prikazanim analitičkim metodama i primjenom računala projektirali smo potpuno zatvorenu kutiju istog tipa. Temeljem dobijenih rezultata analize realizirali smo zvučnu kutiju pa smo primjenom sigma-delta mjernog sustava izmjerili njene najvažnije karakteristike.
- Teoretska analiza i rezultati mjerenja pokazali su dobro slaganje, obzirom da nam nije bio poznat način mjerenja T-S parametara od strane proizvođača zvučnika. Zvučničku kutiju smo nadopunili dodatnim visokotonskim zvučnikom u zvučnički sustav i predložili smo realizaciju pasivnog ili aktivnog filtera tipa LR4 kojim bi se realizirale optimalne karakteristike sustava.