



MJERENJE KARAKTERISTIKA IZLAZNOG AUDIO POJAČALA SNAGE SIGMA-DELTA MJERNIM SUSTAVOM

Zadatak: Analizirati audio pojačala snage sa stajališta osnovnih zahtjeva:

- snage
- frekvencijske širine pojasa
- nelinearnih i linearnih izobličenja
- klasa rada
- sustava ispravka greške
- izlazne impedancije
- otvorene petlje
- arhitekture sklopova.

Temeljem analize primjenom sigma-delta mjernog sustava izmjeriti osnovne karakteristike pojačala



UVOD

Pojačalo snage je sklop koji nam služi za pojačanje snage.

U principu funkcija pojačala snage je jednostavna: ono treba pretvoriti ulazni signal, koji je male snage u signal veće izlazne snage, te treba izvesti ovo pojačanje sa što manjom promjenom valnog oblika ulaznog signala.

Snaga se može pojačati jednim od tri moguća načina, tj. njihovom kombinacijom:

- Izlazna struja treba biti veća, nego ulazna struja - strujno pojačanje.
- Izlazni napon treba biti veći od ulaznog napona. To je naponsko pojačanje.
- Izlazna impedancija pojačala treba biti manja od ulazne impedancije. Potreban je još jedan uvjet:
- Produkt strujnog i naponskog pojačanja treba biti veći od 1.

-
-
-

Pri konstrukciji pojačala javljaju se određeni prioriteti koje projektant treba zadovoljiti jer oni značajno djeluju na kvalitetu rješenja.

Ti funkcijski faktori su:

- Izbor aktivnih elemenata
- Rješenje ulaznog sklopa pojačala
- Rješenje izlaznog sklopa
- Korekcija greške i tip povratne veze
- Tehnologija materijala i konektora
- Rješenje sklopova zaštite
- Konačna izvedba, težina i dimenzije
- Objektivne značajke zvuka, šum i izobličenja

Konačno ispitivanje je procjena:

- Subjektivnih osobina zvuka pojačala snage

-
-
-

IZBOR AKTIVNIH ELEMENATA

Tranzistori

Njegove dimenzije koje omogućavaju malu masu i prenosive verzije uređaja. Uređaji realizirani tranzistorima su lagani i ne zahtijevaju velike transformatore snage.

Bipolarni tranzistor je strujno upravljani element kojemu je tok struje između kolektora i emitera posljedica toka struje između baze i emitera. MOSFET pripada skupini naponski upravljanih elemenata poput elektronskih cijevi.

Elektronske cijevi

Trioda ima bolju strukturu izobličenja od tranzistora

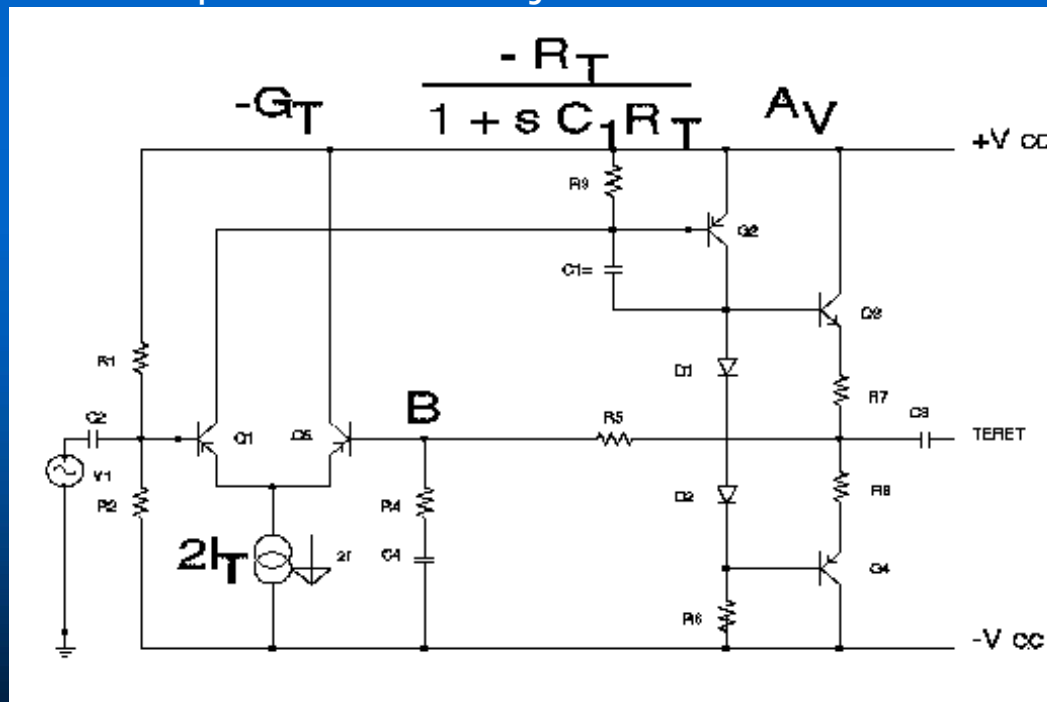
Unutrašnji kapacitet elektronske cijevi je kvalitetniji od tranzistorskog jer vodljivi materijali imaju manji dielektrički apsorpcijski faktor, a uz to dielektrik je vakuum koji ima vrlo nizak disipacijski faktor.

Karakteristike izobličenja triode su povoljnije po strukturi od onih koje generiraju tranzistorska pojačala snage.

-
-
-

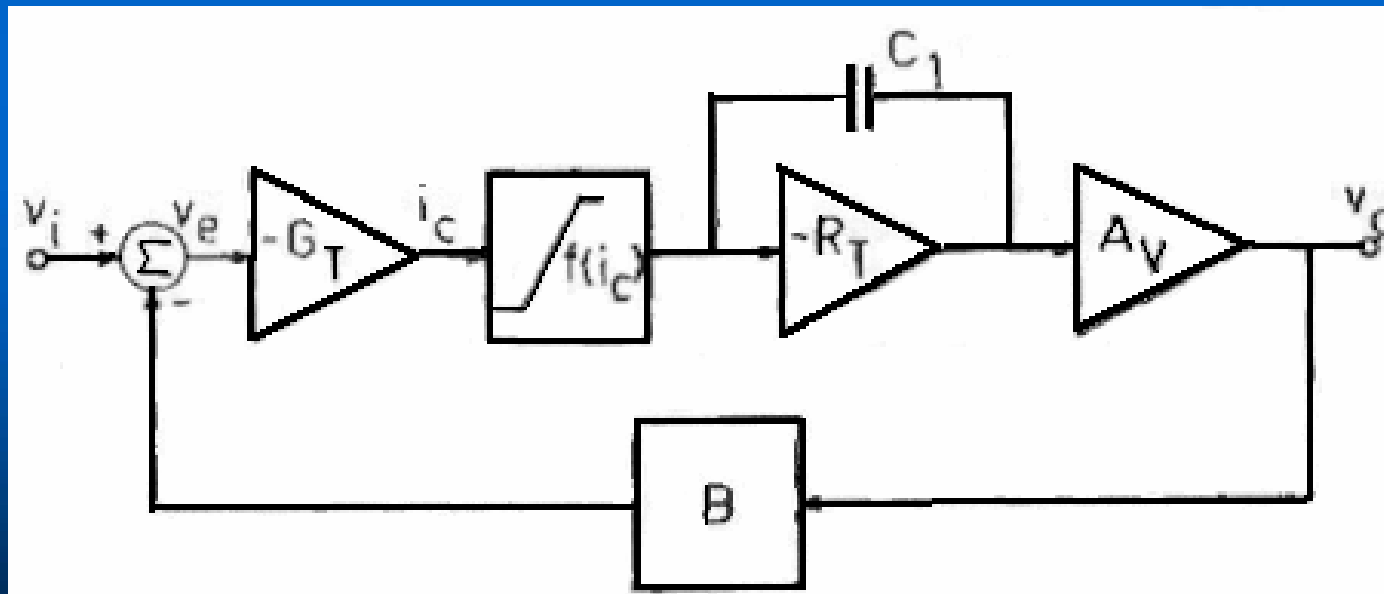
Na slici je prikazana pojednostavljena shema tipičnog tranzistorskog audio frekvencijskog pojačala snage, koje se sastoji od tri stupnja u kaskadi:

