

ŠOLSKI CENTER VELENJE
ELEKTRO IN RAČUNALNIŠKA ŠOLA
Trg mladosti 3, 3320 Velenje

MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA
IZDELAVA HIFI SETA ZVOČNIKOV

Tematsko področje: Tehniške vede

Avtor:

Luka Slapnik, 4. letnik

Mentor:

Franc Štravs, univ. dipl. inž.

Somentor:

Karel Planko, inž.

Velenje, 2017

L. Slapnik, Izdelava HiFi seta zvočnikov
Raziskovalna naloga, ŠC Velenje, Elektro in računalniška šola, 2017

II

Raziskovalna naloga je bila opravljena na ŠC Velenje, Elektro in računalniška šola, 2017.

Mentor: Franc Štravs, univ. dipl. inž.

Somentor: Karel Planko, inž.

Datum predstavitve:

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD ŠC Velenje, šolsko leto 2016/17
KG Akustika/Meritve
AV SLAPNIK, Luka
SA ŠTRAVS, Franc/PLANKO, Karel
LE VRBNJAK, Bojana/ MELANŠEK, Jolanda
KZ 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3
ZA ŠC Velenje, Elektro in računalniška šola
LI 2017
IN IZDELAVA HIFI SETA ZVOČNIKOV
TD RAZISKOVALNA NALOGA
OP IX, 75 str., 5 pregl. 62 sl., 17 pril., 22 vir.
IJ SL
JI sl
AI

Namen raziskovalne naloge je bilo zasnovati ter izdelati kvaliteten 5-sistemski set HiFi zvočnikov za poslušanje glasbe ter uporabo v hišnem kinu. Pri tem je bilo treba določiti ustrezno topologijo zvočnikov, pregledati specifikacije zvočniških enot in z njihovo pomočjo zasnovati ustrezna zvočniška ohišja s pomočjo računalniške programske opreme. Z uporabo programske opreme sem na podlagi zasnove zvočniških omaric simuliral ter zasnoval zvočniške kretnice. Na koncu sem izdelal načrt in zvočnike izdelal. Da bi preveril točnost računalniških simulacij, sem izmeril impedančne karakteristike s pomočjo merilne priprave, ki sem jo izdelal sam, frekvenčne karakteristike pa sem izmeril s pomočjo kalibriranega omnidirekionalnega merilnega mikrofona. Pridobljene podatke sem nato primerjal s simulacijami, prav tako pa sem jih primerjal z dvema komercialno dostopnima zvočnikoma proizvajalcev Elac ter SVSound. Kljub temu da je bilo moje znanje na začetku precej šibko, sem se skozi potek izdelave veliko naučil, končni izdelek pa je po specifikacijah, meritvah ter zvoku primerljiv zvočnikom višjega cenovnega razreda.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND ŠC Velenje, 2016/17
CX Acoustics/Measurements
AU SLAPNIK, Luka
AA ŠTRAVS, Franc/PLANKO, Karel
PR VRBNJAK, Bojana/ MELANŠEK, Jolanda
PP 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3
PB ŠC Velenje, Elektro in računalniška šola
PY 2017
TI CONSTRUCTION OF A HIFI SPEAKER SET
DT RESEARCH WORK
NO IX, 75 p., 5 tab. 62 fig., 17 ann., 22 ref.
LA SL
AL sl/en
AB

The purpose of this research work was to design and make a high quality set of HiFi speakers, for listening to music and the home cinema usage. Firstly, the proper speaker topology had to be selected. The speaker driver specifications had to be checked and with their help, the speaker enclosures were designed by using computer software. With the help of the computer software, I also simulated and designed speaker crossovers. In the end, I created the plans and made the speakers. To check the accuracy of computer simulations, impedance characteristics were measured, using a tool I made myself and frequency response data was acquired, using an omnidirectional measurement microphone. The data was then compared to simulations and two commercially available speakers from producers ELAC and SVSound. Despite the low amount of knowledge at the beginning, I have learnt a lot through the design and creation of the speakers. According to the specifications, measurements and sound, the end product can be classified under speakers of higher price class.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
1.1 HIPOTEZE.....	1
2 ZVOK	2
2.1 ZVOČNI TLAK	3
3 O ZVOČNIKIH.....	4
3.1 KAJ JE ZVOČNIK.....	4
3.2 DINAMIČNI ZVOČNIK	4
3.2.1 Delovanje dinamičnega zvočnika.....	5
3.2.2 Elektromehanične karakteristike dinamičnega zvočnika (Thiele/Small parametri)	6
3.2.3 Tipi dinamičnih zvočniških enot	7
2.3 OHIŠJA ZA ZVOČNIŠKE ENOTE	10
2.3.1 Izvedba zaprte škatle oziroma kompresija	11
2.3.2 Bass-reflex škatle	13
2.3.4 Ostali tipi škatel (bandpass, prenosna linija, rog)	15
2.4 FREKVENČNI FILTRI ZA ZVOČNIŠKE ENOTE	16
3 KONSTRUKCIJA, SIMULACIJA IN IZDELAVA ZVOČNIKOV	20
3.1 Idejna zasnova zvočnikov	21
3.2 Izbira zvočniških enot ter vrste kretnic	22
3.3 Izbira materialov za izgradnjo škatel.....	24
3.4 Zasnova, simulacija ter konstruiranje zvočniških škatel	25
3.5 Zasnova in simulacija pasivnih kretnic	28
3.6 Izbira pasivnih komponent kretnice	32
3.7 Izdelava zvočniških škatel, kretnic ter končna montaža	33
3.9 Kosovnica ter stroški.....	36
4 TESTIRANJE TER MERITVE ZVOČNIKOV	38
4.1 Gluha komora (2π oz. 360°).....	39
4.2 Polprostor (Half-space oz. π oz. 180°)	40
4.3 Meritev v prostoru	41
4.4 Meritev zvočnikov od blizu (ang. nearfield).....	42
4.5 Programska oprema REW (roomeqwizard)	43
4.6 Oprema ter postopek meritve impedančnih karakteristik	44
4.7 Oprema za opravljanje akustičnih meritev	46
4.7 Postopek akustične meritve zvočnikov	47

4.8 Pregled in analiza meritev	49
4.8 Primerjava mojih zvočnikov z zvočnikoma ELAC Debut B6 ter SVS Prime Bookshelf	55
6 ZAKLJUČEK IN RAZPRAVA	60
7 POVZETEK	62
8 ZAHVALA.....	63
9 LITERATURA TER VIRI	64
10 PRILOGE.....	65

KAZALO SLIK

Slika 1: Potovanje zvoka skozi medij (Vir: http://www.mediacollege.com).....	2
Slika 2: Tipične glasnosti vsakdanjih dejavnosti (Vir: http://eucbeniki.sio.si).....	3
Slika 3: Sestavni deli dinamičnega zvočnika (Vir: https://en.wikipedia.org).....	
Slika 4: Shematski prikaz delovanja elektrodinamičnega zvočnika (Vir: https://en.wikipedia.org).....	5
Slika 5: Izrezek tabele T/S parametrov v specifikacijah zvočniške enote (Vir: www.sbacoustics.com).....	7
Slika 6: Širokopasovni zvočnik TB W6-2144 ter njegova frekvenčna ter impedančna karakteristika (Vir: http://www.tb-speaker.com/products/w6-2144).....	
Slika 7: Nizkotonski zvočnik SVS PB-13 Ultra (Vir: www.svsound.com).....	8
Slika 8: Srednjetonski zvočnik Visaton TI 100 ter njegova karakteristika (Vir: www.visaton.de).....	
Slika 9: Visokotonska enota Seas 27TDFC ter njena karakteristika (Vir: www.madisound.com).....	
Slika 10: Primer notranjosti nedokončane zvočniške škatle z vgrajeno kretnico ter akustičnim polnilom (Vir: www.google.si).....	10
Slika 11: Poenostavljen prikaz zaprte škatle (Vir: http://audiojudgement.com/types-of-enclosures-which-is-the-best/).....	11
Slika 12: Poenostavljen prikaz bass-reflex škatle (Vir: http://audiojudgement.com/types-of-enclosures-which-is-the-best/).....	13
Slika 13: Poenostavljen prikaz bandpass ohišja (Vir: http://audiojudgement.com).....	
Slika 14: Poenostavljen prikaz prenosne linije (Vir: http://audiojudgement.com).....	
Slika 15: Poenostavljen prikaz zloženega roga (Vir: http://audiojudgement.com).....	
Slika 16: Shematski prikaz delovanja pasivne kretnice (Vir: www.wikipedia.org).....	16
Slika 17: Primer dejanske pasivne kretnice, z pasivnimi komponentami (Vir: www.troelsgravesen.dk).....	17
Slika 18: Shema 2-sistemske pasivne kretnice 1. reda (Vir: Lasten).....	
Slika 19: Shema 3-sistemske pasivne kretnice 3. reda (Vir: Lasten).....	
Slika 20: Prikaz filtrov ter njihovih seštevkov (Vir: www.wikipedia.org).....	18
Slika 21: Shematski prikaz delovanja aktivne kretnice (Vir: www.wikipedia.org).....	19
Slika 22: Primer dejanske elektronske aktivne kretnice, model 2x4 proizvajalca MiniDSP (Vir: www.minidsp.com).....	19
Slika 23: Prva idejna skica (Vir: Lasten).....	21
Slika 24: Nizkosrednjetonec SB13PFC25-4, uporabljen v centru ter zadnjem paru zvočnikov (Vir: www.sbacoustics.com).....	22
Slika 25: Osnovna shema pasivne kretnice center zvočnika (Vir: Lasten).....	23
Slika 26: Primerjava strukture mediapana (zgoraj) in iverne plošče (spodaj) (Vir: www.google.com).....	24
Slika 27: Struktura vezane plošče (Vir: www.google.com).....	24
Slika 28: Izrezek osnovnega okna programa WinISD (Vir: Lasten).....	25
Slika 29: Zavihek v programu WinISD za spreminjanje dimenzij bass-reflex cevi (Vir: Lasten).....	26
Slika 30: Tehniška risba zvočniške omarice prednjega zvočnika, narejena po simulaciji. (Vir: Lasten).....	27

Slika 31: Pomoč pri procesu zasnove zvočnika v programu Boxsim (Vir: Lasten).....	28
Slika 32: Boxim - Zavihek za urejanje parametrov zvočniške enote (Vir: Lasten)	29
Slika 33: Okno za urejanje dimenzij zvočniške omarice ter pozicije zvočniških enot (Vir: Lasten).....	30
Slika 34: Okno za avtomatsko optimizacijo pasivne kretnice v programu Boxsim (Vir: Lasten)	31
Slika 35: Primer simulacije frekvenčne (črna) ter impedančne (rdeča) karakteristike zvočnika (Vir: Lasten)	31
Slika 36: Primer tuljave z zračnim jedrom (Vir: www.jantzen-audio.com)	32
Slika 37: Bipolarni kondenzatorji serije CrossCap (Vir: www.jantzen-audio.com).....	32
Slika 38: Slika izdelanih pasivnih kretnic (Vir: Lasten)	33
Slika 39: Slika končanih škatel za zvočnike (Vir: Lasten).....	34
Slika 40: Slika končanega prednjega para zvočnikov (Vir: Lasten)	35
Slika 41: Izgled gluhe komore znotraj (Vir: www.google.com)	39
Slika 42: Poenostavljena shema meritve na oddaljenosti 1m v polprostoru (Vir: http://audiojudgement.com/measure-speaker-frequency-response/).....	40
Slika 43: Primer meritve zvočnika v samem prostoru (Vir: www.troelsgravesen.dk)	41
Slika 44: Poenostavljen prikaz bližinske meritve zvočnika (Vir: http://audiojudgement.com/measure-speaker-frequency-response/).....	42
Slika 45: Shema vezave pri merjenju impedance, generator signala je v tem primeru desni kanal stereo izhoda, na upor R_{sense} pa merimo padec napetosti (Vir: https://www.roomeqwizard.com/).....	44
Slika 46: Pripomoček, ki sem ga naredil po zgornji shemi. Stikalo je vezano vzporedno z merilnim uporom in služi kalibraciji (Vir: Lasten)	44
Slika 47: Priklop pripomočka na zvočnik med meritvijo (Vir: Lasten).....	45
Slika 48: Merilni mikrofonski UMIK-1 (Vir: Lasten)	46
Slika 49: Čarovnik za opravljanje nove meritve (Vir: Lasten)	47
Slika 50: Postavitev zvočnika ter mikrofona med meritvijo. (Vir: Lasten)	48
Slika 51: Graf impedančne karakteristike ter faznega kota impedance center zvočnika v odvisnosti od frekvence (Vir: Lasten)	49
Slika 52: Preprost prikaz faznega zamika (Vir: www.google.com).....	50
Slika 53: Primerjava simulirane ter izmerjene impedančne karakteristike center zvočnika (Vir: Lasten).....	50
Slika 54: Primerjava grafa pred in po glajenju (Vir: Lasten).....	51
Slika 55: Primerjava med simulirano ter izmerjeno frekvenčno karakteristiko (Vir: Lasten) ..	52
Slika 56: Primer popačenja signala (Vir: www.google.com).....	53
Slika 57: Graf izmerjenega popačenja zvočnika (Vir: Lasten)	54
Slika 58: Graf izmerjenega frekvenčnega odziva ter akustičnega faznega kota (Vir: Lasten) ..	56
Slika 59: Graf frekvenčnega odziva zvočnika Elac Debut B6 (Vir: www.stereophile.com)... ..	56
Slika 60: Frekvenčna karakteristika zvočnika SVS Prime Bookshelf (Vir: www.noaudiophile.com)	57
Slika 61: Graf faznega kota ter velikosti impedance prednjega zvočnika (Vir: Lasten).....	58
Slika 62: Graf velikosti in faznega kota impedance zvočnika Elac Debut B6 (Vir: www.stereophile.com)	59

KAZALO TABEL

Tabela 1: Delitev frekvenčnih področij.....	7
Tabela 2: F3 faktor za izračun -3 dB točke.	12
Tabela 3: Kosovnica uporabljenih izdelkov/materialov ter stroški. (Vir: Lasten).....	36
Tabela 4: Primerjava med simulirano ter izmerjeno vrednostjo faznega kota, ter odstopanje. (Vir: Lasten)	53
Tabela 5: Nazivni podatki mojih zvočnikov, ter zvočnikov s katerimi sem jih primerjal. (Vir: Lasten).....	55

KAZALO PRILOG

Priloga 1: Slika končanega center zvočnika (Vir: Lasten).....	65
Priloga 2: Izmerjena frekvenčna karakteristika center zvočnika (Vir: Lasten).....	65
Priloga 3: Izmerjena impedančna karakteristika center zvočnika (Vir: Lasten)	66
Priloga 4: Izmerjena karakteristika distorzije center zvočnika (Vir: Lasten).....	66
Priloga 5: Slika končanega prednjega para zvočnikov (Vir: Lasten).....	67
Priloga 6: Izmerjena frekvenčna karakteristika prednjega para zvočnikov (Vir: Lasten).....	67
Priloga 7: Izmerjena impedančna karakteristika prednjega para zvočnikov (Vir: Lasten)	68
Priloga 8: Izmerjena karakteristika distorzije prednjega para zvočnikov (Vir: Lasten)	68
Priloga 9: Slika končanega zadnjega para zvočnikov (Vir: Lasten)	69
Priloga 10: Izmerjena frekvenčna karakteristika zadnjega para zvočnikov (Vir: Lasten)	69
Priloga 11: Izmerjena impedančna karakteristika zadnjega para zvočnikov (Vir: Lasten).....	70
Priloga 12: Izmerjena karakteristika distorzije zadnjega para zvočnikov (Vir: Lasten)	70
Priloga 13: Tehnična dokumentacija visokotonca SB19ST-C000-4 (Vir: www.sbacoustics.com).....	71
Priloga 14: Tehnična dokumentacija visokotonca SB26STC-C000-4 (Vir: www.sbacoustics.com).....	72
Priloga 15: Tehnična dokumentacija visokotonca SB26STCN-C000-4 (Vir: www.sbacoustics.com).....	73
Priloga 16: Tehnična dokumentacija nizkosrednjetonca SB13PFC25-4 (Vir: www.sbacoustics.com).....	74
Priloga 17: Tehnična dokumentacija nizkosrednjetonca SB16PFC25-4 (Vir: www.sbacoustics.com).....	75

1 UVOD

Ideja za raziskovalno nalogo je nastala že pred več kot letom dni. Takrat sem kot začetnik v samogradnji zvočnikov tako kot vsi ostali, ki se ukvarjajo s tem hobijem, želel izdelati svoj set zvočnikov. Nekaj izkušenj o izdelavi zvočnikov sem imel že od prej, ko sem po načrtih izdelal svoj prvi par stereo HiFi zvočnikov, kljub temu pa se je sprva zdela zasnova in izdelava zvočnikov težek podvig. Set zvočnikov, ki sem ga izdelal, je vseboval 5 posameznih zvočnikov in sicer prednja levi ter desni zvočnik, zadnji levi ter desni zvočnik in center. V tej nalogi je podrobno opisana zasnova, konstruiranje, izdelava in testiranje vsakega od zvočnikov, hkrati pa so opisani tudi problemi, s katerimi sem se med izdelavo zvočnikov soočil.

1.1 HIPOTEZE

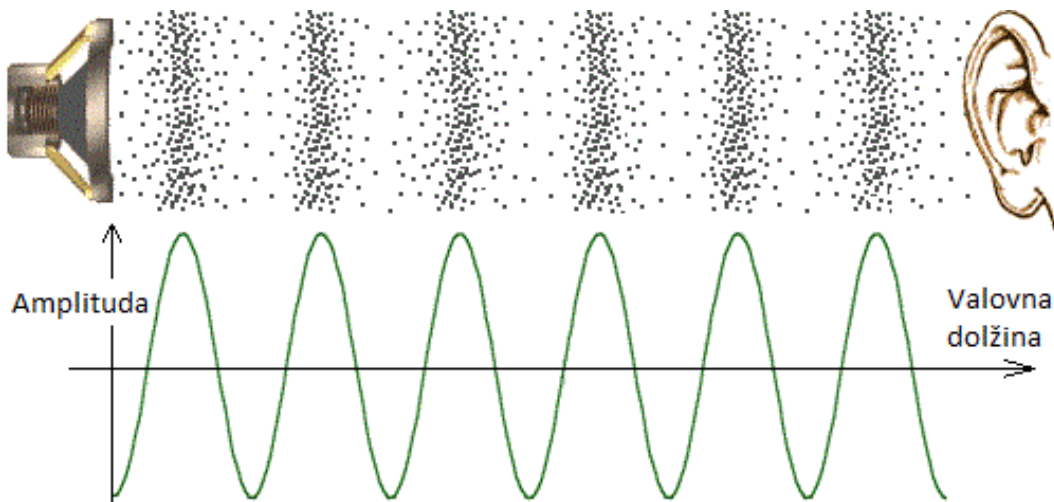
- Set kvalitetnih HiFi zvočnikov je mogoče narediti za ceno manjšo od 600 eur.
- Zvočnike je mogoče narediti z uporabo dostopnih ročnih orodij za obdelavo lesa.
- Zasnova in izdelava zvočnikov je mogoča z osnovnim znanjem elektrotehnike ter spretnostjo obdelave lesa.
- Zvočnike je mogoče zasnovati, konstruirati in simulirati z uporabo brezplačne programske opreme.
- Meritve karakteristik zvočnikov ne bodo odstopale od simuliranih vrednosti za več kot +/-3 dBA akustične jakosti, +/-10° faznega zamika ter 1 Ω impedance.
- Sistem zvočnikov bo zmožen reprodukcije zvoka v območju od 80 Hz do 20 kHz (-3 dB točke)
- Sistem zvočnikov bo po karakteristikah primerljiv s komercialnimi sistemi zvočnikov v podobnem cenovnem razredu.

2 ZVOK

Zvok je longitudinalno mehansko valovanje (zgoščine in razredčine), ki se širi skozi snov. Zvok lahko opredelimo s frekvenco in amplitudo delovanja. Prva je povezana s tonom delovanja, druga pa z jakostjo. V ožjem pomenu je zvok definiran le kot zvočno valovanje s frekvenco od 20 Hz do 20 kHz oziroma valovne dolžine od 17 mm do 17 m, kolikor zaznava povprečno človeško uho. Zvok frekvence manj od 20 Hz je infrazvok, frekvence več kot 20 kHz pa imenujemo ultrazvok. Zvok skozi zrak potuje z hitrostjo približno 340 m/s.