- Prvi stupanj predstavljen je transkonduktancijom $-G_T$
- Drugi je kompenzirani stupanj u funkciji kompleksne frekvencijske varijable s , $-R_T(1+sC_1R_T)$
- Treći je stupanj sa naponskim pojačanjem A_V . Negativna povratna reakcija ima naponski faktor povratne reakcije B .



Primjena negativne povratne reakcije

Da bismo smanjili izobličenja potrebno je primijeniti negativnu povratnu reakciju koja se može realizirati na više načina. Negativna povratna veza se najčešće primjenjuje u spoju prema slici.



Primjena negativne povratne veze

-
-
-

Utjecaj modula impedancije zvučnika

Prilikom ispitivanja izlaznog pojačala snage, ono se ne spaja na neki stvarni zvučnik s kompleksnim modulom impedancije, nego se zvučnik zamjenjuje omskim otporom.

Razne norme predlažu da se impedancija zvučnika ne smije mijenjati više od 20% od nazivne vrijednosti, međutim, vrlo rijetki su zvučnici čija je impedancija linearna, a uzrok nelinearnosti su reaktivne komponente. Te komponente izazivaju povećane zahtjeve pojačalu snage koja se ne mogu analizirati elektroakustičkim mjerenjima na teretu koji je čisti omski otpor. Pri konstrukciji pojačala karakteristike se mogu mjeriti na nadomjesnoj impedanciji nekog realnog zvučnika.

Pojačalo treba projektirati za male snage, uz mogućnost davanja velikih struja u trajanju 2-20 ms, te su za tu svrhu konstruirani posebni ispravljajući sklopovi.

-
-
-

Rješenje sklopova zaštite

Sustav zaštite kod pojačala treba štiti pojačalo od štetnih signala, ali istovremeno treba štiti zvučnike od štetnih napona na izlazu pojačala:

Pojačalo se može štiti od:

- kratkog spoja na izlazu
- visoke temperature
- istosmjernog napona na izlazu
- prevelikog napona pobude
- itd...

-
-
-

Temperaturna zaštita

Temperaturna zaštita se koristi u svim pojačalima. Da ne bi došlo do oštećenja ili uništenja tranzistora, konstruktor postavlja osjetnik na hladnjak koji treba reagirati pravovremeno. Budući da prijenosna karakteristika tranzistora ovisi o temperaturi, bilo bi dobro da struja mirovanja bude podešena tako, da bude mala razlika između temperature u mirovanju i temperature pri punoj pobudi. Kako bi tranzistori dugo trajali ne smije im se dopustiti porast temperature preko 80°C, a to ćemo postići primjenom hladila.

Zaštita od kratkog spoja

U najvećem broju slučajeva za zaštitu od kratkog spoja poduzimaju se mjere strujnog ili naponskog ograničavanja ili obje.

-
-
-

Spajanje pojačala snage u most

Ako nam je potrebno realizirati veću izlaznu snagu, pojačala snage se mogu spojiti u most, tj. dva pojačala se spoje u seriju pa je izlazni napon dvostruko veći od napona jednog pojačala. Tako će za stalnu vrijednost impedancije tereta, snaga na teretu biti četiri puta veća od snage koju daje jedno pojačalo.

-
-
-

Sklopovi za ispravak greške

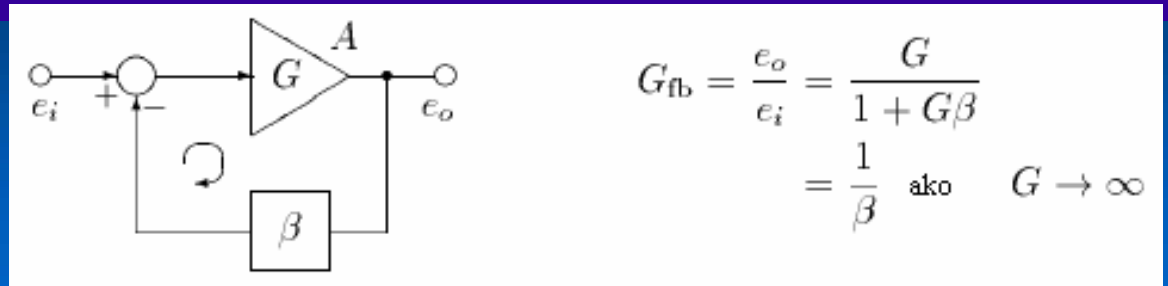
Gotovo svako pojačalo snage ima primijenjenu negativnu povratnu reakciju koju je otkrio H. S. Black. Dobre stvari koje dobijemo koristeći negativnu povratnu vezu su nadzor i smanjenje osjetljivosti pojačanja, povećanje prijenosne širine frekvencijskog pojasa, nadzor nad ulaznom i izlaznom impedancijom te poboljšanje linearnosti. Cijena koju moramo platiti za ova poboljšanja je smanjenje pojačanja. Međutim, negativna povratna veza može samo smanjiti grešku koja nastaje u sklopovima pojačala, ne može je potpuno ukloniti.

Za razliku od nje, unaprijedna reakcija, koju je također otkrio Black teoretski potpuno eliminira greške koje su nastale u sklopovima.