Potovanje zvoka si težko predstavljamo saj je neviden. Širi se s pomočjo zgoščevanja in redčenja snovi. To si lahko zamislimo kot dolgo vzmet na tleh. Če vzmet z začetka stisnemo ter raztegnemo, se val širi naprej po vzmeti.

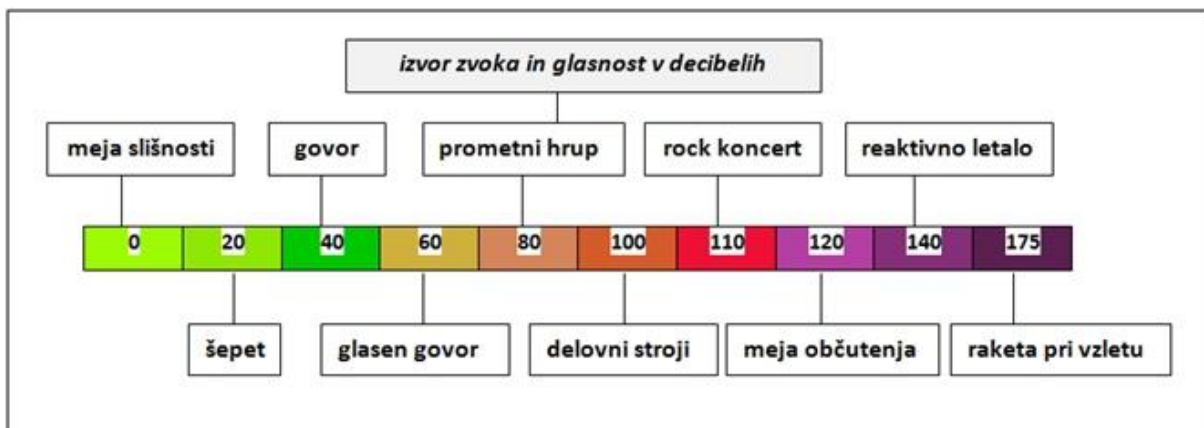
(Povzeto po članku na spletni strani <http://www.mediacollege.com/audio/01/sound-waves.html>)



Slika 1: Potovanje zvoka skozi medij (Vir: <http://www.mediacollege.com>)

2.1 ZVOČNI TLAK

Zvočni tlak je razlika med povprečnim tlakom okolice ter tlakom v zvočnem valu. Ta tlak je merjen in ga podajajo z efektivno - RMS (root mean square) vrednostjo. Tako nam da 1 Pa (paskal) efektivne vrednosti zvočnega tlaka oziroma 94 dBA oscilacijo med $\sqrt{2}$ Pa in $-\sqrt{2}$ Pa tlaka. Akustični zvočni tlak se podaja na logaritmični decibelski skali. Decibel je logaritmična enota, ki podaja razmerje med dvema enotama fizične količine, v tem primeru glasnost. Vrednost 0 dBA predstavlja referenco, in je najtišji zvok, ki ga zazna človeško uho. Podvojitvev amplitude pomeni narastek za 3 dB. (Povzeto po https://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure)



Slika 2: Tipične glasnosti vsakdanjih dejavnosti (Vir: <http://eucbeniki.sio.si>)

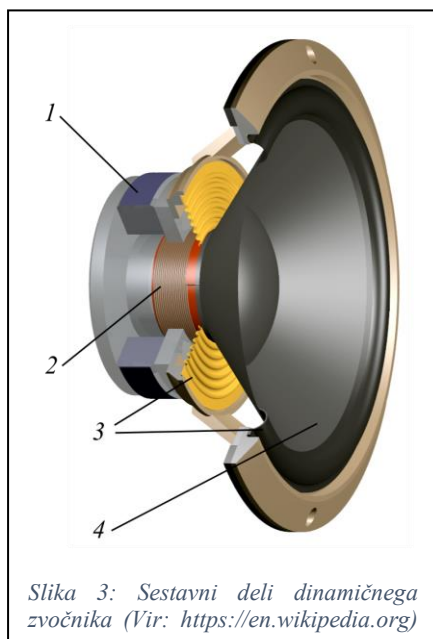
3 O ZVOČNIKIH

3.1 KAJ JE ZVOČNIK

Zvočnik je pretvornik oziroma naprava, ki z električnega avdio signala ustvari ustrezen pripadajoči zvok. Ko v današnjem času govorimo o zvočnikih, pogosto pomislimo na škatlo v kateri je ena ali več zvočniških enot, ki izvajajo pretvorbo električne v zvočno energijo. Danes najbolj razširjen je dinamični zvočnik, ki sta ga leta 1925 iznašla Edward W. Kellog in Chester W. Rice. Dinamični zvočnik deluje po enakem principu kot dinamični mikrofonski, le v obratni smeri, zvok tako ustvari iz ojačanega električnega signala. Da bi natančno reproducirali čim večji del slišnega spektra, pogosto uporabimo več zvočniških enot, vsaka od njih pa prevzame del slišnega spektra. Poleg dinamičnega zvočnika poznamo tudi druge vrste zvočnikov, kot so na primer piezoelektrični zvočniki, magnetostatični zvočniki, elektrostatični zvočniki itd.

3.2 DINAMIČNI ZVOČNIK

Kot že prej rečeno, je danes najbolj popularna izbira dinamični zvočnik. Sestavljen je iz lahke membrane (ang. diaphragm), ki je pritrjena na navitje oziroma tuljavo (ang. voicecoil), ta pa se nahaja v magnetni reži. Vse skupaj na mestu drži fleksibilno vzmetenje (ang. spider, surround), ki membrani in tuljavi omogoča aksialno gibanje ter hkrati preprečuje premike izven magnetne reže in posledično samouničenje zvočnika.



1. Magnet
2. Navitje oziroma tuljava
3. Vzmetenje (ang. spider, surround)
4. Membrana

Membrana dinamičnega zvočnika je pogosto narejena v obliki stožca ali kalota, predvsem zaradi dobrih mehanskih in akustičnih lastnosti teh dveh oblik. Material, ki je za membrano uporabljen, je največkrat papir, plastika ali kovina. Idealni material za membrano bi moral imeti v praksi nedosegljive lastnosti, kot je na primer izredna trdnost, izredno majhna masa in zelo veliko dušenje. Tako v praksi konstrukterji in izdelovalci sprejemajo kompromise ter uporabijo razne kompozitne materiale, ki pogosto vključujejo tudi karbonska, kevlar, steklena ter celo bambusova vlakna, ta pa dodajo trdnost in dušenje.

Žica iz katere je sestavljeno navitje zvočnika, je največkrat bakrena, včasih pa se zaradi teže in ostalih prednosti uporabi tudi aluminij. Zelo redko je žica lahko tudi iz srebra. Ena od slabosti aluminija je nezmožnost spajanja s pomočjo spajkanja. Povezave morajo biti zelo kvalitetne, da zaradi vibracij ne popustijo. Tuljave se nahajajo v zračnih režah magneta, in se premika v aksialni smeri naprej in nazaj.

Okvir oziroma košara dinamičnega zvočnika mora biti narejena čim bolj trdno, da prepreči deformacije, ki bi onemogočile normalno premikanje membrane. Ena od pogostih deformacij je drgnjenje tuljave ob steno utora v magnetu. Košare so tako največkrat iz litega aluminija ali tanke jeklene pločevine. V cenejših dinamičnih zvočniških enotah vse pogosteje vidimo tudi plastične košare, predvsem zaradi poceni izdelave.

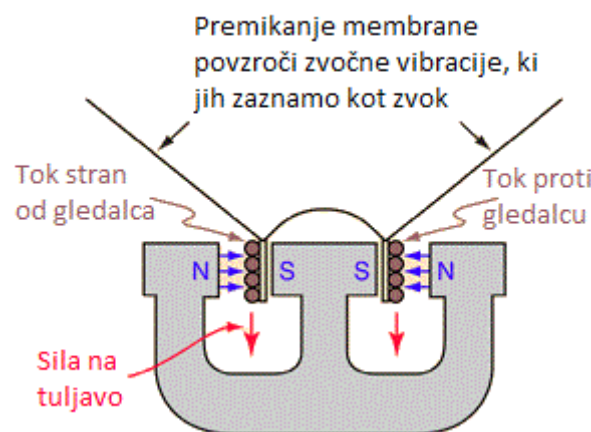
Tipično vzmetenje zvočniške enote je sestavljeno iz dveh delov. Prvi del se nahaja ob stičišču membrane in tuljave in ju poveže s košaro zvočnika, drugi del pa se nahaja na robu membrane in jo povezuje z zunanjim robom košare, oba dela skupaj pa omogočata linearno premikanje tuljave in membrane.

Magneti modernih zvočnikov so skoraj vedno permanentni, narejeni so iz feritnih materialov v zadnjem času pa tudi iz neodimija. Pola zvočniškega magneta se nahajata na prednji in zadnji strani.

(Povzeto po https://en.wikipedia.org/wiki/Loudspeaker#Other_speaker_designs)

3.2.1 Delovanje dinamičnega zvočnika

Ko dinamični zvočnik oziroma njegovo tuljavo priključimo na električni signal, tok v navitju ustvari magnetno polje, ki ga lahko spreminjamo. Ustvarjeno magnetno polje in magnetno polje zvočniškega magneta medsebojno vplivata drug na drugega in ustvarita mehansko silo. Ta sila povzroči premik tuljave stran ali proti magnetu, enako pa se zgodi z membrano, ki je nanjo pritrjena. Tako lahko z vhodnim električnim signalom nadzorujemo premik membrane in ustvarimo zvok.



Slika 4: Shematski prikaz delovanja elektrodinamičnega zvočnika (Vir: <https://en.wikipedia.org>)

3.2.2 Elektromehanične karakteristike dinamičnega zvočnika (Thiele/Small parametri)

To so podatki, ki v grobem opisujejo obnašanje zvočniške enote v področju nižjih frekvenc, dobimo jih od proizvajalcev, ali pa jih izmerimo sami. S temi podatki je mogoče simulirati pozicijo, hitrost in pospešek membrane, impedanco enote ter glasnost enote v škatli. Mnogi od teh parametrov so izmerjeni le pri resonančni frekvenci, vendar se uveljavljajo za celotno območje zvočnega spektra enote.

Parametri, ki elektromehansko definirajo zvočnik, so:

- Re - DC upornost zvočniške enote (impedanca pri 0 Hz) (Ω)
- Fs - resonančna frekvenca enote (Hz)
- Le - Induktivnost navitja/tuljave (mH)
- Q parametri (Qms, Qes in Qts) - Mehanska, električna in skupna učinkovitost dušenja (brez enote)
- Vas/Cms - volumen zraka z enako stisljivostjo kot enota (L)/Efektivnost vzmetenja enote (m/N)
- Vd - največja količina zraka, ki ga je enota zmožna premakniti v 1 nihaju (L)
- Bl - moč magneta zvočne enote (T)
- Mms - masa membrane, tuljave ter zraka, ki ga enota premakne (g)
- Xmax/Xlim - maksimalen linearni premik membrane (mm)
- Sd - površina zvočniške membrane (cm^2)
- uporabno frekvenčno področje, včasih tudi graf (Hz)
- električna moč, RMS povprečna moč (W)
- občutljivost, običajno podana kot glasnost pri moči 1W (dB/W)

Pogosto poleg T/S parametrov proizvajalci navedejo tudi podatke kot so dimenzije zvočnikov, velikosti tuljav, masa enote in podobno.

(Povzeto po: <http://www.eminence.com/support/understanding-loudspeaker-data/>)

Specs :

Nominal Impedance	8 Ω	Free air resonance, Fs	33 Hz
DC resistance, Re	5.7 Ω	Sensitivity (2.83 V / 1 m)	88 dB
Voice coil inductance, Le	0.15 mH	Mechanical Q-factor, Qms	4.9
Effective piston area, Sd	118 cm ²	Electrical Q-factor, Qes	0.40
Voice coil diameter	35.5 mm	Total Q-factor, Qts	0.37
Voice coil height	16 mm	Moving mass incl.air, Mms	11.8 g
Air gap height	5 mm	Force factor, Bl	5.9 Tm
Linear coil travel (p-p)	11 mm	Equivalent volume, Vas	39 liters
Magnetic flux density	1.0 T	Compliance, Cms	1.97 mm/N
Magnet weight	0.54 kg	Mechanical loss, Rms	0.5 kg/s
Net weight	1.56 kg	Rated power handling*	60 W

* IEC 268-5, T/S parameters measured on drive units that are broken in.

Slika 5: Izrezek tabele T/S parametrov v specifikacijah zvočniške enote (Vir: www.sbacoustics.com)

3.2.3 Tipi dinamičnih zvočniških enot

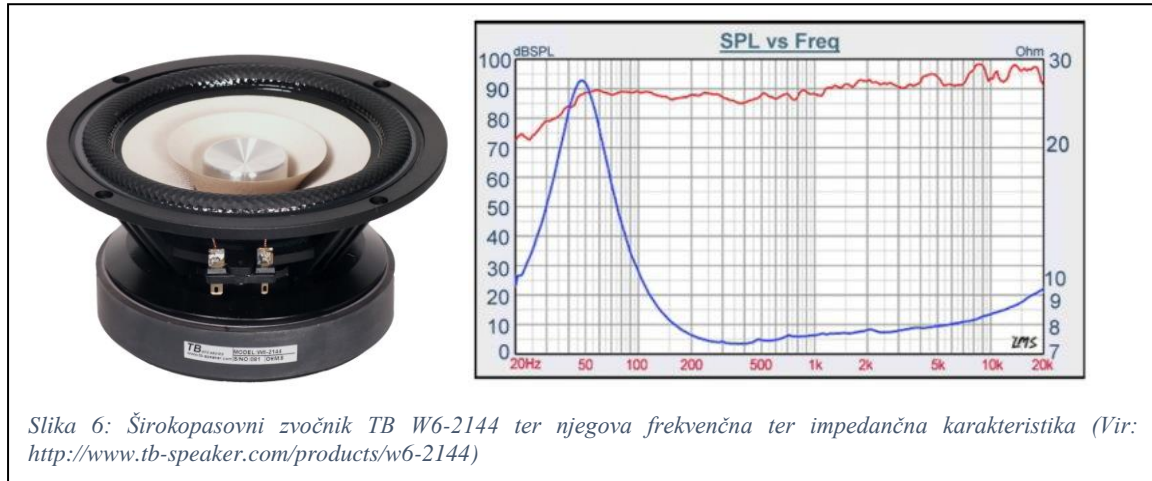
Ko govorimo o tipih dinamičnih zvočnikov jih pogosto ločimo glede na njihovo območje reprodukcije zvoka. Poznamo torej širokopasovne zvočnike, nizkotonce, srednjetonce, visokotonce ter koaksialne zvočnike, vsak od njih pa ima svoje posebne značilnosti.

Tipi zvočnikov in njihova frekvenčna področja:

Tabela 1: Delitev frekvenčnih področij.

	Frekvenčno območje	Tip zvoka
Zelo nizki toni	Pod 40 Hz	najnižji toni orgel, bobnenje eksplozije, bobnenje ob potresu - subwoofer
Nizki toni	40 Hz do 160 Hz	tube, bass kitare, bobni - nizkotonec
Srednji toni	160 Hz do 3 kHz	človeški glas, trobente, kitare - nizkotonec/nizkosrednjetonec/srednjetonec
Visoki toni	3 kHz do 20 kHz	činele, piščali - visokotonec

Širokopasovni zvočniki so najpogosteje premera 5-20 cm, kar še omogoča zadostno kvaliteto reprodukcije visokih tonov in majhno popačenje pri produkciji nizkih tonov. Včasih imajo širokopasovni zvočniki v centru dodano posebno majhno membrano za boljšo reprodukcijo visokih tonov (ang. whizzer).

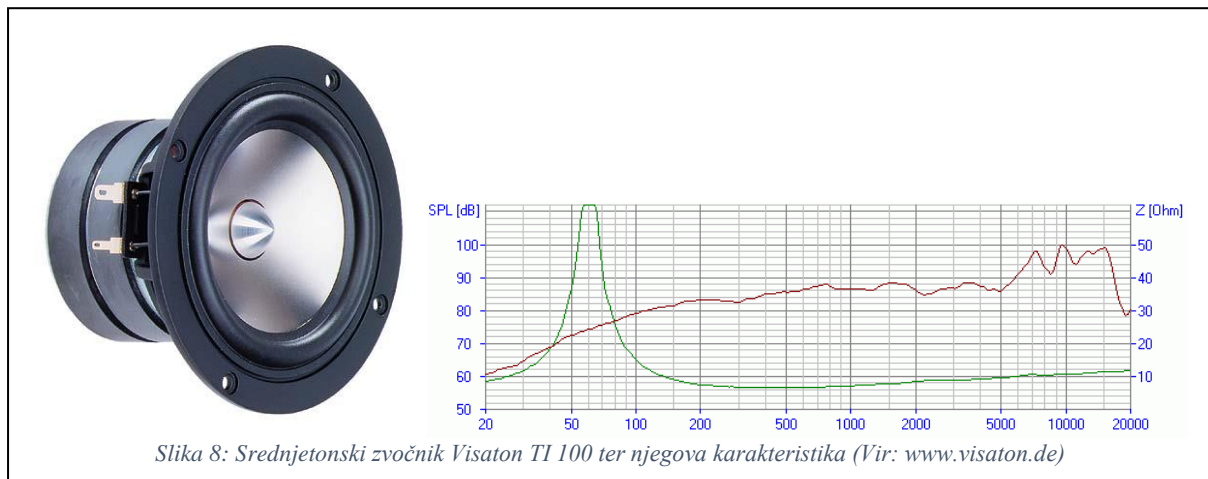


Naslednji tip so nizkotonski zvočniki. Kot nam že samo ime pove, so namenjeni reprodukciji zvoka spodnjega dela slišnega spektra. Nizkotonski zvočniki se za optimalno delovanje zanašajo na karakteristike zvočniške škatle, v kateri se nahajajo. Podvrsta teh enot so tudi tako imenovani subwooferji, zvočniki, namenjeni izključno reprodukciji zelo nizkih tonov (pod 200 Hz) in jih pogosto najdemo kot samostojne enote.

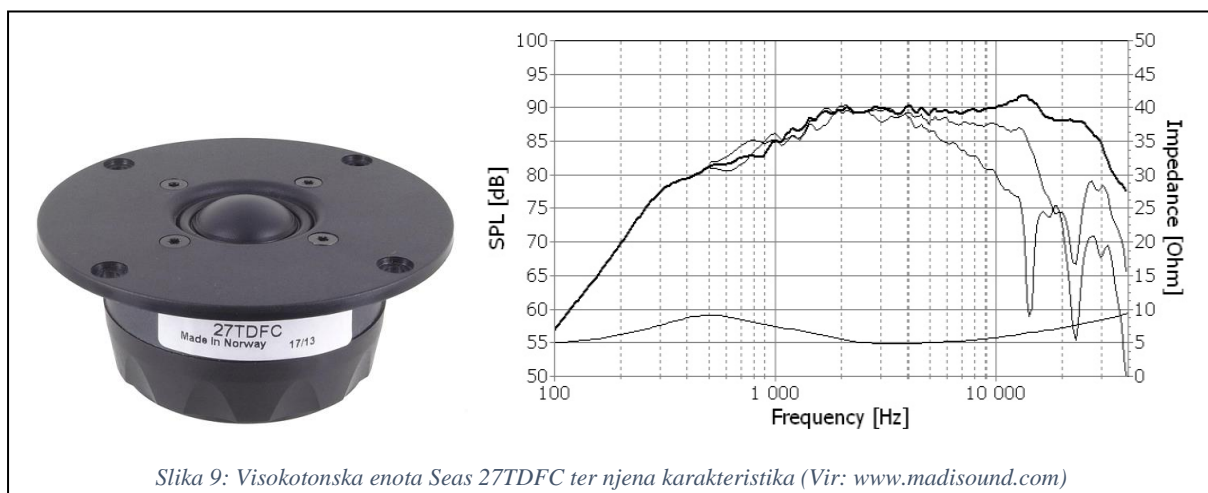


Slika 7: Nizkotonski zvočnik SVS PB-13 Ultra (Vir: www.svsound.com)

Srednjetonski zvočniki pokrivajo območje od okoli 160 Hz do 3 kHz, znano tudi kot srednjetonno območje, ki se nahaja med območjem nizkotonca in viskotonca. Srednjetonce srečamo v več oblikah lahko so oblikovani podobno kot nizkotonci in uporabljajo kompozitno membrano, obstajajo pa tudi kalotne izvedbe, ki so po izgledu podobne kalotnik viskotoncem in za membrano uporabljajo svilo. Po izgledu so tako podobni nizkotoncem, le da so manjši in jih po navadi najdemo v velikostih do okoli 16 cm, kalotne pa do okoli 6 cm.