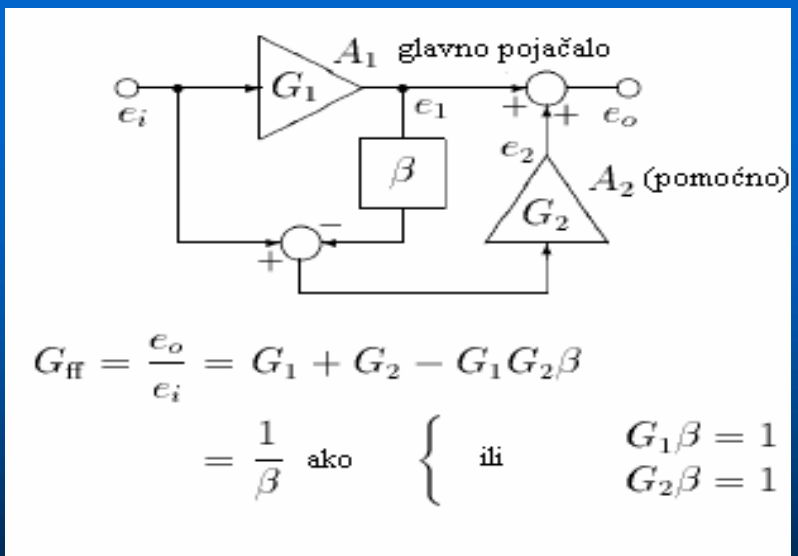
Prednosti negativne povratne veze su:

Pojačanje signala stabilizira se na vrijednost $1/\beta$

- Izlazna impedancija se smanjuje za faktor $(1+G\beta)$
- Izobličenja se smanjuju za $(1+G\beta)$



Pojačalo s pojačanjem otvorene petlje G i negativnom povratnom vezom s atenuacijom β .



Princip unaprijedne veze

-
-
-

Faktor prigušenja ili damping faktor

Damping faktor opisuje sposobnost pojačala u upravljanju neželjenih pomaka membrane zvučnika. Proizvođači nikad ne specificiraju izlaznu impedanciju pojačala, nego damping faktor. Izlazna impedancija pojačala jednaka je recipročnoj vrijednosti damping faktora. Drugim riječima, što je veći damping faktor, to je niža impedancija pojačala. Pri tome se pretpostavlja kako će zvučnik biti direktno priključen i ne uzima se u obzir otpor spojnih vodova.

Izlazna impedancija pojačala mjeri se pri otvorenoj i zatvorenoj petlji. Subjektivna ispitivanja pokazala su kako bolju kvalitetu zvuka pri reprodukciji niskih frekvencija imaju pojačala snage čija je izlazna impedancija otvorene petlje minimalna.

-
-
-

KLASE RADA POJAČALA

Postoji više osnovnih klasa, a najpoznatije su A, AB, B, C i D koje se razlikuju položajem radne točke na prijenosnoj karakteristici sklopa. Prije smo spomenuli da su druge klase kombinacije ovih osnovnih, te ih nećemo posebno razmatrati. Izbor neke od klasa temelji se na usporedbi između pojačanja, izlazne snage, učinkovitosti te ukupnog sadržaja izobličenja. Kada razmatramo učinkovitost pojačala tada bitnu ulogu ima struja mirovanja. Ona je uglavnom određena radnom točkom i trebala bi biti što je moguće manja ili čak nula, zato što ona povećava gubitke snage. U novije doba većina audio pojačala snage se nalazi u klasi B ili AB, klasu A koriste audiofili kojima ne smetaju velike potrošnje snage, dok je klasa D nepogodna za visoko kvalitetnu audio namjenu jer ne postiže kvalitetu kao ostale klase. Stoga je vrijedno pronaći rješenje koje kombinira prednosti efikasnosti klase B, te prednosti u linearnosti klase A. To je klasa AB.

-
-
-

Zahtjevi koji se odnose na pojačala snage

Primarni zahtjevi za pojačala snage su:

- da osiguraju dovoljnu izlaznu snagu
- da izbjegnu izobličenje signala
- da bude učinkovit
- da osigura zaštitu od abnormalnih uvjeta
- cijena uređaja

Drugi zahtjevi proizlaze iz činjenice da pojačalo ne smije mijenjati valni oblik signala tj. ne smije izobličavati signal.

Ideja za treći zahtjev je da disipacija snage u samom pojačalu treba biti što je moguće niža u usporedbi sa disipiranom snagom na teretu. Korisnost treba biti što je moguće veća.

Četvrti zahtjev proizlazi iz činjenice koja se odnosi na samozaštitu pojačala snage, s druge strane može također biti i zaštita za teret.

-
-
-

KARAKTERISTIKE POJAČALA

U sljedećem odjeljku su navedene neke karakteristike koje karakteriziraju performanse pojačala.

Snaga

Najvažnija karakteristika pojačala je njegova izlazna snaga. Ona je obično predstavljena kao kontinuirana snaga na određenom teretu.

Širina frekvencijskog područja

Pojasna širina pojačala je frekvencijski opseg, gdje su njegove karakteristike unutar naznačenih granica, najčešće $\pm 3\text{dB}$. Za audio pojačala obično je opseg od 20 Hz do 20 kHz.

-
-
-

OBJEKTIVNE KARAKTERISTIKE ZVUKA

Objektivne zvučne karakteristike pojačala snage definiraju se elektroakustičkim mjerenjima i analizom odziva zvučnog sustava.

Rezultati mjerenja, osim što govore o karakteristikama sklopa, ukazuju na mnoge mane i nedostatke pojačala.

Frekvencijski odziv

Frekvencijski odziv pokazuje odziv razina ili razina snaga pojačala koji je pobuđen linearnom pobudom.

Odziv spektra snage

Pokazuje odziv spektra snage pojačala pri konstantnom izobličenju. Pojačalo se pobudi punom snagom na nekoj frekvenciji i mjeri se izlazna snaga na različitim frekvencijama.

-
-
-

Mjerenje 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. Definiran je izrazom:

$$E = (4k TBR)^{1/2}$$

gdje je:

- k** Boltzmanova konstanta koja iznosi 1.38×10^{-23} Ws/K,
- T** temperatura vodiča u Kelvinima (sobna temperatura je 290 K)
- B** je širina frekvencijskog pojasa šuma mjernog sustava u Hz.
- R** u jednadžbi predstavlja impedanciju izvora.

-
-
-

Odnos signal/šum

Mjerenje šuma nekog pojačala definira se odnosom signal/šum ili kao apsolutni šum na izlazu. Iako je odnos signal/šum sličan dinamičkom području to nije isto. Odnos signal šum izražava razliku nazivne preporučljive radne razine i praga šuma

Dinamičko područje

Razlika između maksimalne razine signala i razine šuma naziva se dinamičko područje. Dinamičko područje je razlika razina u dB između maksimalnog izlaznog napona i praga šuma pri kojem je signal neupotrebljiv.

-
-
-

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.

Istosmjerni ofset

Mjeri se ispitivanjem istosmjernog napona na izlazu sklopa pri kratkom spoju na ulazu. Minimalan je s ulazom uređaja u kratkom spoju.