Viskotonni zvočniki so namenjeni pokrivanju najvišjega dela slišnega spektra. Reproducirajo lahko frekvence vse od okoli 3 kHz naprej. Problem, ki se pojavi pri viskotoncih je območje slišnosti. Če se od glavne osi viskotonca odmikamo, hitro ugotovimo, da mu naglo pade glasnost. Viskotonske zvočnike v HiFi akustiki najdemo predvsem v kalotni verziji, uporabljajo pa materiale, kot so svila, kovine in celo keramika. Uporabljen material je predvsem stvar preference, nasplošno pa je znano, da kovinski in keramični viskotonci zvenijo bolj »ostro« kot svileni.



2.3 OHIŠJA ZA ZVOČNIŠKE ENOTE

Zvočniško ohišje je škatla, kamor namestimo zvočniške enote in ostale komponente, potrebne za delovanje kot na primer kretnice, bass-reflex cevi in priključne sponke. Pri aktivnih zvočnikih najdemo v ohišju tudi ojačevalec. Zvočniške škatle najdemo v vseh oblikah, od preprostih zaprtih pravokotnih pa do kompleksnih računalniško konstruiranih in simuliranih omaric, ki vključujejo kompozitne materiale, notranje ojačitve, rogove in zvočno izolacijo. Prav tako jih najdemo tudi v različnih velikostih, vse od majhnih škatel, namenjenih za 8 cm širokopasovne enote pa do gigantskih škatel za 48 cm in večje nizkotonce, namenjene za profesionalno akustiko, uporabljeno na koncertih.

Primarna naloga zvočniške škatle je preprečitev interakcije zvočnih valov z zadnje strani zvočniške enote s tistimi pred njo. Ker so ti zvočni valovi protifazni, bi pri vsaki interakciji med njimi prišlo do neželenega popačenja. Poleg modulacije zvočnih valov z zadnje strani membrane škatla nudi zmanjševanje vibracij (dušenje) same enote, zaščiti pred zunanjimi vplivi ter omogoči lažji transport.

Akustično idealna zvočniška omarica nizkotonskega zvočnika bi bila neskončno velika ploskev, za njo pa bi bil neskončno velik prostor. To bi popolnoma preprečilo interakcijo med prednjimi in zadnjimi zvočnimi valovi. Največji približek temu je odprt zvočnik (ang. open baffle), zvočnik v takšnem ohišju pa potrebuje trdo vzmetenje.

V današnjih časih zvočnike najpogosteje vgrajujemo v zaprte kompresijske škatle ali bass-reflex škatle, redkeje pa tudi v bandpas 4., 6. ali 8. reda, odprte izvedbe, izobarične izvedbe, prenosne linije ter troblje in rogove. Zvočniška ohišja gradimo predvsem za nizkotonske zvočnike in subwooferje, imajo njihove karakteristike ključen pomen za zvok. Visokotonske enote posebnih škatel ne potrebujejo, saj so za membranskim delom zaprte s pločevino.

V zvočniških ohišjih pogosto najdemo različne materiale za blaženje kot so filc, akustična pena ter druga akustična polnila. Njihov namen je zmanjševanje vibracij zvočniškega ohišja ter vpijanje zvočnih valov v ohišju samem. Poleg teh funkcij ima polnilo efekt tudi na zvočniško enoto, saj v škatli zmanjša hitrost zvoka, škatla pa za zvočniško enoto postane »večja«.

(Povzeto po članku na spletni strani: <http://audiojudgement.com/types-of-enclosures-which-is-the-best/>)



Slika 10: Primer notranjosti nedokončane zvočniške škatle z vgrajeno kretnico ter akustičnim polnilom (Vir: www.google.si)

2.3.1 Izvedba zaprte škatle oziroma kompresija

Zaprte škatle so ena najpogostejših izvedb zvočnikov v akustiki. Od vseh izvedb škatel so najpreprostejše, vendar glede na (ne)zahtevnost nudijo zelo dobre lastnosti, na primer mehkejši in točnejši bas ter zelo dober impulzni odziv. Ta izvedba deluje na principu uporabe zraka v škatli kot vzmet. Vsaka kompresijska škatla mora imeti točno določen volumen glede na tip zvočniške enote in njene parametre. Če je škatla premajhna, je zračna vzmet »pretrda«, efekt vzmeti pa se izniči, pri uporabi prevelike škatle pa je efekt ravno obraten. Tako se izgubi učinek kompresije in njenih prednosti, ustvari pa se tako imenovan »infinite baffle« ali odprti zvočnik.

Efektivno dušenje zvočniške škatle je definirano s parametrom Q_{tc} . Ta parameter je vedno večji od Q_{ts} parametra zvočnika, optimalno pa je Q_{tc} približno 0,7. Kompresijske škatle so pogosto napolnjene z akustičnim polnilom, kar jim zviša učinkovitost, absorbira zvočne valove, ki jih membrana ustvari zadaj ter zmanjša resonanco škatle. Zaprte škatle imajo strmino pojemanja 12 dB na oktavo od točke kjer se učinkovitost zniža za 3 dB. Zaprte škatle so v praksi v primerjavi z ostalimi izvedbami tudi najmanjše.



Slika 11: Poenostavljen prikaz zaprte škatle (Vir: <http://audiojudgement.com/types-of-enclosures-which-is-the-best/>)

Enačbi za izračun optimalne zaprte škatle:

Volumen škatle:
$$Vb = \frac{Vas}{(0,7/Qts)^2 - 1}$$

Resonančna frekvenca sistema:
$$Fcb = 0,7/Qts(Fs)$$

F3 faktor, potreben za izračun -3 dB točke. (X):

Tabela 2: F3 faktor za izračun -3 dB točke.

Qtc	F3 faktor (X)
0,5	1,55
0,6	1,21
0,7	1
0,8	0,9
0,9	0,83
1	0,79
1,1	0,76
1,2	0,74
1,3	0,72
1,4	0,71

Točka znižanja amplitude za 3 dB:
$$F3 = Fc * X$$

(Vb - volumen škatle, Fcb - resonančna frekvenca sistema, Qts - skupno dušenje zvočniške enote, Vas - trdota vzmetenja, Fs - resonančna frekvenca zvočniške enote)

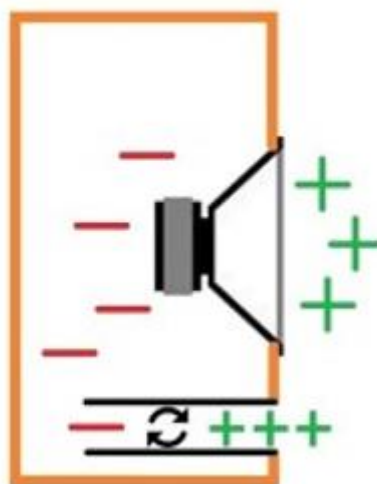
(Enačbe podane z spletne strani <http://diyaudiocorner.tripod.com/formula.html>)

2.3.2 Bass-reflex škatle

Bass-reflex škatle so poleg zaprtih škatel izredno pogosta izvedba v akustiki, še posebej v HiFi in domači uporabi. Delujejo na principu helmholtz resonatorja. Po izdelavi so zelo podobne zaprtim škatlam, za razliko od njih pa imajo dodano cev, ki je ponavadi okrogle ali pravokotne oblike. Ta cev pomaga prehajanju zraka v škatlo in iz nje, s tem pa posledično pripomore k izboljšanju učinkovitosti in nizkofrekvenčnemu odzivu. Tako bass-reflex škatla nudi najboljše ravnovesje med učinkovitostjo, basom ter zahtevnostjo izdelave.

Bass-reflex škatle so v primerjavi z zaprtimi škatlami dosti bolj občutljive na napake v zasnovi in izdelavi, zato je zanje potrebna večja natančnost. Pojemanje v spodnjem delu frekvenčnega odziva te izvedbe škatle je dvakrat večje kot pri zaprti izvedbi in sicer 24 dB na oktavo. Pogosto so od zaprtih škatel tudi fizično večje, vendar imajo 3 dBA večjo občutljivost, igrajo nižje frekvence in imajo manjša popačenja. Tranzientni odziv je slabši, prav tako pa pod resonančno frekvenco škatle izgubimo nadzor nad zvočniško enoto, oziroma se izgubi učinek dušenja (vzmeti).

Zvočniška enota ima v bass-reflex škatli 3 različna obnašanja. Ko je frekvenca, s katero igra višja od resonančne frekvence, je efekt na zvočnik enak, kot če bi bil v zaprti škatli. Čim se frekvenca, ki jo zvočnik reproducira, približa resonančni frekvenci škatle se linearni gib zvočnika zmanjša, zelo pa se poveča hitrost in količina zraka, ki prehaja skozi bass-reflex cev. Temu pojavu se reče razbremenitev zvočnika oziroma obremenitev cevi. Ko je frekvenca zvoka, ki jo ustvarja zvočnik nižja od resonančne frekvence omarice, se učinek škatle popolnoma izgubi. Zvočnik se obnaša, kot če bi bila v škatli samo velika luknja. Linearni pomik membrane se tako izredno poveča, pri takšnem pojavu pa tvegamo poškodbo zvočnika.



Slika 12: Poenostavljen prikaz bass-reflex škatle (Vir: <http://audiojudgement.com/types-of-enclosures-which-is-the-best/>)

Na zgornji sliki je prikazano delovanje bass-reflex škatle. + označuje območje višjega tlaka, - pa območje nižjega tlaka. V bass-reflex cevi nastane pojav helmholtzovega resonatorja.

Enačbe za izračun optimalne bass-reflex škatle ter cevi:

$$\text{Volumen škatle: } Vb = 15 * Vas * Qts^{2,87}$$

$$\text{Teoretična frekvenca -3 dB amplitude v optimalni škatli: } F3 = 0,26 * Fs * Qts^{-1,4}$$

$$\text{Teoretična resonančna frekvenca v optimalni škatli: } Fb = 0,42 * Fs * Qts^{-0,9}$$

(Vb - volumen škatle, Vas - trdota vzmetenja, Qts - skupno dušenje, F3 - frekvenca pri kateri se amplituda zniža za 3 dB, Fs - resonančna frekvenca zvočniške enote, Fb - resonančna frekvenca sistema):

Če je volumen idealne škatle za aplikacijo prevelik, ga lahko zmanjšamo, vendar le do okoli 60 % idealne vrednosti.

$$\text{Resonančna frekvenca nove škatle: } Fb = (Vas/Vb)^{0,32} * Fs$$

$$\text{Nova točka -3 dB amplitude: } F3 = (Vas/Vb)^{0,5} * Fs$$

Poleg volumna škatle je potreben izračun cevi, ki jo vstavimo v škatlo.

$$\text{Enačba za izračun dolžine cevi: } Lv = \left[1,463 * 10^7 * \frac{r^2}{Fb^2} * Vb \right] - 1,463 * r$$

(r - polmer cevi, Lv - dolžina cevi, Vb - volumen škatle, Fb - resonančna frekvenca sistema)

(Enačbe podane z spletne strani <http://diyaudiocorner.tripod.com/formula.htm>)

Eno od nenapisanih pravil, ki se jih držimo pri zasnovi bass-reflex škatle je, da hitrost zraka skozi cev ohišja nikoli ne preseže hitrosti približno 20 m/s. Posledica previsoke hitrosti zraka skozi cev je tako imenovano »dušenje«. Pojavijo se nezaželeni zvoki, ki jih zrak ustvarja na robu bass-reflex cevi.

2.3.4 Ostali tipi škatel (bandpass, prenosna linija, rog)

Ostale tipe škatel bom opisal le na kratko, saj je njihova uporaba redkejša in za mojo nalogo niso pomembne.

Vsi bandpass tipi delujejo na podobnem principu. Zvočnik je nameščen znotraj same škatle in ga ne vidimo. Pri 4. redu je zvočnik z ene strani tako v kompresiji z druge pa v bass-reflex izvedbi, 6. red narekuje bass-reflex na obeh straneh membrane in tako dalje. Področje igranja je le določen pas od tukaj pa tudi ime (ang. band – slo. pas/območje). Prednosti so dobra učinkovitost ter nadzor zvočniške enote, slabosti pa velikost ohišja samega, zahtevnost izdelave in nedostopnost zvočniške enote.



Izvedba omarice prenosna linija (ang. transmission line) ustvari labirint od zvočniške enote proti izhodu iz ohišja. Resonančna frekvenca tega labirinta se tipično ujema z resonančno frekvenco zvočniške enote. Tako so zvočni valovi, ki pridejo iz labirinta sofazni z valovi, ki jih membrana ustvarja spredaj. Od vseh tipov zvočniških škatel je konstruiranje bandpass ohišja eno najtežjih, predvsem zaradi nepredvidljivosti rezultata. Prednosti so tako zelo dobra reprodukcija nizkih tonov ter majhna občutljivost na pozicioniranje, slabosti pa kompleksnost konstrukcije, velikost škatle in slaba kontrola nad zvočniško enoto.



Zadnji tip so škatle v obliki roga (ang. horn). Ponujajo največjo učinkovitost med vsemi vrstami ohišij in sicer do 10 dBA več kot zaprte škatle.. To se zgodi zaradi boljšega prenosa akustične energije z zvočniške enote na zrak. Slabost teh škatel je njihova velikost ter zahtevnost konstrukcije. Ta vrsta škatle je tudi zelo usmerjena, kar je lahko glede na naše zahteve prednost ali pa slabost.



2.4 FREKVENČNI FILTRI ZA ZVOČNIŠKE ENOTE

Zvočniške kretnice uporabljamo v zvočniških sistemih z dvema ali več enotami. Njihov glavni namen je ločevanje vhodnega signala v več izhodnih signalov, od katerih vsak pokriva del celotnega frekvenčnega območja. Zvočniške enote tako prejmejo signale le v njihovih uporabnih frekvenčnih področjih. Tako drastično zmanjšamo popačenje zvoka.

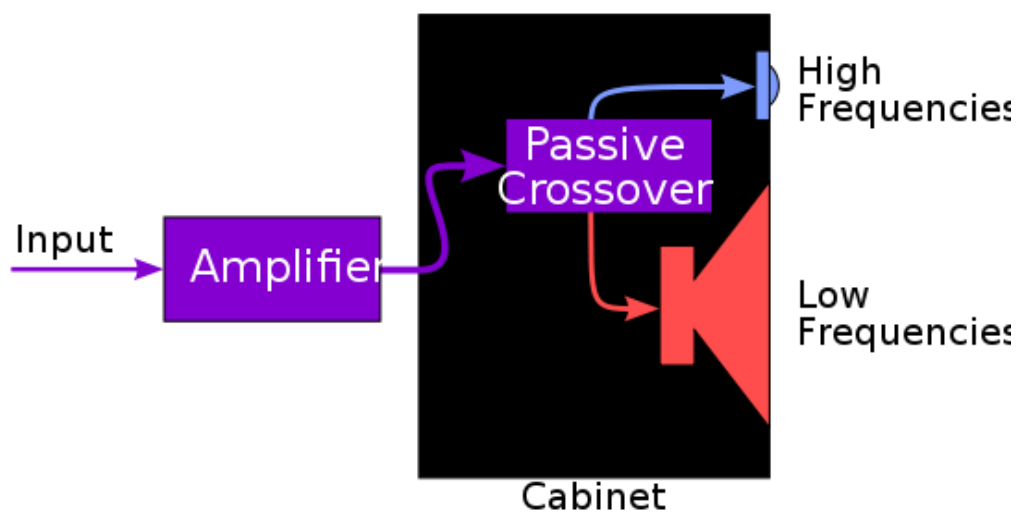
Kretnice so lahko aktivne in delijo signal pred končno amplifikacijo ali pasivne in delijo signal po amplifikaciji. Prednosti aktivnih kretnic so predvsem majhne izgube in visoka prilagodljivost, slabosti pa višja cena ter potreba po uporabi več končnih ojačevalnikov moči.

Pasivne kretnice uporabljajo kombinacijo tuljav, bipolarnih kondenzatorjev ter uporov. S temi deli tvorimo natančno konstruirane pasivne kretnice, te pa so v večini primerov potem pritrjene v zvočniška ohišja. Pasivne kretnice poleg zvočnega signala ne potrebujejo dodatnega napajanja. Najpogostejša uporaba pasivnih kretnic je predvsem v sistemih z nizkimi močmi, HiFi akustiki in avtoakustiki. Kompleksnost pasivnih kretnic je povezana z željenim redom oziroma strmino padanja moči (1. red – 6dB/oktavo, 2. red – 12dB/oktavo, itd.), zmožne pa so tudi kompenzacije neželenih karakteristik zvočniških enot ter resonanc. Zaradi medsebojne interakcije komponent so za simulacijo in izdelavo pogosto težavne. Slabosti pasivnih kretnic so velike izgube (do 10 %) ter posledično majhna zmožnost prenašanja moči, slabšanje dušenja zvočniške enote ter spreminjanje impedančne karakteristike zvočniške enote.

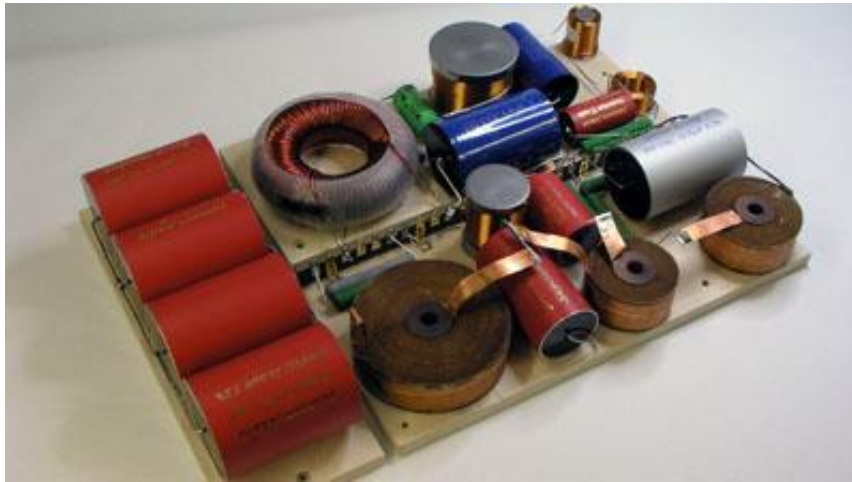
Pri konstruiranju pasivne kretnice moramo biti pozorni na naslednje parametre:

- Impedanca zvočniških enot
- Frekvenca križanja zvočniških enot
- Ujemanje faze zvočniških enot
- Uporaba zadostne strmine filtrov za zaščito visokotoncev ter preprečevanje lomljenja membrane nizkotoncev ter srednjetoncev

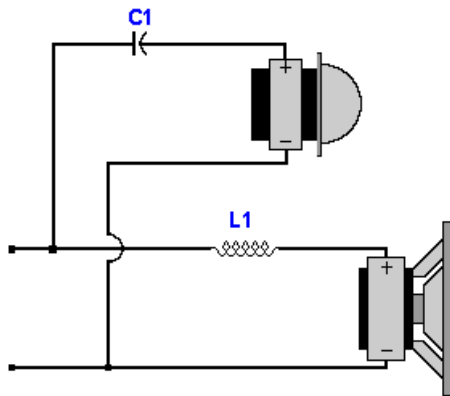
(Povzeto po spletni strani <http://sound.whsites.net/biamp-vs-passive.htm>)



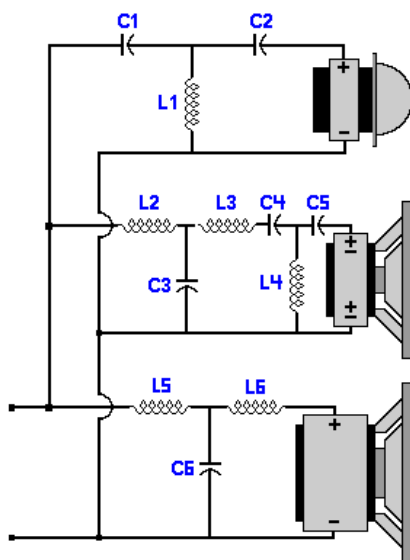
Slika 16: Shematiski prikaz delovanja pasivne kretnice (Vir: www.wikipedia.org)



Slika 17: Primer dejanske pasivne kretnice, z pasivnimi komponentami (Vir: www.troelsgravesen.dk)



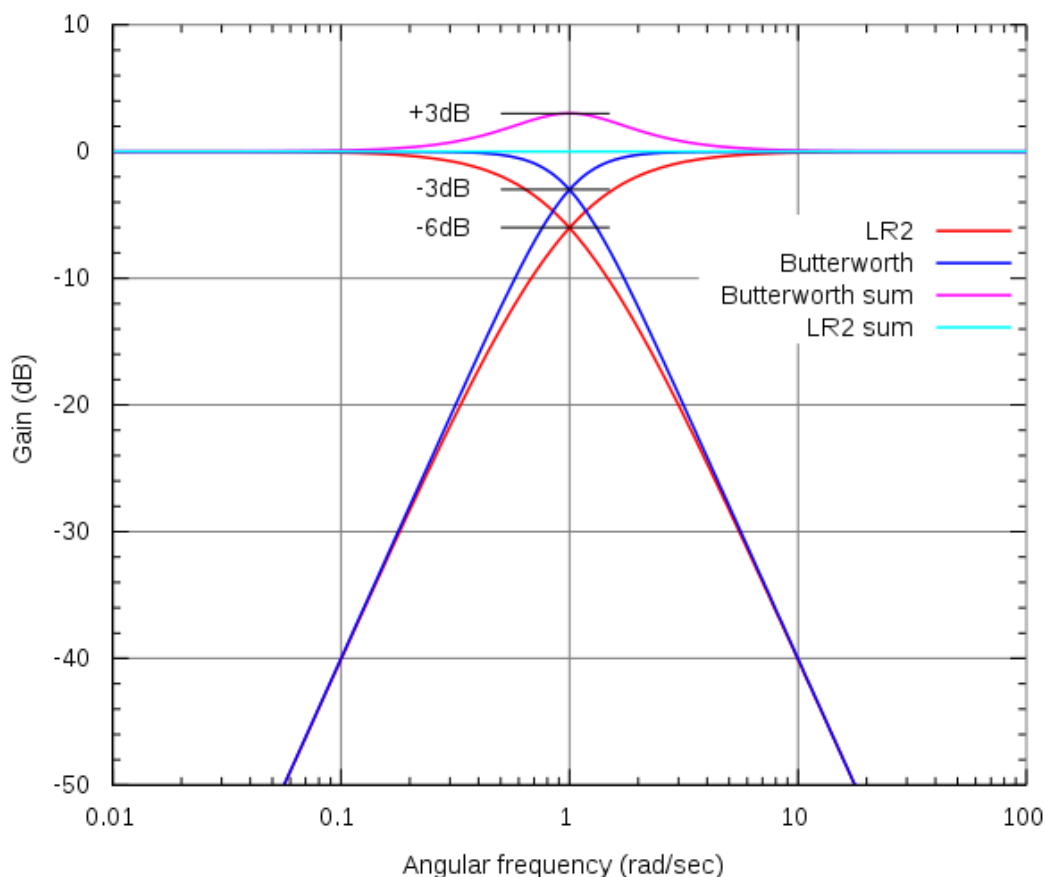
Slika 18: Shema 2-sistemske pasivne kretnice 1. reda (Vir: Lasten)



Slika 19: Shema 3-sistemske pasivne kretnice 3. reda (Vir: Lasten)

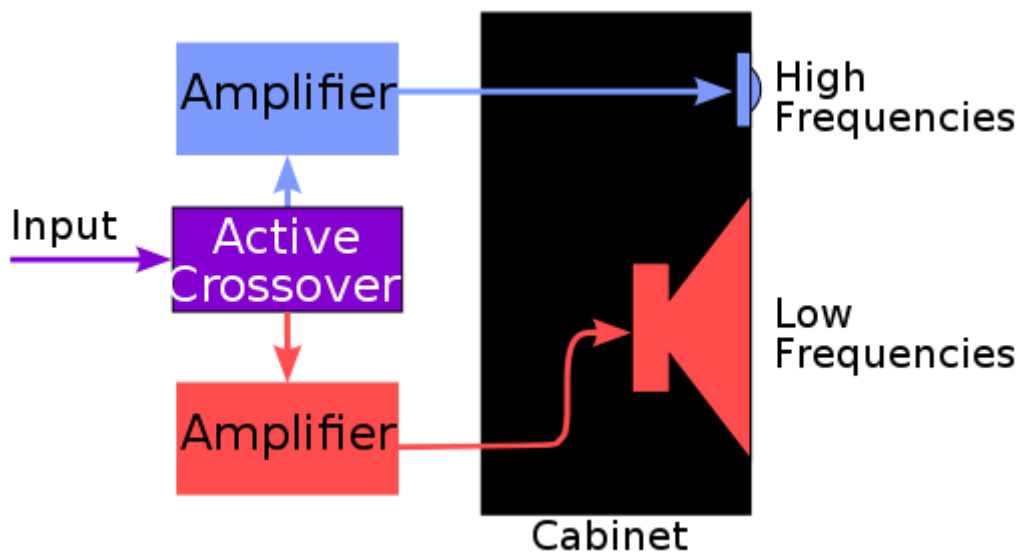
Kot vidimo na prejšnjih primerih je zahtevnost kretnice povezana s številom enot, ki jih želimo uporabiti in kakšen red filtrov želimo. Filter prvega reda potrebuje po 1 komponento, če je enota omejena z ene strani (visokoprepustni ali nizkoprepustni filter) oziroma 2 komponenti, če je omejena z obeh strani frekvenčnega spektra (visoko in nizkoprepustni filter). Pri uporabi filtra drugega reda se število komponent podvoji, slabljenje pa se poveča s 6 dB na 12 dB na oktavo. Tretji red zahteva trikratno število komponent prvega reda, prav tako pa se slabljenje poveča na 18 dB/oktavo. Četrty red filtrov sledi prejšnjim primerom in doseže slabljenje 24 dB na oktavo. Če želimo doseči optimalno frekvenčno karakteristiko pri frekvenci križanja, moramo vsaki enoti odvzeti 6 dB akustične moči, ta vrsta kretnice pa se imenuje Linkwitz-Riley 2. reda. Druga vrsta filtra ima ime Butterworth, rezultat križanja pri tej pa je narastek 3 dB.

Na spodnji sliki je primer delovanja različnih filtrov. Z rdečo barvo sta označena Linkwitz-Riley filter, svetlo modra pa je njun seštevek. Vijolična krivulja predstavlja filtra tipa Butterworth, njun seštevek pa je vijolična linija. Kot se vidi na grafu, je za akustično kretnico najbolj primeren filter tipa LR2, zaradi enakomernejšega odziva.



Slika 20: Prikaz filtrov ter njihovih seštevkov (Vir: www.wikipedia.org)

Aktivne kretnice so elektronske in za delovanje potrebujejo dodatno napajanje. Ker je signal ojačan pred močnostno amplifikacijo potrebujemo več ojačevalnikov oziroma končnih stopenj, po 1 za vsak ločen pas oziroma zvočniško enoto. Ime za to tehniko je bi-amplifikacija/tri-amplifikacija/.... To tehniko se uporablja v večjih zvočnih sistemih, sistemih velikih moči, reprodukciji v živo in podobno. Velika prednost teh sistemov je visoka fleksibilnost. Mogoče je nastavljanje faze, spreminjanje točk lomnih frekvenc, možnost uporabe zvočniških enot različnih impedanc, glavna prednost pa je enostavnost povezovanja ter modifikacija strmine filtrov.



Slika 21: Shematski prikaz delovanja aktivne kretnice (Vir: www.wikipedia.org)



Slika 22: Primer dejanske elektronske aktivne kretnice, model 2x4 proizvajalca MiniDSP (Vir: www.minidsp.com)

3 KONSTRUKCIJA, SIMULACIJA IN IZDELAVA ZVOČNIKOV

Konstrukcija ter izdelava zvočnikov je potekala v naslednjem vrstnem redu:

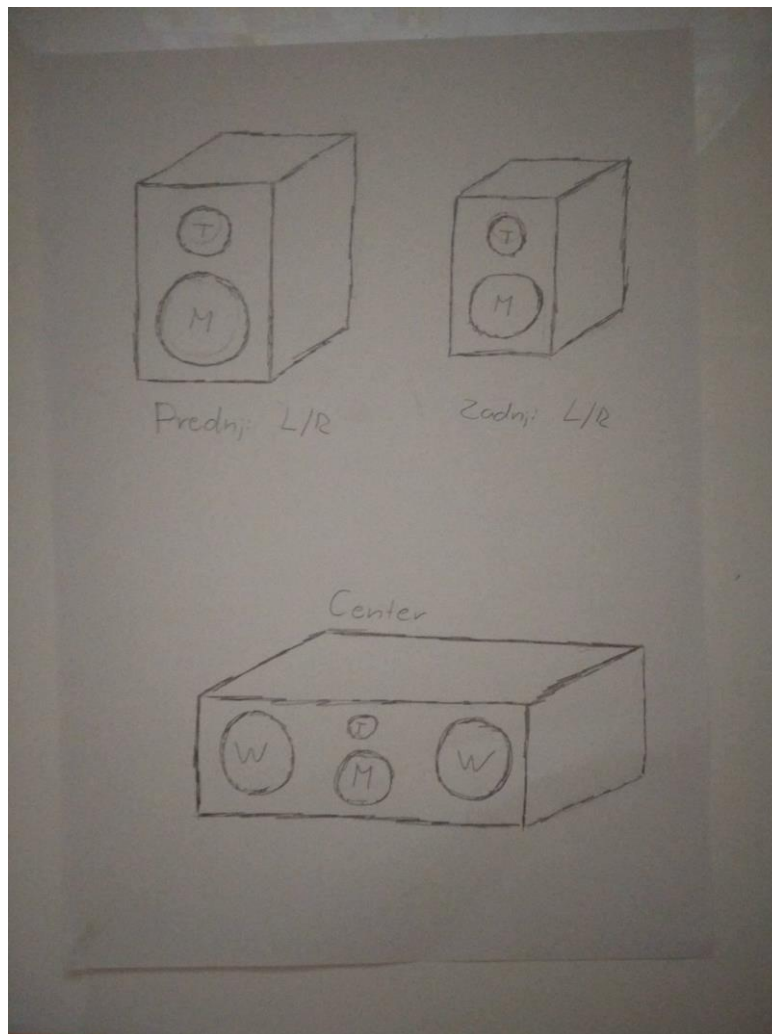
- Ideja
- Izbira zvočniških enot ter vrste kretnic
- Izbira primernih materialov za izgradnjo škatel
- Zasnova in simulacija zvočniških škatel
- Zasnova in simulacija pasivnih kretnic
- Izbira primernih pasivnih komponent za kretnico
- Izdelava zvočniških škatel ter kretnic

Ta del vsebuje opis tako ideje za zasnovo zvočnikov kot tudi samo konstrukcijo, simulacijo in izdelavo. Najprej se je potrebno vprašati, kakšne zvočnike sploh želimo, kakšen je prostor, v katere bodo postavljeni, koliko smo pripravljeni investirati ter kakšna so naša pričakovanja. Po vseh odločitvah je potrebno izbrati enote, vrste kretnic ter simulirati zvočnike. To je storjeno s pomočjo programske opreme WinISD in Boxsim. Izbral sem material za izgradnjo zvočniških omaric, jih izdelal ter pobarval, na koncu pa sem vanje montiral kretnice, zvočniške enote, terminal, akustično polnilo ter vodnike. Zvočniki so bili narejeni, potrebno pa jih je bilo le še testirati in izmeriti akustične ter impedančne karakteristike.

3.1 Idejna zasnova zvočnikov

Cilji, ki sem si jih za izdelavo zvočnikov zadal so bili:

Zvočniški set, ki sem ga izdelal, vsebuje 5 zvočnikov, vsak od zvočnikov predstavlja svoj kanal. Tako imamo prednji levi ter desni zvočnik, center ter zadnji levi in desni zvočnik, ki skupaj tvorijo prostorski zvok. Topologija vseh zvočnikov razen centra je zaradi preprostosti in cene 2-sistemska oziroma bo vsebovala nizkosrednjetonec ter visokotonec v MT (midwoofer-tweeter) konfiguraciji, center pa je zaradi pomembnosti v sistemu prostorkega zvoka ter potrebe po odlični horizontalni disperziji 3-sistemski in vsebuje par nizkotoncev, nizko-srednjetonec ter visokotonec v WMTW (woofer-midwoofer-tweeter-woofer) konfiguraciji. Vsi zvočniki razen centra uporabljajo bass-reflex izvedbo ohišja, center pa bo imel 2 zaprti komori principa kompresije.



Slika 23: Prva idejna skica (Vir: Lasten)

3.2 Izbira zvočniških enot ter vrste kretnic

Prvi korak izdelave zvočnikov je izbira enot. To je verjetno eden težjih korakov v sami izdelavi, saj je na trgu na tisoče različnih zvočniških enot, vsaka pa ima svojo prednost in slabost. Prav tako se cene gibljejo od skromnih 10 evrov pa do več kot 1000 evrov za posamezno enoto. Pri izbiri enot se je potrebno prepričati, da se frekvenčni področji enot dovolj prekrivata, saj imamo tako omogočen boljši skupen frekvenčni odziv. Ker želimo, da sistem zveni čim enotnejše sem za vsak zvočnik poskusil uporabiti enote istega proizvajalca, moja odločitev pa so bile enote podjetja SB Acoustics.

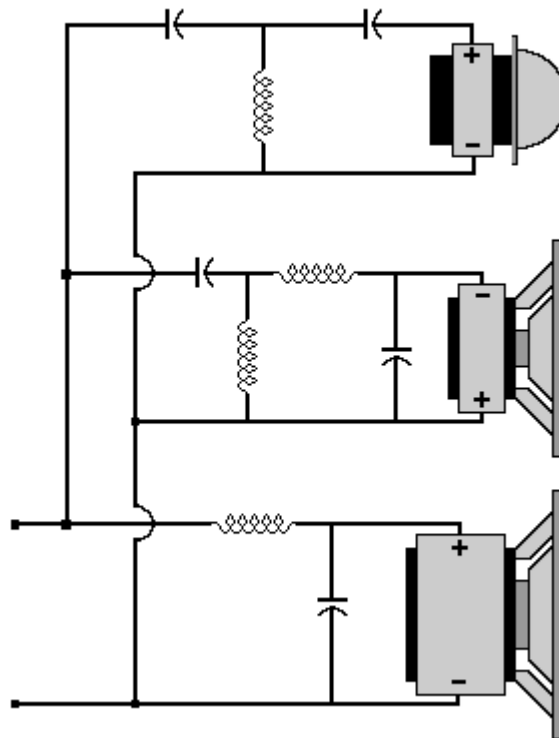
SB Acoustics je dansko podjetje, ki se ukvarja z zasnovo in izdelavo kvalitetnih HiFi zvočniških enot, namenjenih predvsem samogradnji zvočnikov. Za svojo nalogo sem izbral njihovo serijo PFC nizkosrednjetoncev in sicer SB13PFC25-4 ter SB16PFC25-4 ter svilenih kalotnih visokotoncev SB19ST-C000-4, SB26STC-C000-4 ter SB26STCN-C000-4. Obe seriji spadata v njihov najnižji cenovni rang, vendar imata glede na ceno zelo dobre lastnosti. Tehnična dokumentacija, specifikacije in parametri vseh uporabljenih enot so vključeni kot priloga raziskovalne naloge.



Slika 24: Nizkosrednjetonec SB13PFC25-4, uporabljen v centru ter zadnjem paru zvočnikov (Vir: www.sbacoustics.com)

Zvočniki, ki sem jih naredil, koristijo pasivne kretnice. Za vsako enoto, ki jo uporabimo, potrebujemo svoj filter. Kot sem omenil že prej, so ti sestavljeni iz kombinacije tuljav, kondenzatorjev in uporov. Kretnice, ki jih bodo uporabljali par prednjih ter zadnjih surround zvočnikov bodo vsebovale nizkoprepustni filter 2. reda za nizko-srednjetonce ter visokoprepustni filter 3. reda za visokotonce. Slednji filter bo prav tako vseboval zaporedno vezan upor na izhodu, ki bo zmanjšal moč visokotoncev.

Razlog za filter 3. reda na visokotoncih je potreba po strmi oslavitvi signala pri spodnji lomni frekvenci, saj lahko visokotonce z lahkoto uničimo, če nanje pripeljemo že šibek signal nizke frekvence. Nizkotonci te težave z visokimi toni nimajo. Center zvočnik, ki bo vseboval 3 različne enote, bo vseboval 3 filtre. Prvi filter bo nizkoprepustni filter 2. reda in sicer za par nizkotoncev. Naslednji filter bo pasovni filter 2. reda, omejen pa bo z obeh strani. Ta filter bo uporabljal nizko-srednjetonce. Zadnji filter, ki ga potrebujemo, je filter 2. reda za visokotonec, podobno kot prejšnja pa bo tudi ta vseboval upor za zmanjšanje moči.



Slika 25: Osnovna shema pasivne kretnice center zvočnika (Vir: Lasten)

3.3 Izbira materialov za izgradnjo škatel

Ko se odločamo za material za izgradnjo škatle, izberemo material z zelo dobrimi lastnostmi dušenja. Poleg dobrih lastnosti dušenja mora biti material tudi primeren za obdelovanje in spajanje. Ena najbolj popularnih in najbolj primernih snovi za izdelavo zvočniških škatel je mediapan oziroma MDF (ang. medium-density fiberboard). Mediapan je fino mlet lesen prah, ki je nato z uporabo lepil spojen v plošče. Struktura je precej podobna ivernim ploščam, razlika je večinoma v grobosti mletja. Material je poceni (1 m² 19 mm mediapana stane okoli 15 evrov), se zelo dobro obdeluje in ima dobre lastnosti dušenja zvoka.

(Povzeto po spletni strani: <https://www.loudspeakerbuilding.com/Practical-guide/Cabinet-materials/10101,en>)



Slika 26: Primerjava strukture mediapana (zgoraj) in iverne plošče (spodaj) (Vir www.google.com)

Material, ki ga bomo uporabili za osnovo prednjih kozmetičnih mrežic je bukova vezana plošča debeline 8mm. Razlog uporabe vezane plošče je njena trdnost, saj se zaradi prečno lepljenih slojev lesa vezana plošča zelo težko deformira.