-
-
-

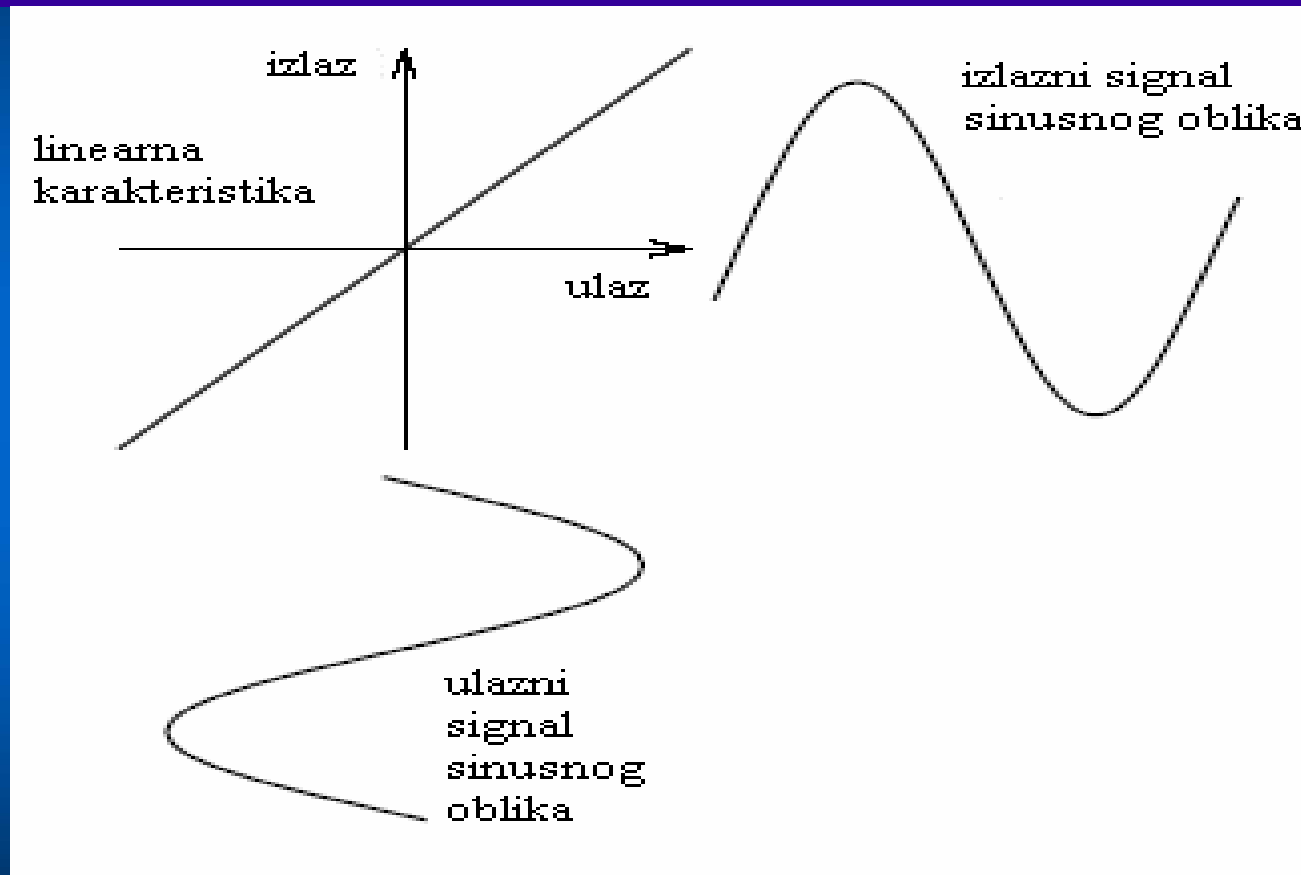
IZOBLIČENJA

Pojam distorzija ili izobličenje u širem smislu se koristi za opisati neželjene razlike između originalnog zvučnog izvora te reproduciranog zvuka tj. između izlaznog i ulaznog signala pojačala. Izobličenje utječe na signal te mu mijenja oblik, obično sa gubitkom kvalitete.

Navesti ćemo samo neka izobličenja:

- Nelinearno izobličenje
- Switching izobličenje
- Crossover izobličenje
- Tranzijentno izobličenje
- Tranzijent intermodulacijsko izobličenje
- Linearno izobličenje

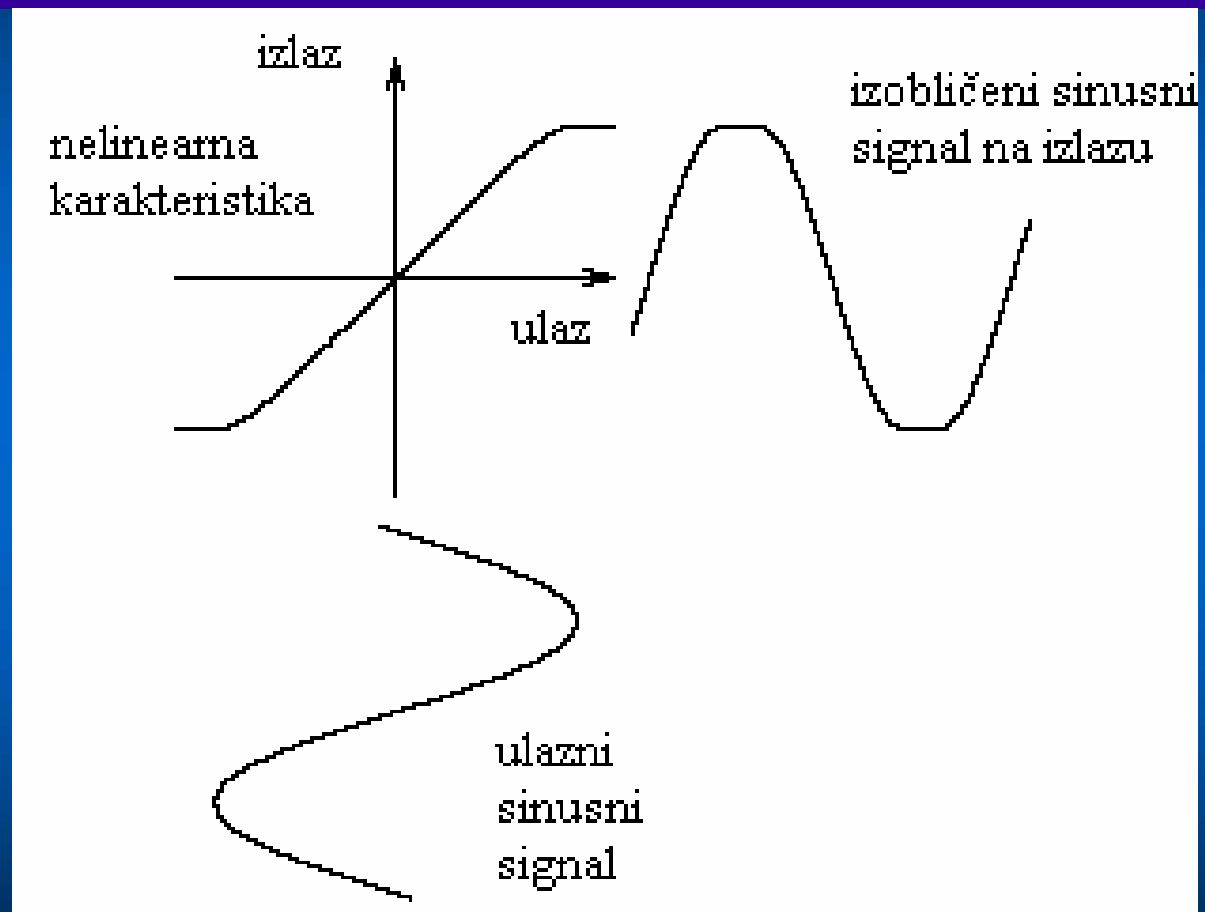
-
-
-



Slika pokazuje ponašanje savršeno linearnog sustava za sinusoidalni ulazni signal.