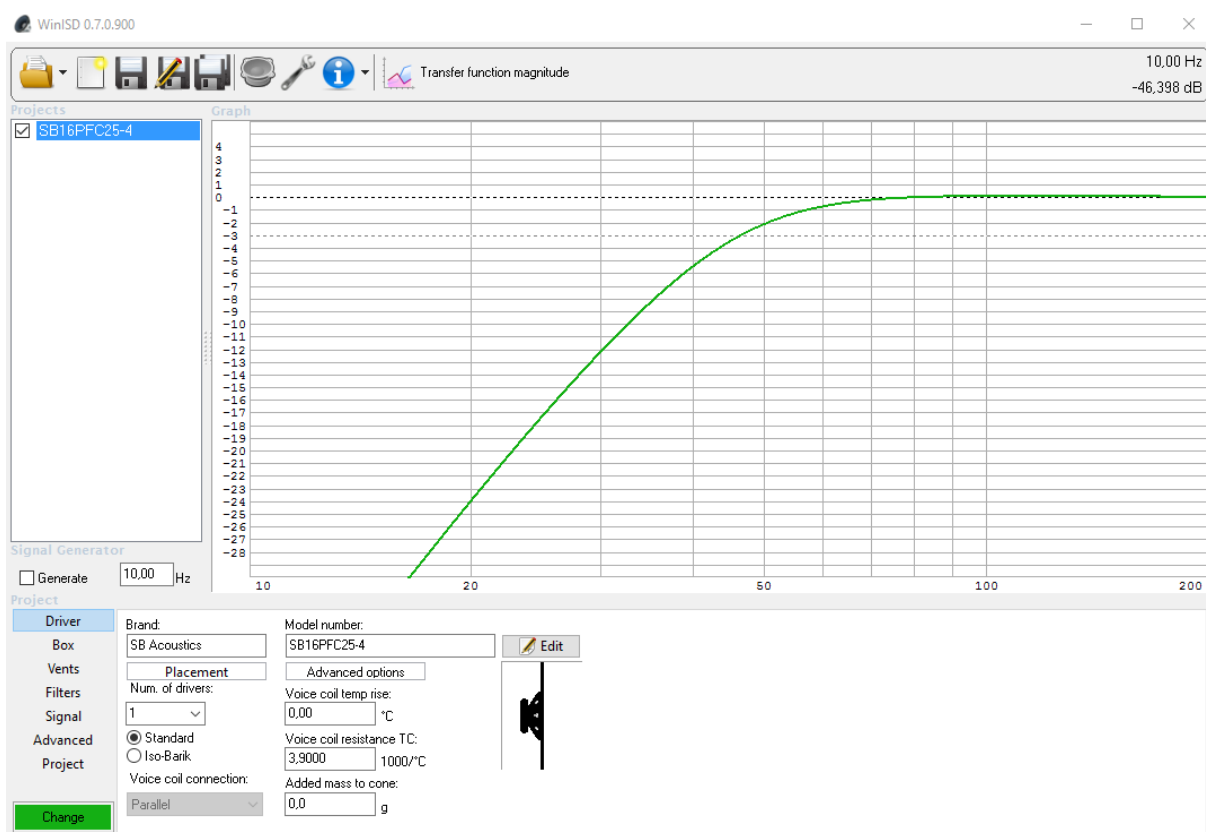


Slika 27: Struktura vezane plošče (Vir: www.google.com)

3.4 Zasnova, simulacija ter konstruiranje zvočniških škatel

Kot je že prej omenjeno v nalogi, vsaka zvočniška enota za optimalno delovanje potrebuje primerno zvočniško škatlo. Za izračun škatel si lahko pomagamo s formulami in tako ugotovimo, kakšne rezultate bomo s pomočjo škatel dosegli. Dandanes za izračun in simulacijo zvočniških ohišij obstajajo posebej za to namenjeni programi. Program, ki ga bom uporabil v svoji nalogi je WinISD.

WinISD je brezplačna programska oprema za zasnovo in simulacijo zvočniških škatel, ki je na voljo v angleščini. Ko program zaženemo, najprej pritisnemo tipko za »New Project« in ustvarimo nov projekt. Odpre se nam okence, kjer lahko izberemo ze obstoječo zvočniško enoto ali pa vnesemo podatke o novi enoti. Ko imamo zvočniško enoto izbrano oziroma so parametri nove enote vnešeni, nas program vpraša, koliko enot bo naše ohišje vsebovalo in ali bodo v izobaričnem sistemu. Za izbiro števila enot sledi izbira vrste ohišja. Program ima vgrajeno funkcijo, ki nam na podlagi parametrov zvočniške enote svetuje najbolj primerno vrsto škatle. Za tem nas čaka izbira med nekaj možnostmi začetnega izračuna škatel ter izbira imena. Čarovnik za nov projekt se nato zapre ter nas postavi v glavno okno.



Slika 28: Izretek osnovnega okna programa WinISD (Vir: Lasten)

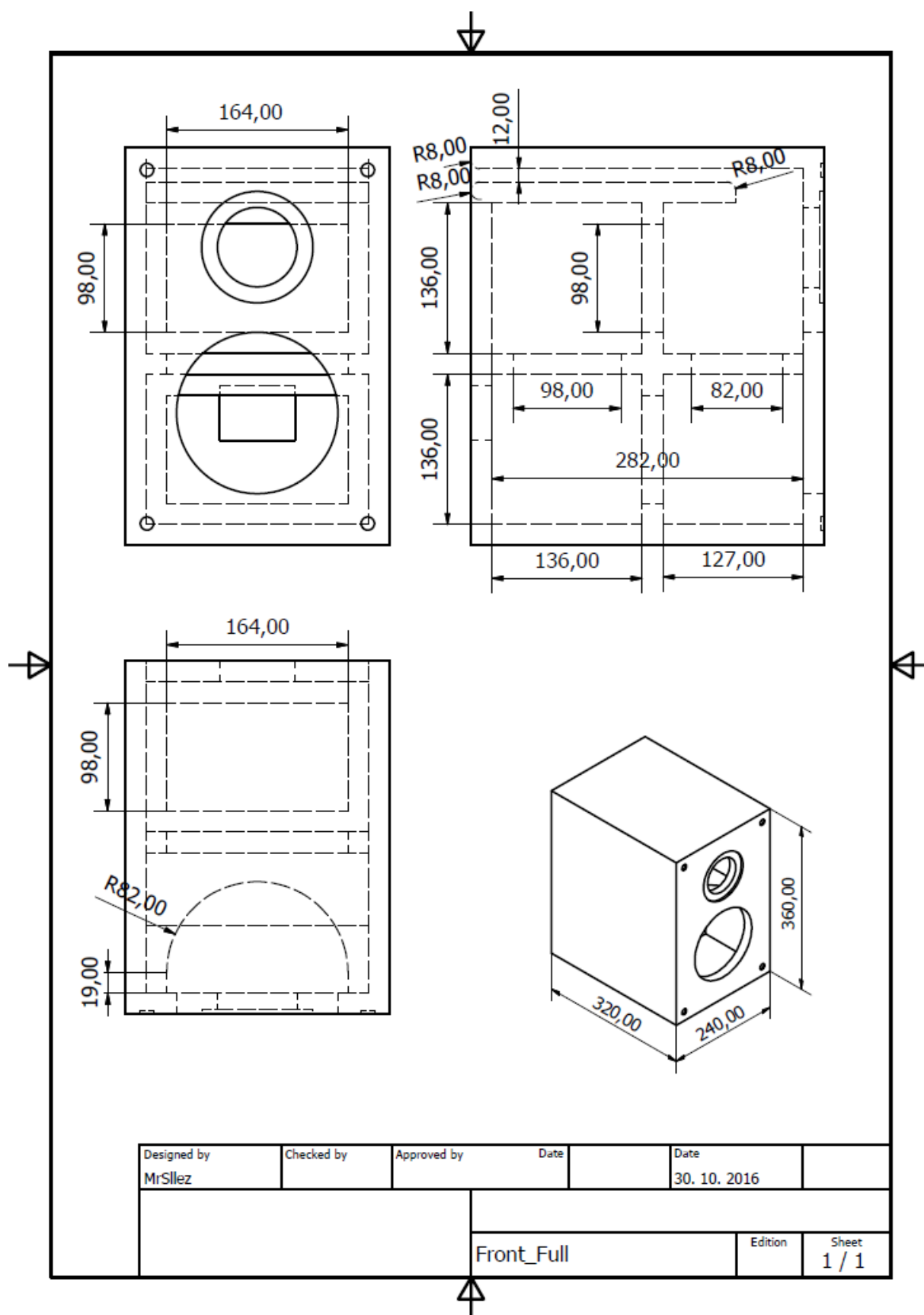
V glavnem oknu programa se nahaja graf s simulacijo frekvenčnega odziva zvočnika oziroma zvočnikov v danem ohišju. Na sredini vrha okna programa se nahajajo opcije za dodatne simulacije zvočniške omarice v odvisnosti od faze, kot so graf faznega zamika, impedančna karakteristika, faza dane impedančne karakteristike, maksimalna glasnost (SPL), linearni hod zvočnika, hitrost zraka v cevi zvočnika (bass-reflex) in še nekaj ostalih uporabnih funkcij.

Levo spodaj v programskem oknu se nahajajo zavihki, kjer lahko pregledamo in nastavljamo parametre simulacije. V prvem zavihku nastavljamo parametre zvočnika ter število zvočniških enot v samem ohišju. Drugi zavihek nudi nastavitve parametrov zvočniške škatle kot je volumen, resonančna frekvenca ter faktor dušenja ohišja Q_{tc} (kompresija). Tretji zavihek omogoča nastavljanje dimenzij bass-reflex cevi. V četrtem zavihku lahko simulaciji dodamo filtre, ki simulirajo učinek aktivne kretnice. Peti zavihek nam ponudi opcijo spreminjanja položaja poslušalca oziroma točko kjer simulacija poteka, ter nastavljanje moči, s katero sistem napajamo. V zadnjem zavihku spreminjamo temperaturo, vlažnost ter normalni tlak zraka. Prav tako imamo nekaj manjših opcij, koristnih za konstrukcijo zahtevnejših topologij škatel.

Rear chamber	
Number:	Shape:
1	<input type="checkbox"/>
Vent diameter:	
202.0	× 12.0 mm
Vent length:	End Correction:
24,26 cm	0,732
Cross area:	1st port resonance:
24,2 cm ²	708,23 Hz

Slika 29: Zavihek v programu WinISD za spreminjanje dimenzij bass-reflex cevi (Vir: Lasten)

S pomočjo programa sem nato simuliral 4 različna zvočna ohišja za enoti SB13PFC25-4 ter SB16PFC25-4. Prednja zvočnika, katera vsebujeta vsak po eno enoto SB16PFC25-4, imata volumen ohišja 16 litrov, resonančna frekvenca sistema pa je 40Hz. Tudi zadnji par zvočnikov je narejen po enakem principu z uporabljeno enoto SB13PFC25-4 in volumnom omarice 6 litrov ter resonančno frekvenco 60 Hz. Center zvočnik vsebuje par enot SB16PFC25-4 v zaprtim ohišju volumna 28 litrov ter enoto SB13PFC25-4 prav tako v zaprti škatli, vendar je volumen 4 litre. F3 frekvenca (točka, kjer je občutljivost za 3 dB manjša od nazivne) center zvočnika je 75 Hz.

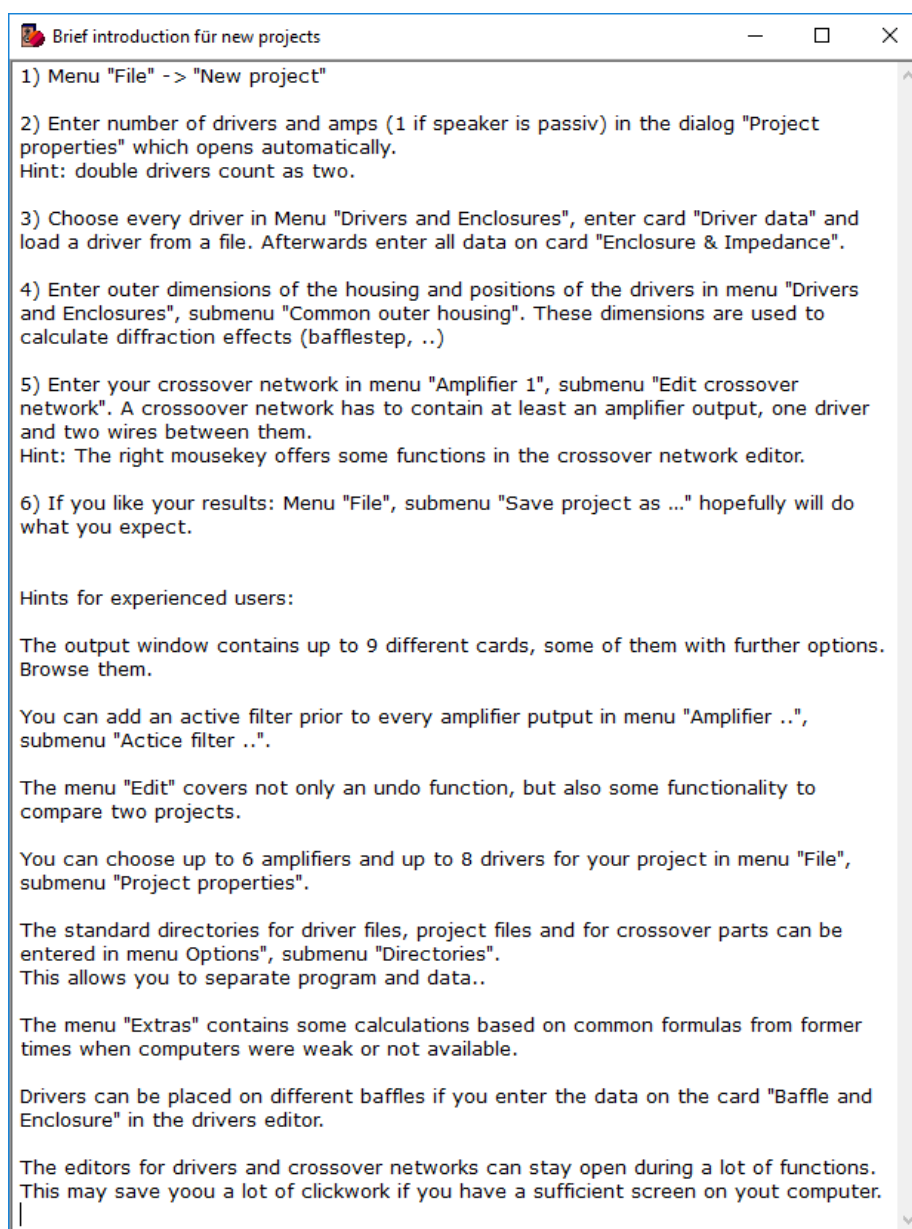


Slika 30: Tehniška risba zvočniške omarice prednjega zvočnika, narejena po simulaciji. (Vir: Lasten)

3.5 Zasnova in simulacija pasivnih kretnic

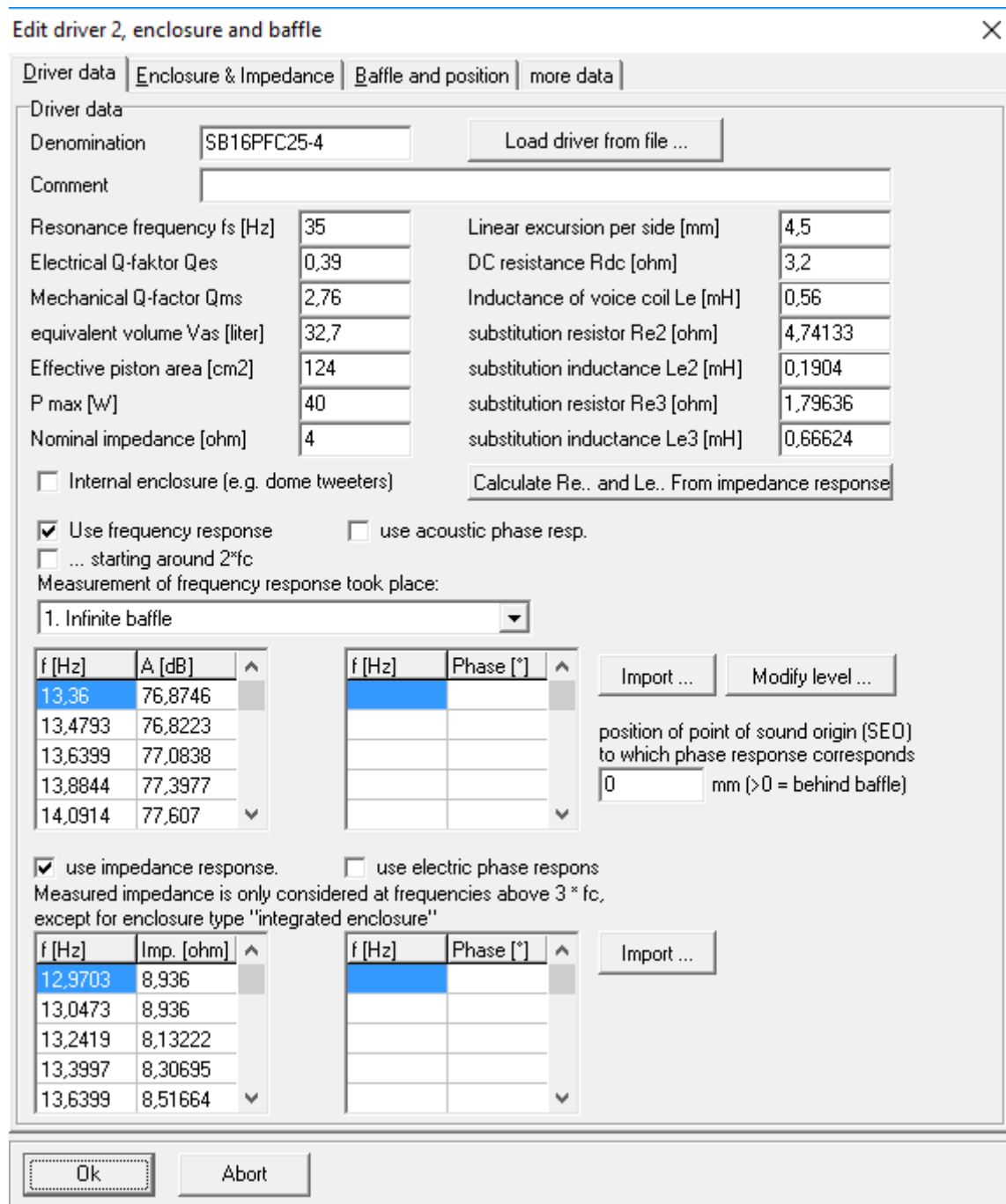
Z že znano topologijo kretnic, je bila na vrsti njihova simulacija. Ker so predvidene kretnice pasivne je potrebna natančna določitev vrednosti pasivnih elektronskih komponent, s katerimi poteka modulacija signala. Zaradi unikatnosti vsake zvočniške enote je potrebno osnovne vrednosti kretnic prirediti, saj drugače pride do neenakomernosti frekvenčnega odziva, kar spremeni tonaliteto glasbe, zvok pa postane neuravnovešen. V najhujših primerih se zaradi napačne kretnice lahko pojavijo visoke amplitude določenih frekvenc, ki za uho zvenijo moteče.

Program, s katerim si pri simulaciji kretnic pomagamo, je Boxsim. To je program, ki ga je ustvarilo nemško podjetje za izdelavo zvočniških enot Visaton. Program nudi kompletno simulacijo končanega zvočnika v danem simuliranem prostoru. Na voljo je v angleškem in nemškem jeziku. Ko program odpremo, se najprej pojavi okno za pomoč, ki nas vodi skozi proces zasnove in izdelave zvočnika.