-
-
-
-
-
-
-
-

Utjecaj nelinearnosti



Slika pokazuje prijenos sinusnog valnog oblika kroz nelinearni sustav

-
-
-

Ukupno harmoničko izobličenje

Da bismo kvantificirali harmonička izobličenja, pojam koji se najviše upotrebljava je **ukupno harmoničko izobličenje**

On je definiran za izlazni signal u uvjetima efektivnih vrijednosti svih neželjenih komponenata izobličenja tj. svi harmonici osim osnovnog, razmjerno sa efektivnim vrijednostima željenog signala tj. osnovnog.

Definicija ukupnog harmoničkog izobličenja je naširoko korištena ali nije zadovoljavajuća metoda budući da različiti tipovi harmonika mogu imati istu THD vrijednost, ali različite stupnjeve smetnji prema slušatelju. Također THD oblik ovisi o amplitudi.

-
-
-

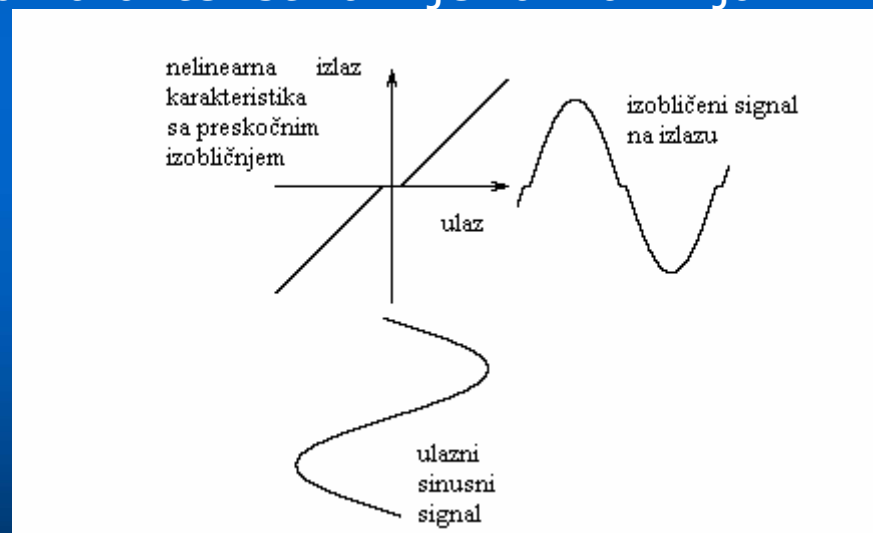
Intermodulacijsko izobličenje

Intermodulacija je nepoželjno generiranje neharmoničkih tonova višetonskom ulaznom signalu. Dakle, ako na ulaz signala dovedemo dvije različite frekvencije istovremeno, a na izlazu se jave uz ove dvije još neke nove frekvencije, kažemo kako su se javila intermodulacijska izobličenja. Ova izobličenja se mjere dvjema metodama.

- **SMPTE**
- **DIM**

Preskočno izobličenje

Ovaj tip izobličenja je prisutan u krugovima koji koriste elemente koji rade u protutaktnom modu tj. jedan element vodi dok je drugi ugašen. Ova izobličenja se pojavljuju ako prijenosna karakteristika nije ravna linija.

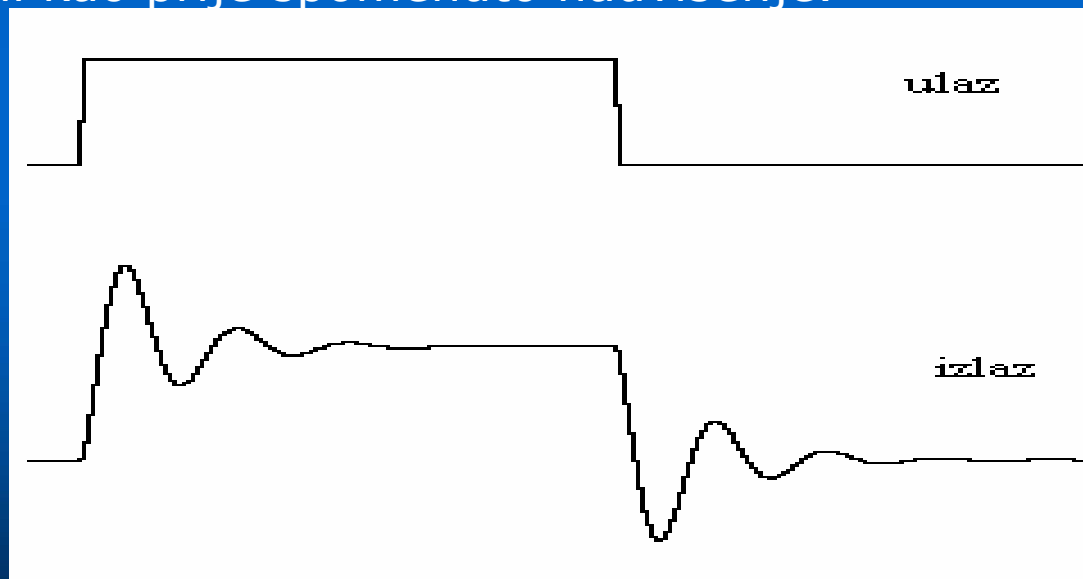


Slika pokazuje prijenos sinusnog signala kroz sustav sa crossover izobličenjem

-
-
-

Tranzijentno izobličenje

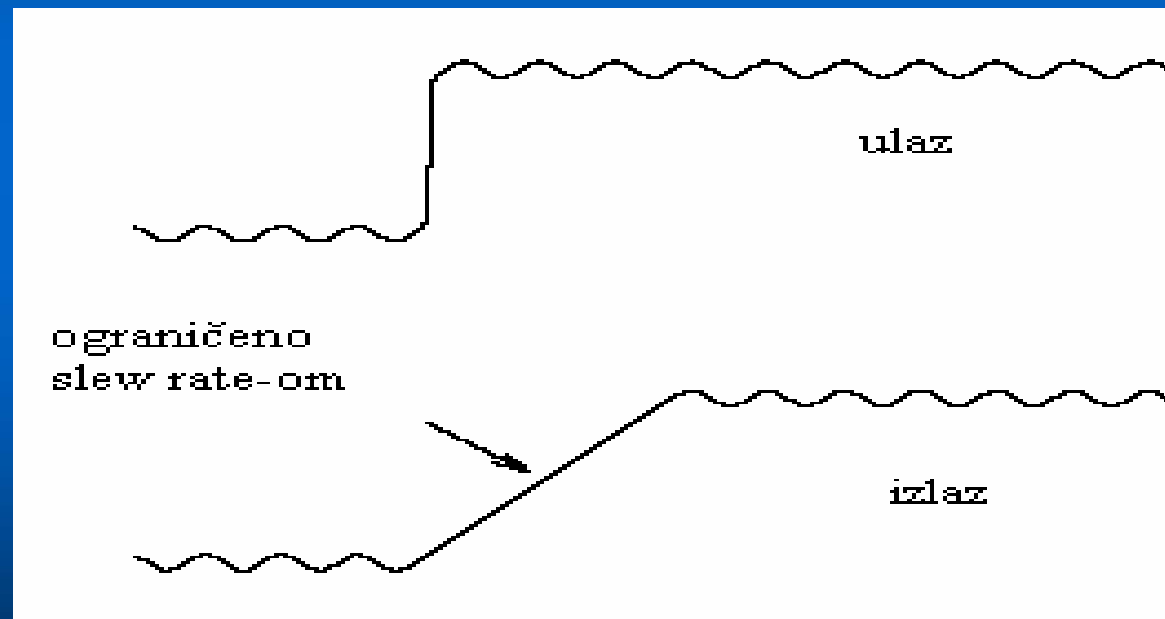
Pojavi se kad je na ulazu step funkcija ili pravokutni val. Svaki sustav koji nema pretjerano širok iznos propusnog pojasa će rezultirati izobličenjem ulaznog valnog oblika, što može biti samo zaokruživanje vodećeg dijela valnog oblika signala ili kao prije spomenuto nadvišenje.



Na ovoj slici vidimo tipični efekt tranzijentnog izobličenja

Tranzijentna intermodulacijsko izobličenje

Kad se pojačalo pobudi velikim impulsnim signalom ili kvadratnim valom sa dovoljno brzim vremenom porast/pad, izlaz nije u mogućnosti slijediti ulaz trenutačno.

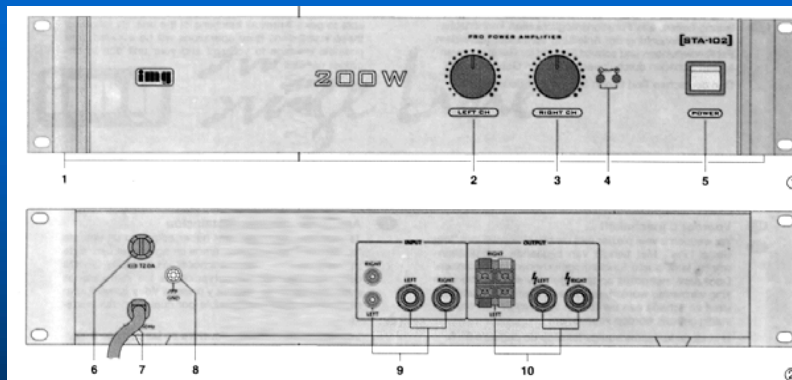


Na ovoj slici vidimo utjecaj tranzijent intermodulacijske distorzije

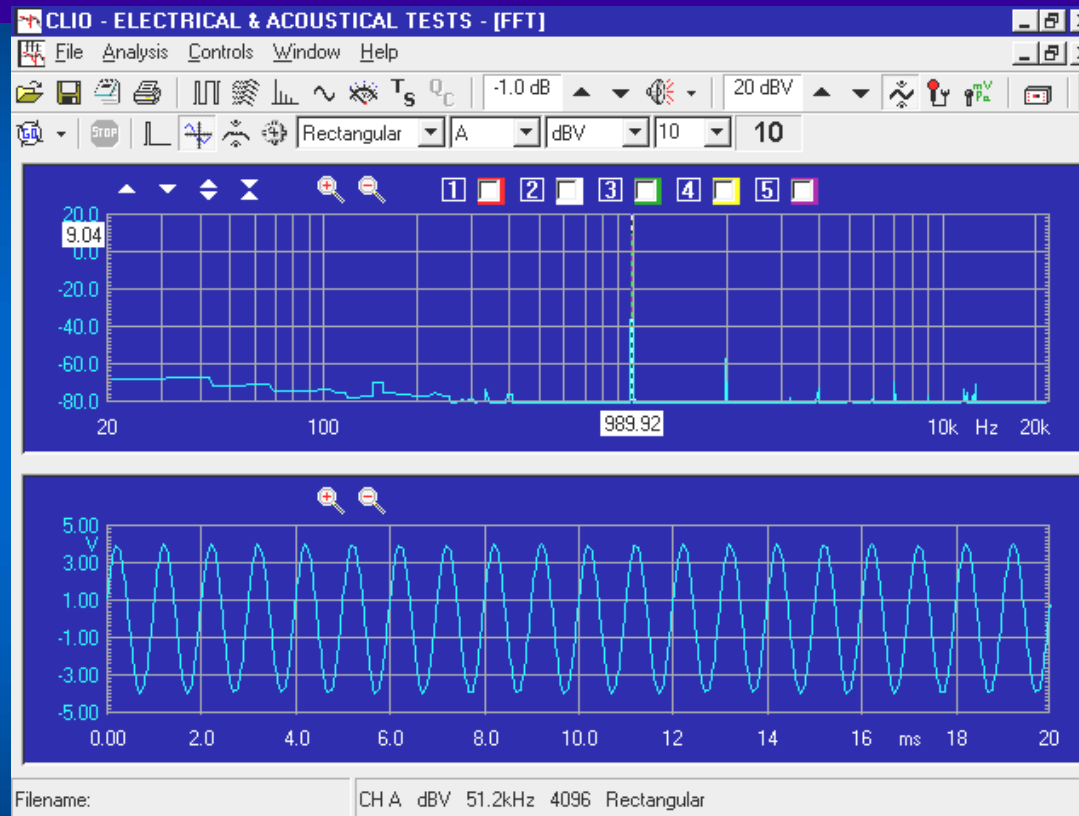
MJERENJE

Mjerit ćemo profesionalno stereo pojačalo, prikazano na slikama.