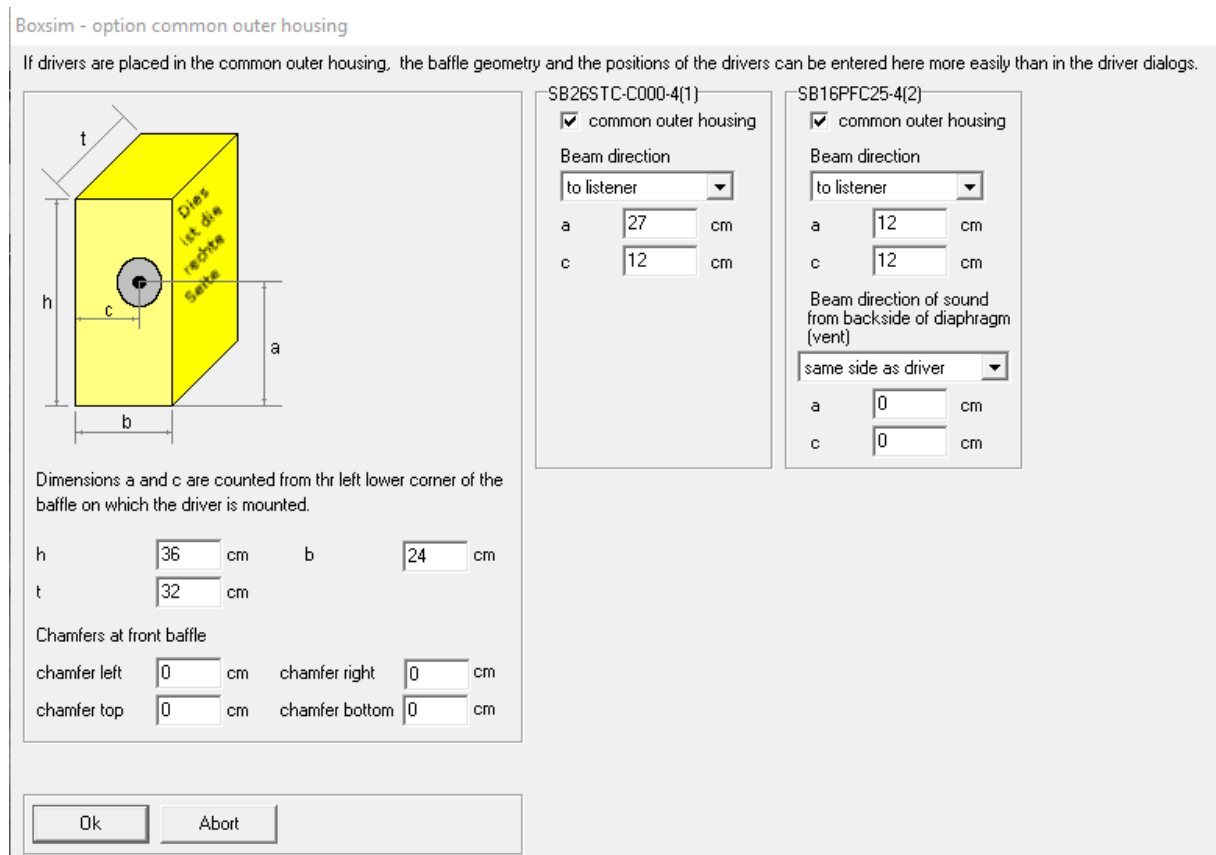
Slika 31: Pomoč pri procesu zasnove zvočnika v programu Boxsim (Vir: Lasten)

V čarovniku za ustvarjanje novega projekta najprej pridemo na stran, kamor vnesemo število končnih ojačevalnikov ter zvočniških enot. Prav tako lahko izberemo najnižjo ter najvišjo frekvenco, prikazano v projektu. Nato v zgornjem delu okna izberemo zavihek »Drivers & Enclosures« oziroma enote, pokaže pa se nam možnost izbire urejanja posamezne zvočniške enote. Ko izberemo željeno zvočniško enoto, se odpre okno, kjer se nahajajo karakteristike zvočniške enote, v naslednjem zavihku pa tudi vrsta in karakteristike ohišja, v katerem se zvočniška enota nahaja. V posamezna okna nato vnesemo T/S parametre, frekvenčne karakteristike ter impedančne karakteristike, ki smo jih dobili od proizvajalca.



Slika 32: Zavihek za urejanje parametrov zvočniške enote v programu BoxSim (Vir: Lasten)

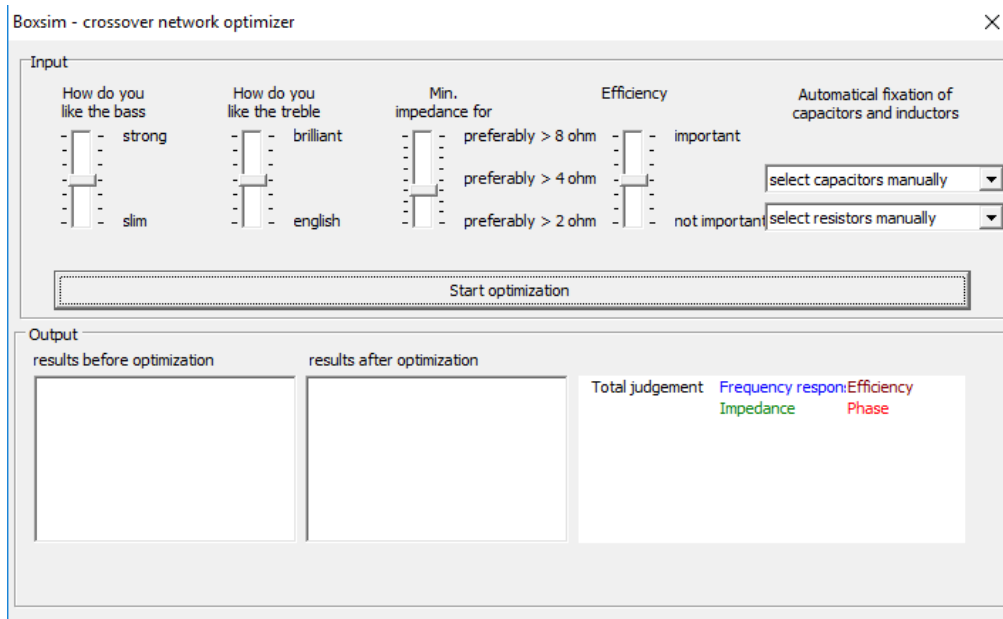
Ko vnesemo podatke za vse zvočniške enote, odpremo enak zavihek kot prej, le da tokrat izberemo možnost za urejanje dimenzij skupne zvočniške omarice. S to funkcijo urejamo pozicijo zvočniških enot na prednji stranici zvočniškega ohišja.



Slika 33: Okno za urejanje dimenzij zvočniške omarice ter pozicije zvočniških enot (Vir: Lasten)

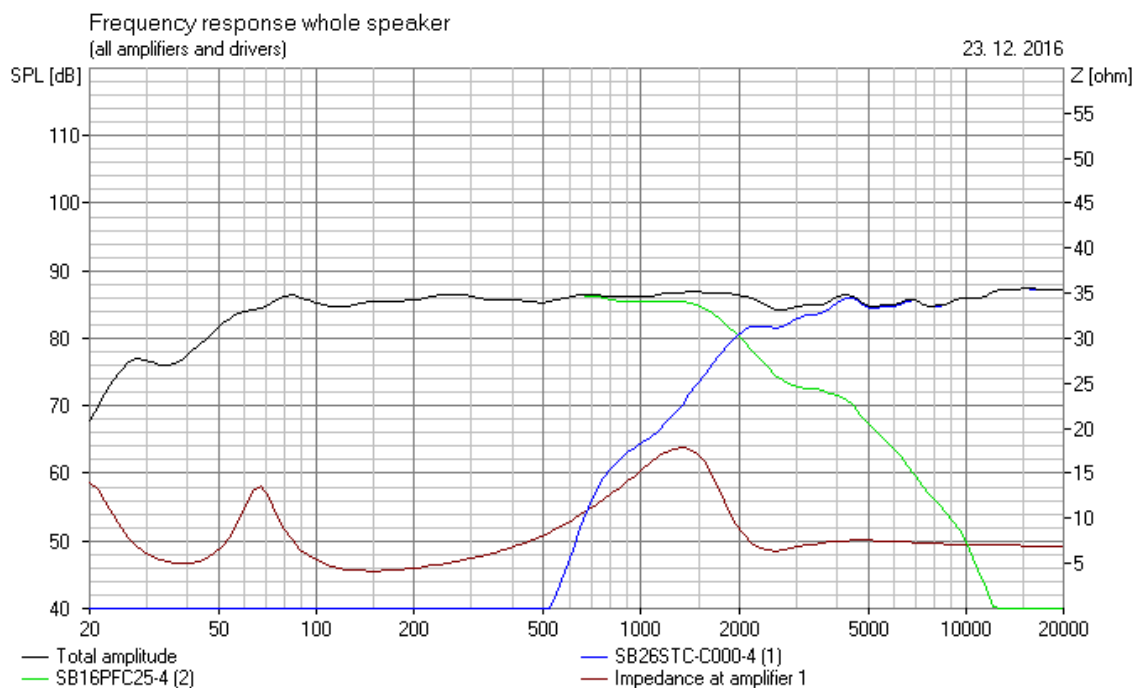
Sledi zadnji korak in sicer konstrukcija kretnice. Najprej odpremo zavihek »Amplifier« ter izberemo opcijo urejanja kretnice. Pojavi se prazno polje, kamor vstavimo pasivne komponente kretnice ter enote in jih povežemo. Pasivne komponente moramo postaviti v pravilni kombinaciji, za začetek pa si izberemo privzete vrednosti komponent, katere lahko izračunamo s pomočjo uporabe formul, jih najdemo v tabelah v priročnikih ali pa na internetu poiščemo spletno stran, katera ima ustrezen kalkulator in nam privzete vrednosti izračuna na podlagi impedance naših enot ter frekvenci križanja.

Ko okno za urejanja kretnice zapremo, se v polju v osnovnem oknu pojavi prva simulacija frekvenčnega odziva našega zvočnika. Frekvenčna karakteristika zvočnika z uporabo privzetih vrednosti komponent najpogosteje ni enakomerna, program pa nam pomaga z vgrajeno funkcijo optimizacije, ki se nahaja pod zavihkom »Extras«. Funkcija optimizacije samodejno spreminja vrednosti komponent in poskuša doseči optimalno frekvenčno ter fazno karakteristiko zvočnika. V okencu za optimizacijo izberemo svoje preference glede zvočne karakteristike (nizke ter visoke tone), željeno minimalno impedanco ter cilj učinkovitosti zvočnika. Optimizacijo lahko nato izvedemo.



Slika 34: Okno za avtomatsko optimizacijo pasivne kretnice v programu Boxsim (Vir: Lasten)

V programu nato dodamo/odvzamemo komponente pasivne kretnice oziroma posamezne dele filtra ter izvedemo optimizacijo in to ponavljamo, dokler s simulacijo zvočnika nismo zadovoljni. Pogosta dodatna komponenta je upor vezan zaporedno z visokotoncem za učinek slabljenja in upor vezan zaporedno s kondenzatorjem v nizkoprepustnem filtru nizkosrednjetonca, kateri zniža red slabljenja, vendar hkrati ohrani fazni kot.



Slika 35: Primer simulacije frekvenčne (črna) ter impedančne (rdeča) karakteristike zvočnika (Vir: Lasten)

3.6 Izbira pasivnih komponent kretnice

Pasivne kretnice za optimalno delovanje potrebujejo kvalitetne komponente. Le te sem za svojo nalogo dobil pri podjetju Jantzen Audio, ki se ukvarja s preprodajo HiFi zvočniških enot, komponent kretnice ter ostalim priborom za izdelavo zvočniških enot.

V glavnem poznamo dve vrsti tuljav in sicer z zračnim jedrom ter s feritnim jedrom. Tuljave s feritnim jedrom imajo slabost večje histereze, njihova prednost pa je dosti manjša upornost. Pogosto jih uporabljamo le v filtrih nizkotonskih zvočnikov, kjer je pomembna visoka induktivnost ter majhna upornost. V svojem projektu sem v vseh razen filtra nizkotonskih zvočnikov v center zvočniku, ki delujeta le do 200 Hz uporabil tuljave z zračnim jedrom, in sicer sta to bili seriji »Air Core Inductor« in »Iron Core with Disc Inductor« podjetja Jantzen Audio.



Slika 36: Primer tuljave z zračnim jedrom (Vir: www.jantzen-audio.com)

Kondenzatorji, ki se uporabljajo v kretnici, so bipolarni. Pogosto se v kretnicah, še posebej v cenejših uporabljajo elektrolitski kondenzatorji, vendar se s časom posušijo (elektrolitska tekočina izteče). Namesto elektrolitskih kondenzatorjev zato uporabimo polipropolenske kondenzatorje. Ti se v ponudbi Jantzen Audia nahajajo v seriji pod imenom »Cross Cap«, uporabil pa sem jih tudi v svoji nalogi.



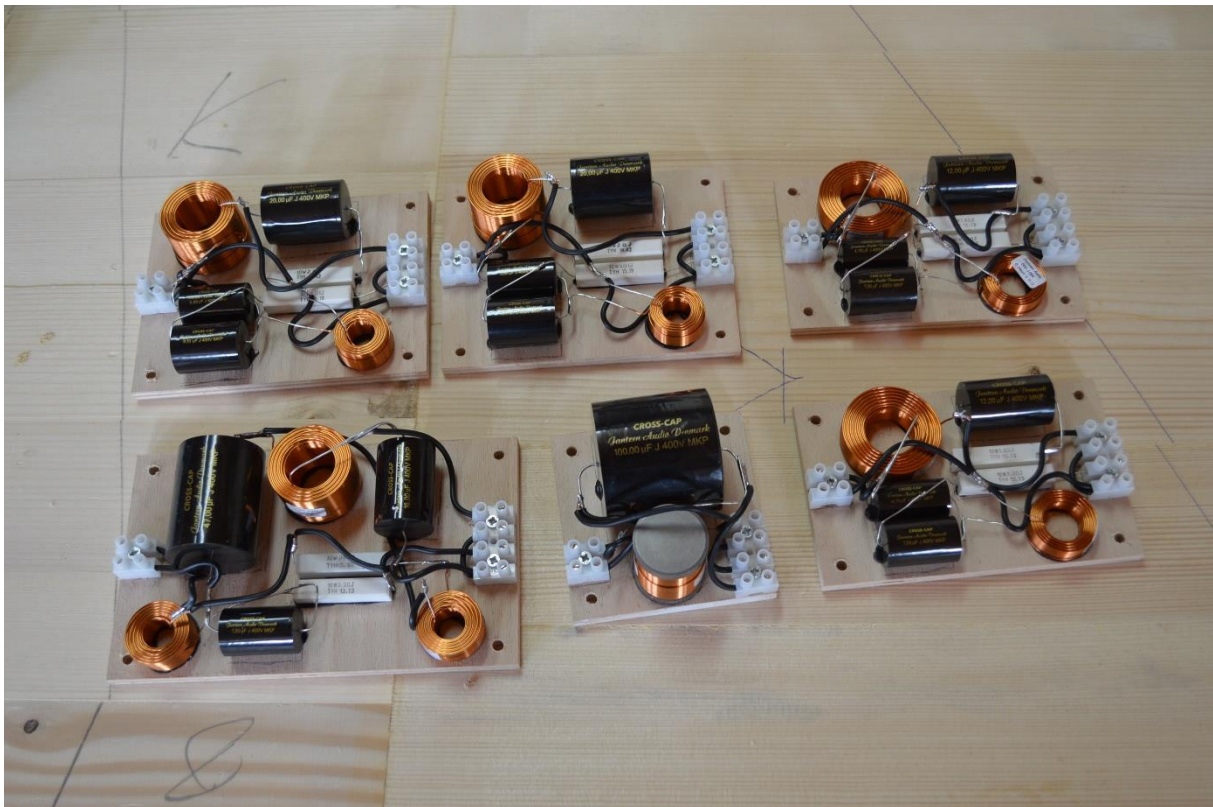
Slika 37: Bipolarni kondenzatorji serije CrossCap (Vir: www.jantzen-audio.com)

Tretja komponenta, uporabljena v kretnicah, so upori. Ker so upori precej enostavna komponenta, so njihove cene precej nizke. V svoji nalogi sem uporabil navadne 10 W keramične upore različnih vrednosti.

3.7 Izdelava zvočniških škatel, kretnic ter končna montaža

Izdelavo zvočnikov sem razdelil na 3 faze. V prvi fazi je opisana izdelava kretnic, druga faza vsebuje izdelavo zvočniških ohišij v 3 fazi pa je opisana končna sestava zvočnikov.

Izdelave kretnic sem se lotil z razrezom 8 mm vezane plošče na manjše kose, kamor bodo pritrjene komponente kretnice. Izrezal sem 6 ploščic in sicer po eno za vsak 2-sistemski zvočnik ter 2 ploščici za center zvočnik. V kotih ploščic sem izvrtal luknje, s katerimi bodo kasneje pritrjene v ohišje zvočnika. Na vsako ploščico sem nato s pomočjo silikonskega lepila pritrtil komponente v optimalni postavitvi, sponke za priključitev pa sem pritrtil s pomočjo vijakov. Komponente sem nato po vzoru električne sheme povezal med sabo s pomočjo spajkanja. Na koncu sem vse povezave še enkrat preveril, izdelava kretnic pa je bila tako končana.



Slika 38: Slika izdelanih pasivnih kretnic (Vir: Lasten)

Ohišja zvočnikov sem izdelal v mizarski delavnici pri stricu. Najprej je bilo potrebno razrezati plošče 19 mm mediapana, ki ga bomo uporabili za konstrukcijo zvočniškega ohišja. Delo je bilo opravljeno s pomočjo formatne žage. Zatem smo na CNC stroju za obdelavo lesa na prednjih stranicah izdelali luknje, v katere smo kasneje pritrdili zvočniške enote ter magnetne za pritrditev zaščitnih mrežic, prav tako pa smo naredili tudi luknje na zadnjih stranicah, kamor bodo nameščeni priključni terminali. Z ročnim nadrezkarjem so bile izdelane notranje ojačitve zvočniške omarice, prav tako pa smo z rezkarjem polmera v ploščah, ki bodo sestavljale odprtino bass-reflex, zaobljili robove. Ko so bili vsi potrebni kosi pripravljeni, sem začel s sestavo omaric. Za lepljenje sem uporabil navadno belo lepilo za les, med procesom sušenja pa so posamezne kose na mestu držale mizarske sponse. Ko so bila ohišja zlepljena je bilo na vrsti brušenje, katero je bilo najprej opravljeno s pomočjo tračnega brusilnega stroja, na koncu pa fino brušenje z ročnim ekscentričnim brusilnikom. Zvočniške omarice so tako bile pripravljene za barvanje. Prvi sloj je bil primer, ki v lesu zapre pore in omogoča barvi boljši oprijem. Za primerjem so sledili trije sloji bele barve, med vsakim nanosom pa je bilo ohišje zbrušeno.



Slika 39: Slika končanih škatel za zvočnike (Vir: Lasten)

Zadnja faza izdelave pokriva končno sestavitev zvočnikov. Najprej sem na notranje stene zvočnikov s pomočjo silikonskega lepila prilepil filc debeline 12 mm, katerega naloga je dušenje vibracij ter zvočnih valov, ki jih ustvarja zadnja stran membrane. V ohišja sem nato s pomočjo vijakov montiral kretnice, in jih napolnil z akustičnim polnilom. Na koncu je bilo potrebno le še priključiti in pritrditi zvočniške enote ter priključne terminale, izdelava pa je bila tako končana.

Zaščitne mreže so bile prav tako kot osnova za kretnice izdelane iz 8 mm vezane plošče. Najprej sem les odrezal na ustrezne mere, nato pa sem z ročnim nadrezkarjem v lesu izdelal odprtine, ki jih bo kasneje prekrivala mreža. Robove okvirja sem s pomočjo rezkarja z polmerom 4 mm zaobljil. V okvirje sem prav tako izvrtal luknje, kamor sem namestil magnetne, ki bodo služili za pritrditev na ohišje zvočnika. Na koncu sem čez okvirje napel akustično transparentno blago in ga z lepilom prilepil.