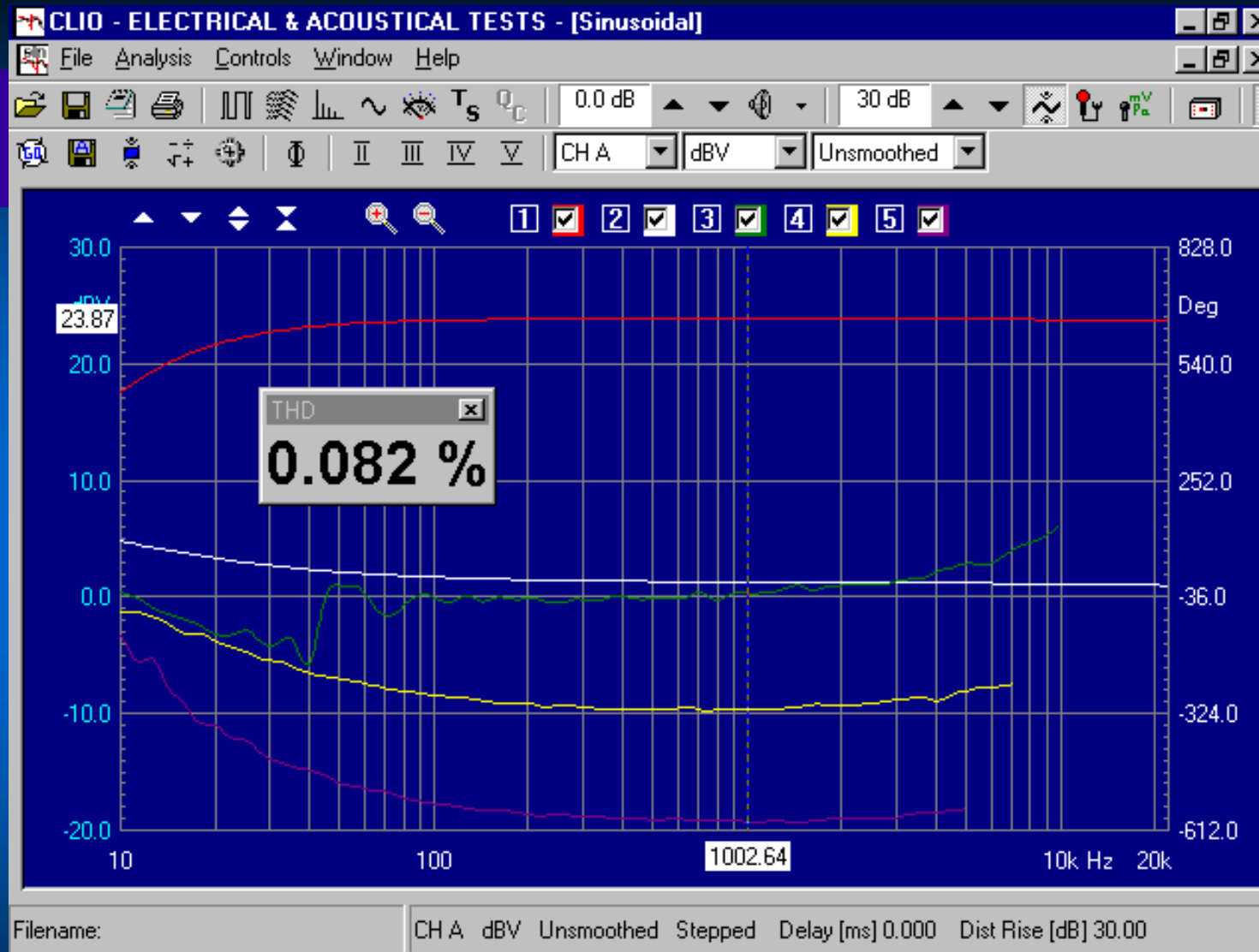
Za potrebe elektroakustičkih mjerenja realizirali smo termički otpornik od 6 komada 20W otpornika vrijednosti 47Ω spojenih u paralelu, tako da njihova ukupna impedancija iznosi oko 8Ω .



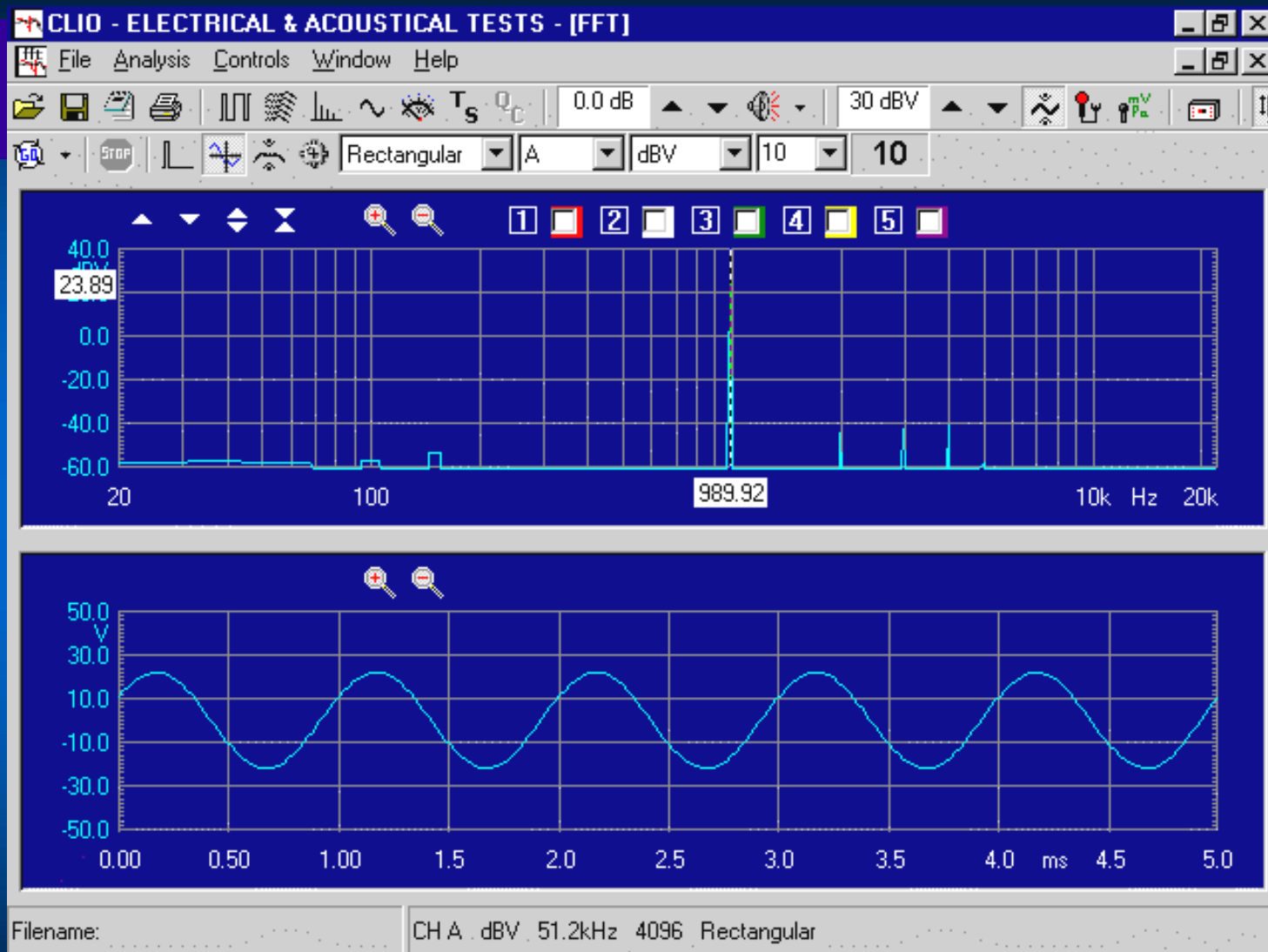
REZULTATI MJERENJA



FFT analiza pojačala pri izlaznoj snazi od 1W, napon na izlazu je 2.8 V tj. $1W/8$ oma. Na slici vidimo osnovni ton frekvencije 1 kHz kojeg je generirao mjerni sustav, te vidimo spektar harmonika 2. 3. 4. 5. itd. koje je generiralo mjereno pojačalo.