Slika 40: Slika končanega prednjega para zvočnikov (Vir: Lasten)

3.9 Kosovnica ter stroški

Tabela 3: Kosovnica uporabljenih izdelkov/materialov ter stroški. (Vir: Lasten)

Artikel	Opombe	Količina	Cena (€)
Mediapan 19 mm		3,04	44,66
Vezana plošča 8 mm	bukev, vzdolžni rez	0,44	8,87
Visokotonec SB19ST-C000-4		2	36
Visokotonec SB26STC-C000-4		2	53,68
Visokotonec SB26STCN-C000-4		1	29,28
Nizko-srednjetonec SB13PFC25-4		3	73,2
Nizko-srednjetonec SB16PFC25-4		4	101,48
Upor 1,8 Ω 10 W 5 %		2	1,28
Upor 2 Ω 10 W 5 %		2	1,28
Upor 3,3 Ω 10 W 5 %		3	1,92
Upor 5,1 Ω 10 W 5 %		2	1,28
Upor 36 Ω 10 W 5 %		1	0,64
Kondenzator 4,7 uF 400 V 5 %		2	4,82
Kondenzator 6,8 uF 400 V 5 %		2	6,22
Kondenzator 7,5 uF 400 V 5 %		3	9,78
Kondenzator 9,1 uF 400 V 5 %		2	6,88
Kondenzator 12 uF 400 V 5 %		2	7,82
Kondenzator 16 uF 400 V 5 %		1	4,24
Kondenzator 20 uF 400 V 5 %		2	9,58
Kondenzator 47 uF 400 V 5 %		1	11,27
Kondenzator 100 uF 400 V 5 %		1	19,07
Tuljava 0,24 mH 0,31 Ω 0,8 mm 3 %		2	3,74
Tuljava 0,4 mH 0,43 Ω 0,8 mm 3 %		2	4,54
Tuljava 0,45 mH 0,46 Ω 0,8 mm 3 %		1	2,43
Tuljava 0,5 mH 0,49 Ω 0,8 mm 3 %		1	2,48
Tuljava 0,9 mH 0,46 Ω 1 mm 3 %		2	9,1
Tuljava 1,1 mH 0,57 Ω 1 mm 3 %		1	5,38
Tuljava 1,25 mH 0,61 Ω 1 mm 3 %		2	11,46
Tuljava 4,8 mH 0,42 Ω 1 mm 3 %		1	7,36
Priključni terminal		5	14,8
Poliesterska pena	20L vreča	3	23,13
Filc 8mm	1m ²	1	12,61

Akustično transparentno blago	črna barva, 1m ²	1	19,73
Magnet 12 x 3 mm	neodimski	40	5,6
Lesni vložek M4 x 10 mm		92	5,52
Vijak imbus M4x20mm		92	1,84
Kabelski čevelj		34	1,7
Vodnik 1.5mm ²		8	2,4
Vrstne sponke	12 sponk v vrstici	3	1,5
Silikonsko lepilo	navadno	1	4,21
Lepilo za les	mekol express	1	3,23
Primer/barva	2-komponentni, bela barva	1	20
SKUPAJ			596,01

Celoten strošek je bil precej manjši, saj sta me podprli in projekt sponzorirali podjetji SB Acoustics, ki je podarilo zvočniške enote ter Jantzen audio, ki je podarilo komponente kretnice ter nekaj periferije, za kar sem jim izredno hvaležen. Celoten strošek projekta je bil tako 99,53 eur.

4 TESTIRANJE TER MERITVE ZVOČNIKOV

Meritve zvočnikov so namenjene ugotavljanju lastnosti zvočnikov, prav tako pa lahko na podlagi meritev določimo njihovo kakovost. To je še posebej pomembno, saj imajo zvočniki od vseh komponent sistema reprodukcije zvoka največja popačenja. Meritve zvočnikov se lahko izvajajo na več načinov, na primer v gluhi komori, v polprostoru, v dani sobi ter meritve od blizu, vsaka od teh meritev pa danemu zvočniku poda svoje karakteristike. Najpogosteje zvočnike izmerimo v gluhi komori.

Tipične meritve zvočnikov so tako:

- Električna impedanca
- Občutljivost na osi (velikost amplitude, ki jo dosežemo z napetostjo 2,83 V na 1m v dBA)
- Impulzni odziv
- Fazni zamik med enotami
- Meritev akustičnega popačenja
- Meritev maksimalne električne moči zvočnika
- Meritve maksimalne amplitude zvočnika

Meritve zvočnikov pogosto niso povezane z dejansko kvaliteto percepcije zvoka. Frekvenčni odziv zvočnika nam torej pove le, če je zvočnik tonalno uravnan, impendančna karakteristika je zahtevnost električnega bremena zvočnika za ojačevalnik in tako naprej. Na kvaliteto zvoka prav tako vpliva kvaliteta posnete glasbe ter kvaliteta komponent za ojačanje signala. Meritve zvočnikov so tako le smernice, s katerimi lahko zvočnike grobo ocenimo.

Nekaj primerov lastnosti zvočnikov, ki jih ne moremo izmeriti, oziroma so stvar percepcije, so na primer:

- natančnost reprodukcije oziroma kvaliteta reproducirane glasbe (ali glasba zveni, kot da bi bila izvajana v živo);
- čistost, distorzija (ali zvočnik zveni dosti bolj popačeno pri višji glasnosti);
- natančnost stereo zvoka (sofazni signal na zvočnikih slišimo kot zvok, ki nastaja med zvočnikoma);
- globina ter širina zvoka, natančnost pozicije posameznih inštrumentov;
- dinamika zvoka (zmožnost slišanja manjših sprememb v glasbi med glasnim predvajanjem).

(Povzeto po članku na spletni strani: <http://audiojudgement.com/measure-speaker-frequency-response/>)

4.1 Gluha komora (2π oz. 360°)

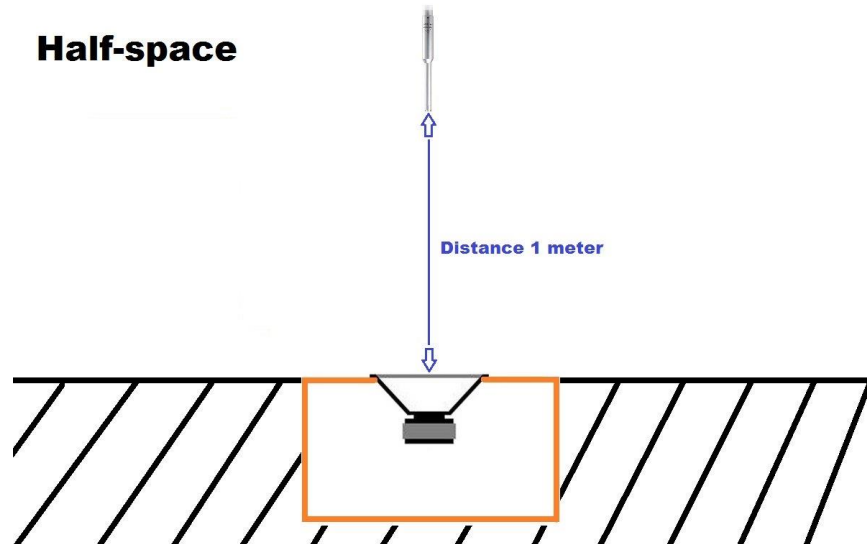
Izvajanje meritev v gluhi komori je primarni način ugotavljanja lastnosti danega zvočnika. To je prostor, ki ima akustično transparentna tla, stene pa so obdane z materialom, ki zvočnih valov ne odbija. Zvočnik je postavljen v sredino sobe, merilni mikrofonski pa se nahaja 1m pred zvočnikom. Za natančno meritev nizkih tonov potrebujemo zelo veliko sobo ter akustično absorpcijske kline. Večina gluhih komor zato ni narejena za natančne meritve frekvenc pod 200 Hz.



Slika 41: Izgled gluhe komore znotraj (Vir: www.google.com)

4.2 Polprostor (Half-space oz. π oz. 180°)

Meritev v polprostoru si najlažje predstavljamo z zakopanjem zvočnika v zemljo tako, da je njegova prednja stranica ravna s tlemi in obrnjena navzgor. Pri nižjih frekvencah se pojavi interferenca s tlemi in se ojačajo, efekt pa izgine, ko se s frekvenco pomikamo navzgor. Meritve v polprostoru so tako precejšnji približek obnašanju zvočnika ter zvoku v dejanskem prostoru, ko se nahajajo ob steni.



Slika 42: Poenostavljena shema meritve na oddaljenosti 1m v polprostoru (Vir: <http://audiojudgement.com/measure-speaker-frequency-response/>)

4.3 Meritev v prostoru

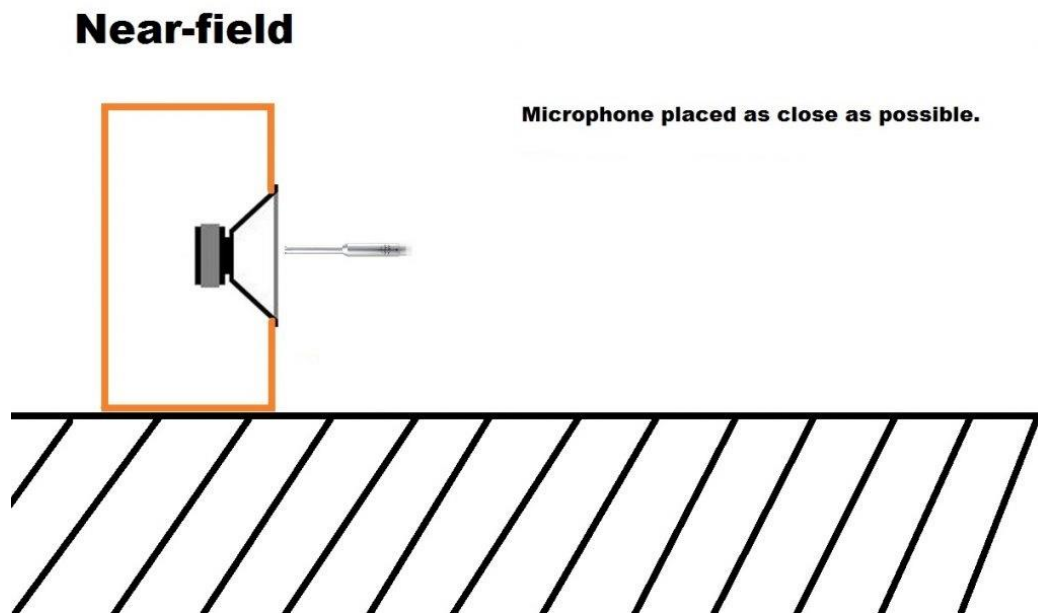
V področju nizkih frekvenc večina prostorov resonira pri frekvencah, katerih polovica valovne dolžine je enaka dolžini sobe. Za primer je prva resonančna frekvenca 6 m dolge sobe je tako 26 Hz. Prav tako vsakršna refleksija, razpršitev ter vpoj zvoka spremenijo našo percepcijo prvotnega zvoka, ki potuje do nas v ravni liniji od zvočnika. Meritve v prostoru so tako le situacijske, ko želimo prilagoditev frekvenčnega odziva zvočnika v sobi.



Slika 43: Primer meritve zvočnika v samem prostoru (Vir: www.troelsgravesen.dk)

4.4 Meritev zvočnikov od blizu (ang. nearfield)

Bližnje meritve zvočnikov se izvajajo na razdalji največ nekaj cm in so najprimernejše, ko želimo izmeriti nizke frekvence, od okoli 200 Hz navzdol. Zvočniki, ki jih merimo na ta način, največkrat uporabljajo topologijo kompresije oziroma so zaprti. Bass-reflex zvočnike na tak način težko izmerimo, saj večina zvoka v območju resonančne frekvence škatle pride izven bass-reflex odprtine. Tako moramo posebej izmeriti odziv membrane ter bass-reflex odprtine ter ju pozneje združiti, da pridemo do natančnega rezultata.



Slika 44: Poenostavljen prikaz bližinske meritve zvočnika (Vir: <http://audiojudgement.com/measure-speaker-frequency-response/>)

4.5 Programska oprema REW (roomeqwizard)

REW je brezplačna programska oprema za opravljanje meritev zvočnikov, prav tako pa nam omogoča optimizacijo akustike prostora, v katerem poslušamo glasbo. Vključuje orodja za generiranje avdio signala, meritve glasnosti (SPL) ter impedance, frekvence ter impulznega odziva, akustičnega popačenja ter še nekaj ostalih funkcij.

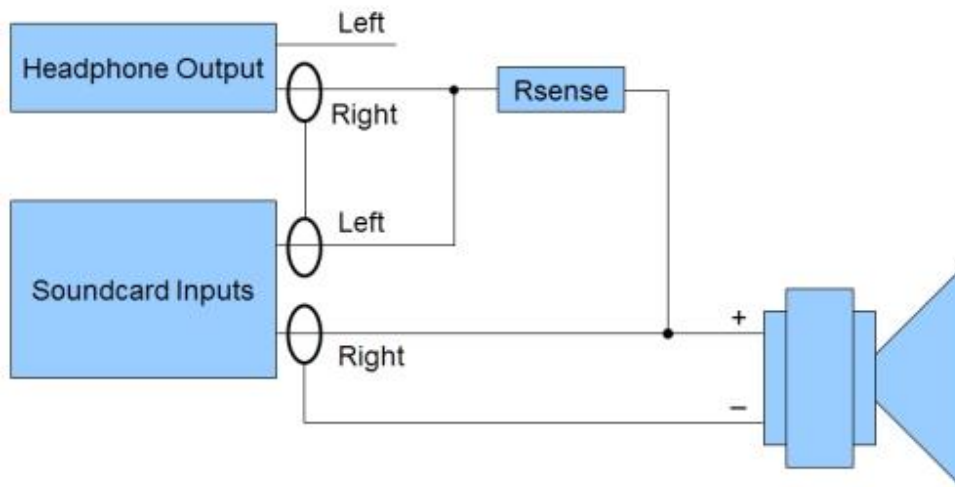
Program REW meritve izvaja z uporabo sinusnega signala, katerega frekvenca logaritmično narašča. Za opravljanje meritev potrebujemo tudi vir zvoka, v mojem primeru zvočnike, ki sem jih izdelal. Program preko izhoda na zvočni kartici pošlje signal do ojačevalnika, ta pa ojačan signal v zvočnike. S pomočjo mikrofona program nato zazna akustični odziv zvočnika ter shrani podatke, ki jih po končanem procesu merjenja avtomatsko obdela in analizira.

Poleg akustičnih meritev se program REW lahko uporablja tudi za opravljanje meritev impedančnih karakteristik. Impedanco izmerimo z uporabo tokovnega upora, kateri je z bremenom, ki je v našem primeru zvočnik vezan v zaporedni vezavi. Na uporu se pojavi padec napetosti katerega lahko izmerimo, hkrati pa merimo tudi vhodno napetost. Na pogladi padca napetosti na uporu in njegove upornosti lahko izračunamo tok. Velikost vhodne napetosti nato delimo z velikostjo toka in dobimo upornosti impedanco celotnega vezja, tej pa potem odštejemo upornost bremena. Rezultat je velikost impedance bremena.

(Povzeto po spletni strani <https://www.roomeqwizard.com/>)

4.6 Oprema ter postopek meritve impedančnih karakteristik

Program REW ima vgrajeno funkcijo meritve impedance s pomočjo zvočne kartice računalnika.



Slika 45: Shema vezave pri merjenju impedance, generator signala je v tem primeru desni kanal stereo izhoda, na upor R_{sense} pa merimo padec napetosti (Vir: <https://www.roomeqwizard.com/>)

Shema vezave pri merjenju impedance, generator signala je v tem primeru desni kanal stereo izhoda, na upor R_{sense} pa merimo padec napetosti.

Upor R_{sense} , je namenjen merjenju električnega toka skozi zvočnik. S pomočjo te vrednosti nato izračunamo impedanco zvočnika po spodnji formuli.

$$Z = \frac{R_{sense} * V_{right}}{V_{left} - V_{right}}$$

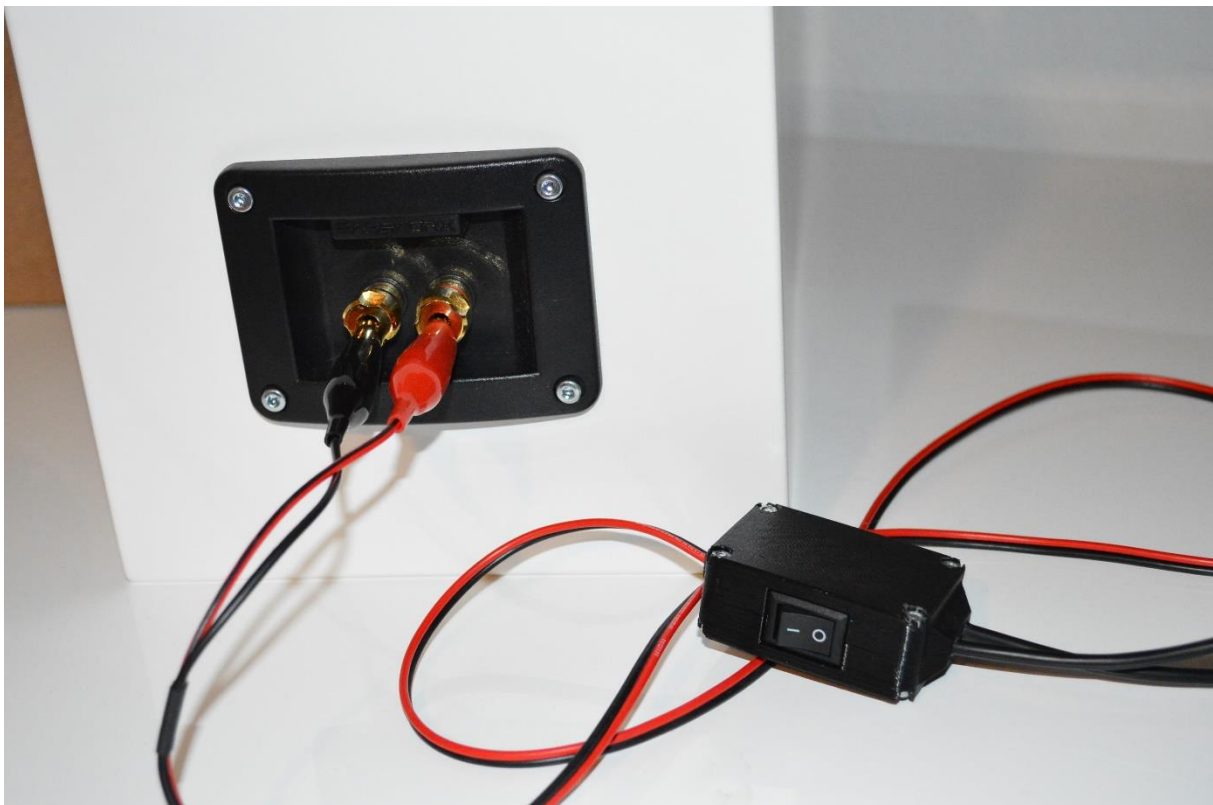


Slika 46: Pripomoček, ki sem ga naredil po zgornji shemi. Stikalo je vezano vzporedno z merilnim uporom in služi kalibraciji (Vir: Lasten)

Sama meritev impedance je bila precej enostavna. Merilni pripomoček sem najprej priklopil na zvočno kartico ter zagnal program REW. V programu sem nato v preferencah nastavlil izhodno napravo na stereo izhod, vhodno napravo pa na line in. Za tem sem odprl funkcijo »Measure« za izvajanje nove meritve, ki jo najdemo levo zgoraj. Izbral sem zavihek »Impedance«, ki nam omogoči meritev impedance zvočnika. Program nas opozori, da je najprej potrebna kalibracija merilne priprave. V polje Rsense sem vnesel vrednost $0\ \Omega$ ter z stikalom na pripravi kratko sklenil merilni upor. Za tem lahko nastavimo merilne parametre, kot so začetna ter končna frekvenca, amplituda, resolucija ter število ponovitev. Na koncu sem s pritiskom »Start measuring« izvedel kalibracijo. Med kalibracijo na izhod pripomočka (krokodilčke) ne smemo priključiti ničesar.

Po kalibraciji se v glavnem oknu prikaže graf impedance v odvisnosti od frekvence, ki je bil v mojem primeru zaradi kratkostično sklenjenega upora skozi celoten frekvenčni spekter $0\ \Omega$.

Za uspešno kalibracijo je bilo potrebno izmeriti impedančne karakteristike vsakega posameznega zvočnika. Stikalo na merilnem pripomočku sem razklenil, ter krokodilčka povezal na ustrezni priključni sponki na terminalu zvočnika. V programu REW sem odprl čarovnik za novo meritev, ter vnesel vrednost $100\ \Omega$ v polje vrednosti merilnega upora (Rsense), začetno frekvenco na 20 Hz, končno pa na 20 kHz. To sem ponovil za vsak zvočnik.



Slika 47: Priklop pripomočka na zvočnik med meritvijo (Vir: Lasten)

4.7 Oprema za opravljanje akustičnih meritev

Akustične meritve, ki sem jih opravil na zvočnikih, so bile izvedene v studiu ERŠ ŠCV z merilnim mikrofonom MiniDSP UMIK-1 ter računalniško programsko opremo REW (roomeqwizard). Merilni mikrofoni sem priklopil na računalnik, na katerem je bila naložena programska oprema, računalnik pa je bil povezan z ojačevalnikom zvočnikov.

UMIK-1 je omnidirekcijski USB merilni mikrofoni s frekvenčnimi odstopanjem 1 dB v območju od 20 Hz do 20 kHz. Njegov primarni namen je uporaba v akustičnih meritvah. Ob nakupu mikrofona zraven prejmemo serijsko številko, s katero nato a spletu pridobimo kalibracijsko datoteko našega mikrofona. Mikrofoni za svoje delovanje ne potrebuje posebnih gonilnikov na računalniku.