Sinusna analiza pojačala pri 23.87 dBV (30W) na izlaznom teretu 8 oma



Prikaz spektralnih komponenti pri izlaznom naponu od 15.5V (30W) na teretu 8 oma

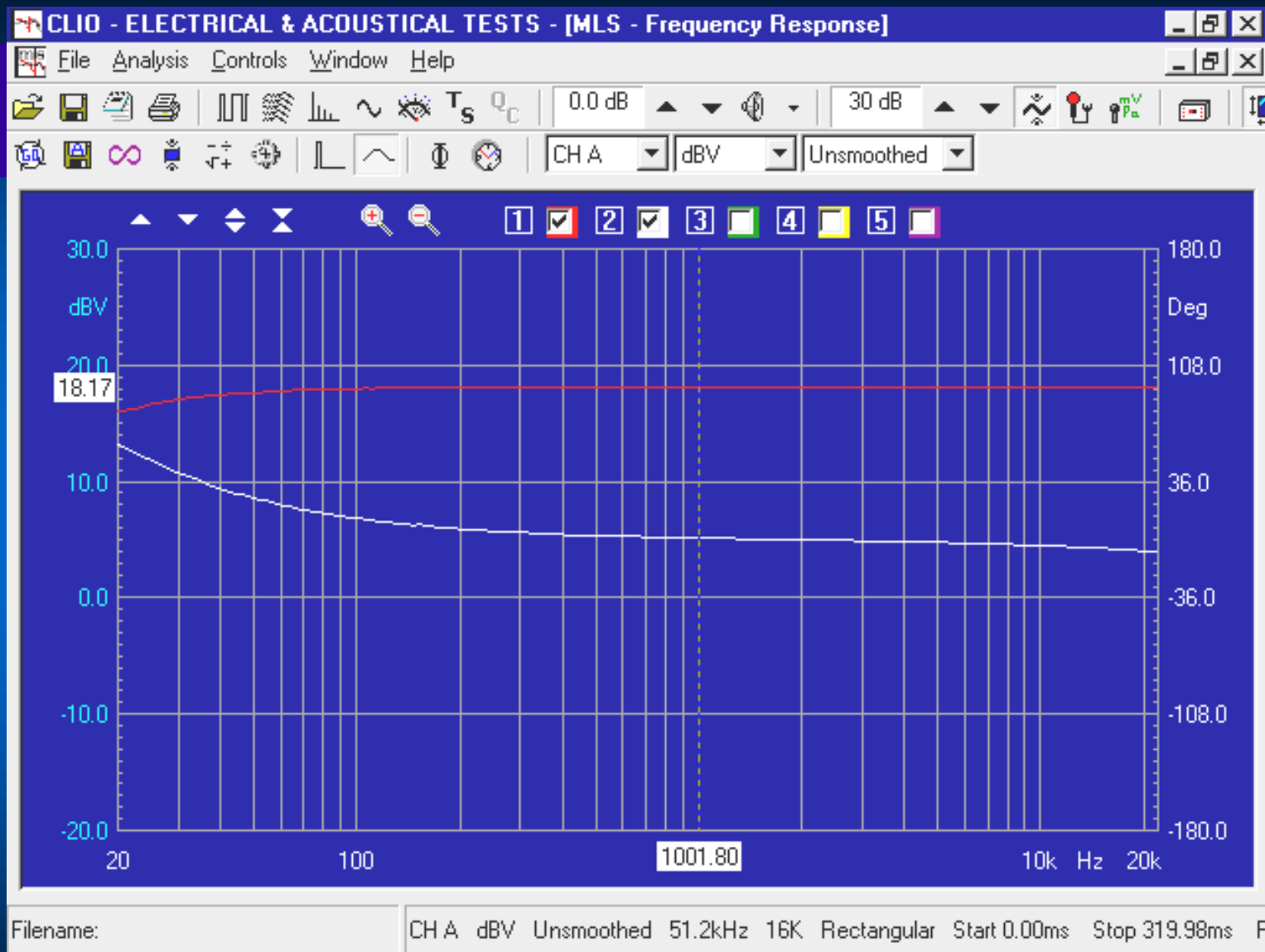
Sinusoidal

15. 01. 04 13.59.00



CH A dBV Unsmoothed Delay [ms] 0.000 Dist Rise [dB] 30.00

Sinusna analiza pojačala sa isključenom funkcijom 'glađenja'



Frekvencijski i fazni odziv pri izlaznoj snazi 10W/8oma

-
-
-

REKAPITULACIJA REZULTATA MJERENJA

Gornju graničnu frekvencija mjerena je osciloskopom i signal generatorom $f_{gg}=210\text{kHz}$
 SIGNAL GENERATOR – POJAČALO SNAGE – OSCILOSKOP I DIGITALNI VOLTMETAR

- Donja granična frekvencija je prikazana na prethodnoj slici te iznosi 18 Hz
- Istosmjerni ofset mjereno je digitalnim voltmetrom uz kratko spojeni ulaz pojačala, a iznosi 0.049V.

- Ulazna impedancija pojačala ispituje se usporedbom signala sa i bez tereta. Ovo mjerenje se također radi pomoću osciloskopa. Pri tome smo dobili sljedeće vrijednosti;

$$U_{1pp} = 2.8 \text{ V}$$

$$U_{2pp} = 2.4 \text{ V}$$

Koristili smo otpornik od 4.7 k Ω

$$Z_{out} = R_s = 16.8 \text{ k}\Omega$$

- Efektivna izlazna snaga:
 - Stereo 4 oma 2*60W
 - Stereo 8 oma 2*50W
 - Maksimalna izlazna snaga 2*100W
 - Frekvencijski opseg 18Hz - 210 kHz
 - THD pri punoj snazi 0.08%
 - Potrošnja snage 310 VA



-
-
-

ZAKLJUČAK

Suvremeno audio pojačalo za vrhunsku reprodukciju zvuka s bilo kojim zvučnikom treba imati modernu koncepciju rješenja elektroničkih sklopova, koja uz to treba biti bezuvjetno stabilna. Pojačalo treba imati više stupnjeva pojačanja s lokalnim povratnim vezama za smanjenje izobličenja. Treba biti primjenjena vrlo mala negativna povratna veza u cilju stabiliziranja pojačanja i definiranja radne točke pojačala. Topologija pojačala treba biti simetrična od ulaza do izlaza.

Na osnovi rezultata mjerenja koje smo proveli nad ovim pojačalom možemo zaključiti, kako specifikacije pojačala odgovaraju onima koje deklarira proizvođač i izuzetno su zadovoljavajuće za klasu pojačala u kojoj se mjereno pojačalo nalazi.