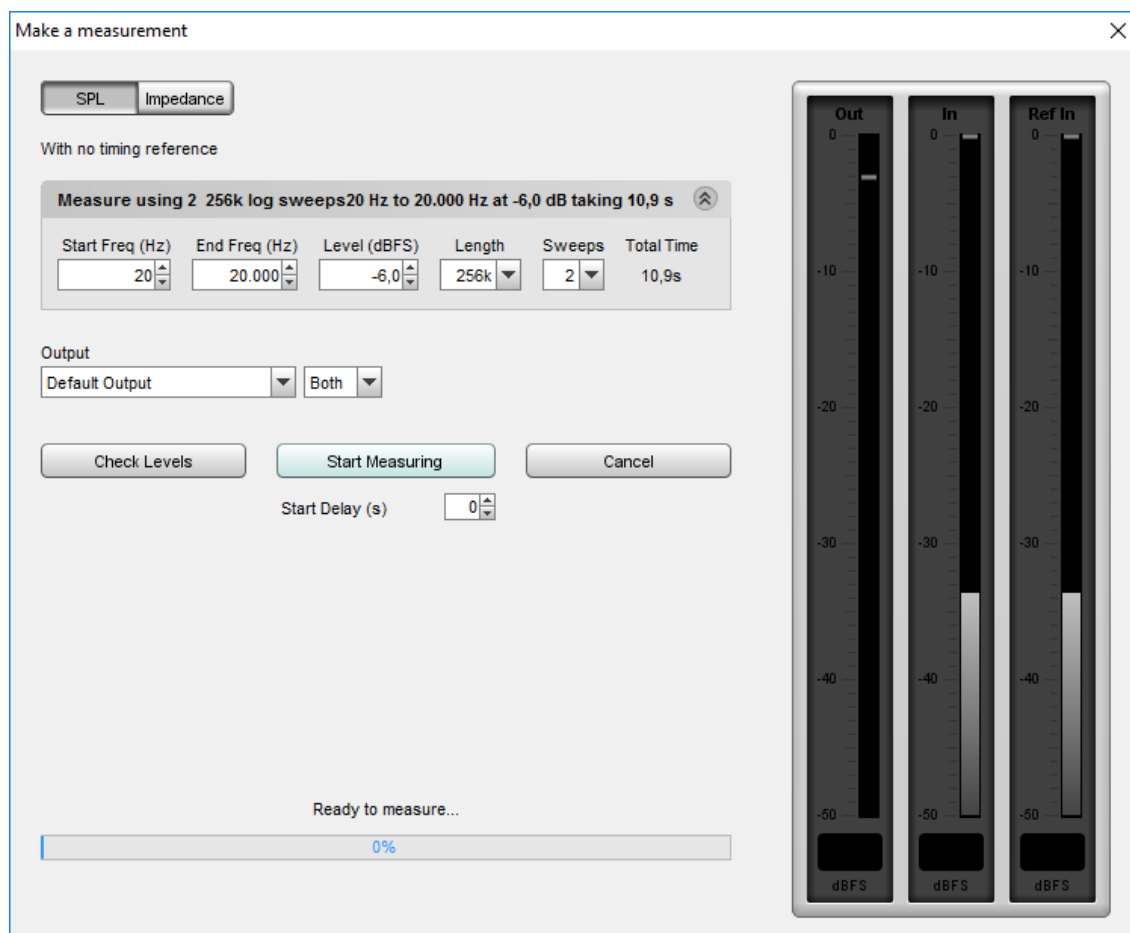


Slika 48: Merilni mikrofoni UMIK-1 (Vir: Lasten)

4.7 Postopek akustične meritve zvočnikov

Kot že prej omenjeno sem vse meritve izvedel v studiu ERŠ ŠCV. Na sredino sobe sem najprej postavil stojalo, na katerega sem postavil zvočnike med opravljanjem meritev, 1m predenj na enako višino pa sem postavil merilni mikrofona. Mikrofona je bil preko USB povezan na računalnik, na katerem je bila naložena programska oprema REW. Na avdio izhod računalnika sem nato preko kabla priklopal ojačevalnik. Zvočniki so med meritvijo stali na stojalih, okrog njih pa sem postavil plošče z akustično peno za preprečitve odbojev zvoka. Meritve sem opravil na referenčni osi (0° oz. naravnost pred zvočnikom) ter na osi 45° . S tem sem ugotovil, kakšna je karakteristika, ko je zvočnik obrnjen 45° stran od nas. Izhodna napetost ojačevalnika je bila konstantno 2.83 V.

Za izvajanje meritev sem najprej odprl program REW ter v njem izbral merjenje z merilnim mikrofonom UMIK-1, ki je priklopljen na računalnik. V zgornjem levem kotu glavnega okna sem izbral funkcijo Measure, odprlo pa se je novo okno z nastavitvijo merilnih parametrov. Izbrano je okno »SPL«, kar pomeni, da izvajamo meritve frekvenčnih karakteristik. V okno vnesemo željeno začetno ter končno frekvenco, nivo amplitude, dolžino ter število ponovitev cikla. Nato s funkcijo »Check levels« preverimo, da je amplituda zvočnikov zadostna ter pritisnemo »Start measuring« in opravimo meritve.



Slika 49: Čarovnik za opravljanje nove meritve (Vir: Lasten)



Slika 50: Postavitev zvočnika ter mikrofona med meritvijo. (Vir: Lasten)

Po opravljeni meritvi program analizira podatke, ki jih je pridobil preko mikrofona, ter jih kot graf prikaže v prvem oknu. Nad grafom s tipkami izbiramo prikaz različnih vrednosti meritev, in sicer:

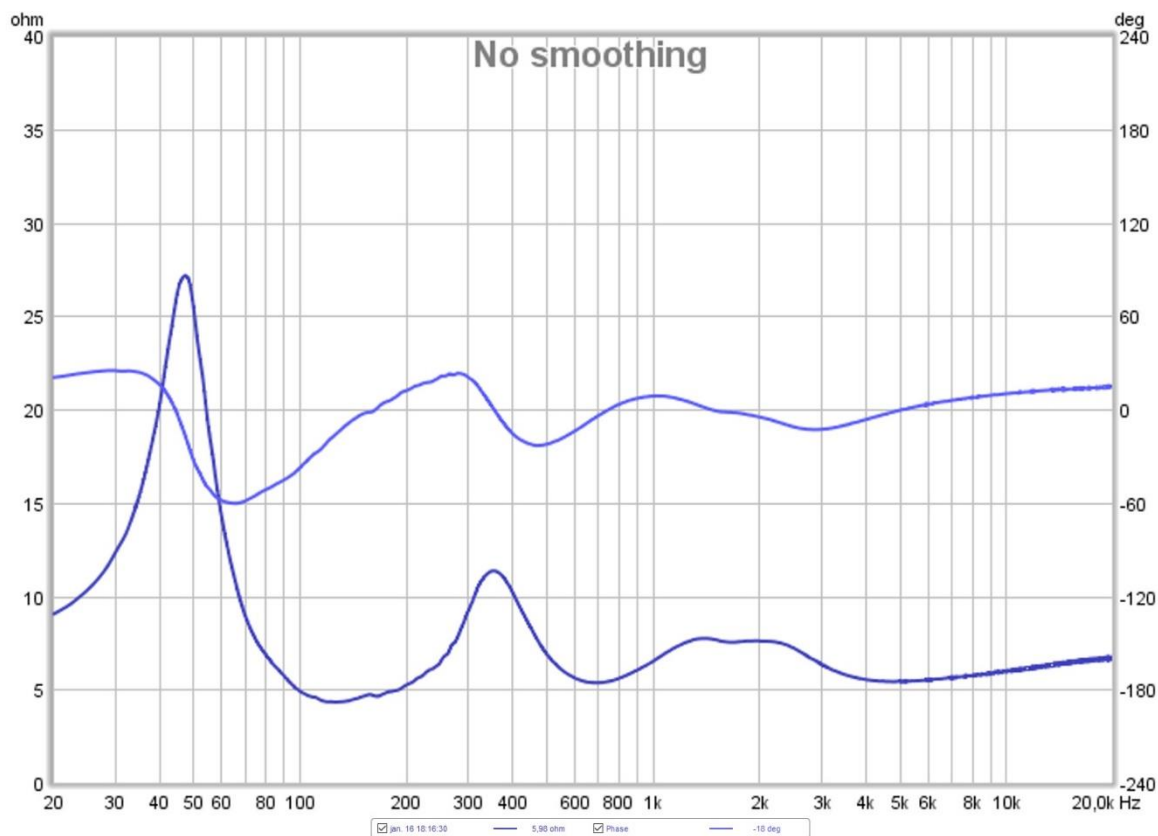
- prikaz akustične moči in faze v odvisnosti od frekvence posamezne meritve,
- prikaz akustične moči vseh naloženih meritev,
- akustična popačenja,
- impulzni odziv,
- zamik nastanka akustičnega signala »Group delay«.

4.8 Pregled in analiza meritev

Ko so bile meritve impedančnih ter akustičnih karakteristik končane, jih je bilo potrebno pregledati ter analizirati, kar sem opravil z vgrajenimi funkcijami programa REW.

V program sem najprej naložil shranjene impedančne karakteristike posameznega zvočnika. V glavnem oknu se prikaže graf impedance ter faze impedance v odvisnosti od frekvence. S pomočjo funkcije »Graph«, ki jo najdemo v orodni vrstici, graf najprej zgladimo. S tem sem se znebil manjših napak, ki običajno nastanejo med procesom merjenja. Glajenje, ki sem ga uporabil za vse grafe impedančnih karakteristik je 1/24 oktave.

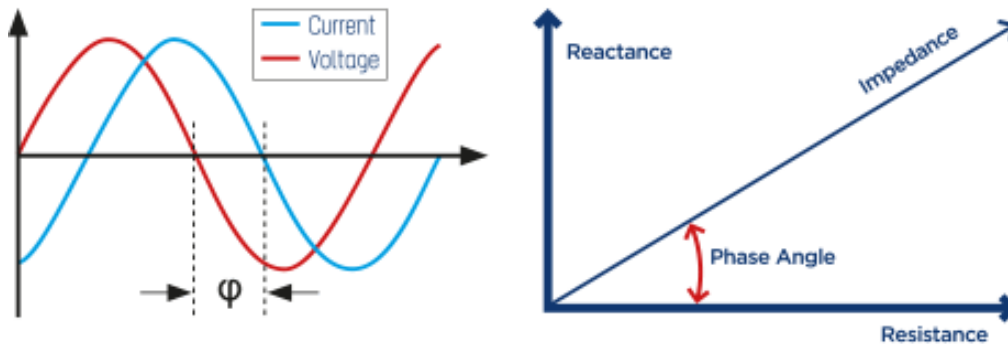
Z grafa impedančne karakteristike zvočnika sem nato razbral, pri kateri frekvenci je impedanca najnižja. Za center zvočnik je bila najnižja vrednost 4,3 Ω pri frekvenci 130 Hz, prednja zvočnika imata najnižjo impedanco 4,5 Ω pri 160 Hz zadnji par pa 4,3 Ω pri frekvenci 220 Hz. Vrhovi v impedančni karakteristiki se pojavijo pri resonančnih frekvencah zvočniških enot, zvočniških škatel ali pri frekvenci križanja in imajo vrednosti do okoli 30 Ω .



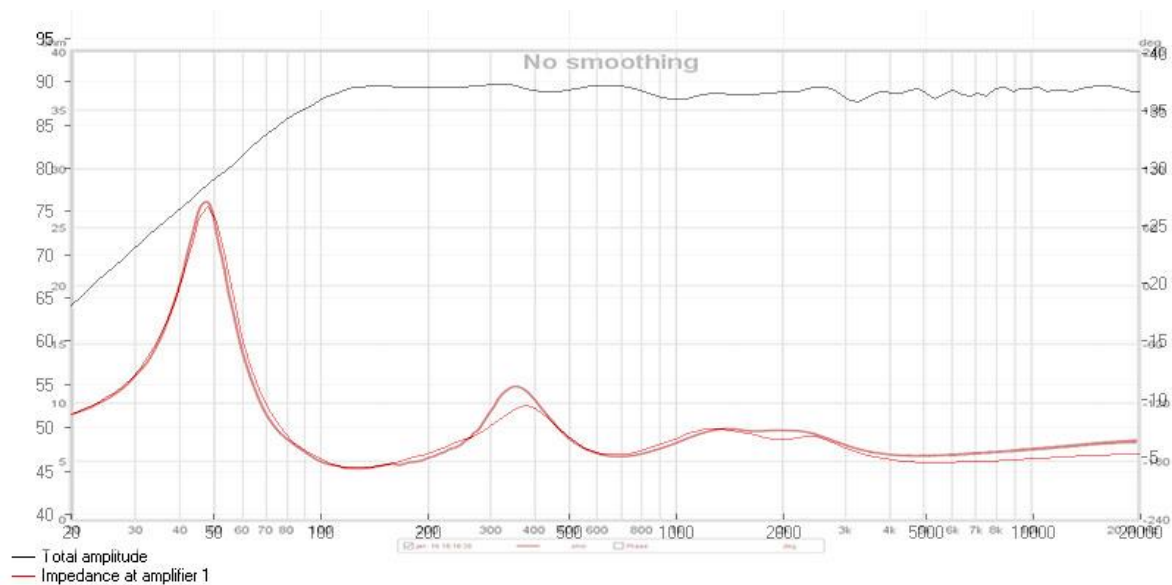
Slika 51: Graf impedančne karakteristike ter faznega kota impedance center zvočnika v odvisnosti od frekvence (Vir: Lasten)

Na sliki je impedančna karakteristika center zvočnika v odvisnosti od frekvence. Modra krivulja je krivulja impedance, vijolična pa faze impedance.

Naslednja krivulja na grafu je fazni kot impedance. Ta nam pove, koliko električni tok zaostaja ali prehiteva napetost. Če se vezje obnaša induktivno in tok sledi napetosti bo kot faze pozitiven, če pa je vezje kapacitivno, bo napetost sledila toku in faza bo negativna. Fazni kot pove, kako velika bo obremenitev ojačevalnika moči, pri faznem kotu 45° je izguba na tranzistorjih ojačevalnika največja in sicer 2-krat večja kot pri faznem kotu 0° , ki predstavlja idealno breme oziroma upor.



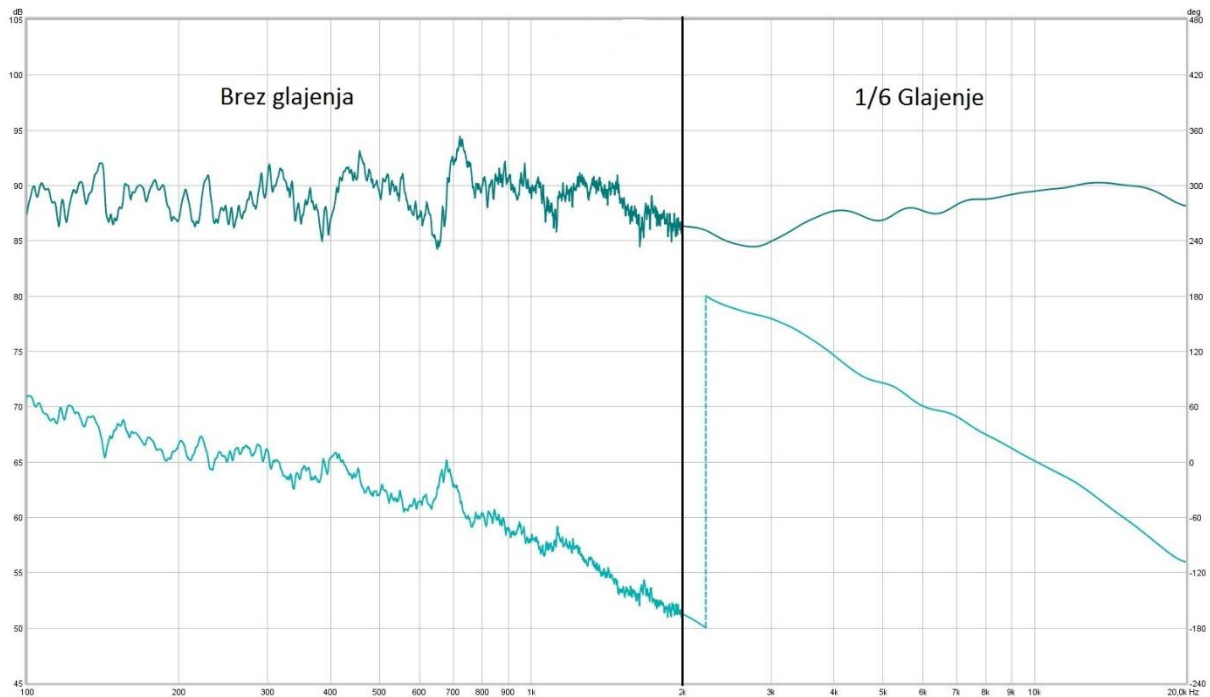
Slika 52: Preprost prikaz faznega zamika (Vir: www.google.com)



Slika 53: Primerjava simulirane ter izmerjene impedančne karakteristike center zvočnika (Vir: Lasten)

Zgoraj je primerjava impedance v simulaciji ter impedanca meritve zvočnika. Svetlo rdeča krivulja predstavlja simulacijo, temno rdeča pa izmerjeno impedanco. Večja razlika se pojavi le med frekvencama 300 Hz in 400 Hz, kjer je izmerjena impedanca višja za okoli 2Ω ter nad 10 kHz, kjer je odstopanje približno 1Ω .

Za impedančnimi karakteristikami sem pregledal akustične karakteristike zvočnikov. V programu sem odprl meritve, ki sem jih opravil v šoli. Zaradi učinka sobe so bili vsi signali pod frekvenco okoli 100 Hz nepravilni in posledično neuporabni, zato sem jih odstranil. Ostalo mi je uporabno frekvenčno področje od 100 Hz do 20 kHz. Grafe sem z uporabo vgrajenega orodja podobno kot grafe impedančne karakteristike gladil, in sicer 1/6 na oktavo. Glajenje mi je omogočilo dosti boljšo preglednost grafa, saj sem se znebil nepregledne žgaste krivulje.



Slika 54: Primerjava grafa pred in po glajenju (Vir: Lasten)

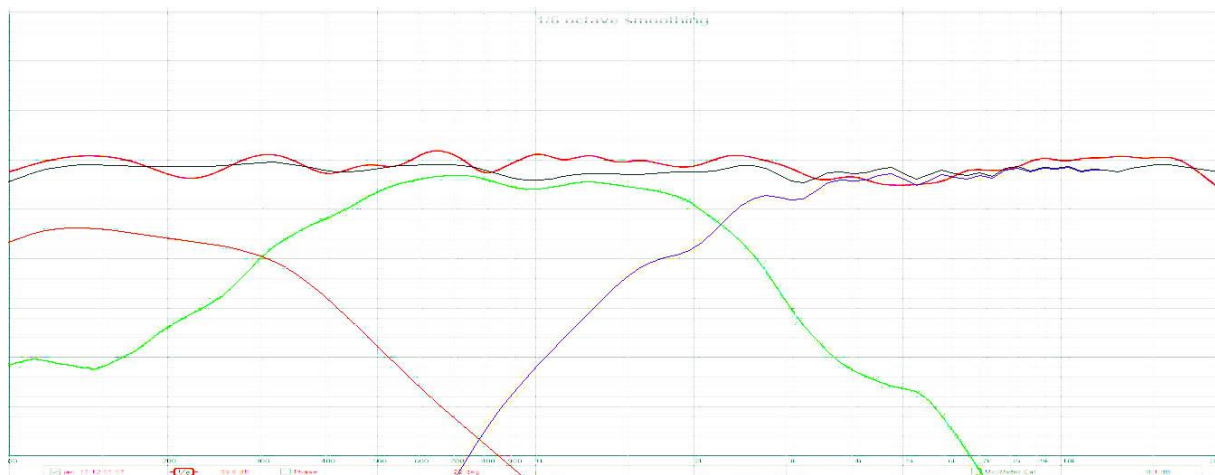
V programu sem nato v kontrolnem oknu, ki ga najdemo desno zgoraj, izvedel funkcijo »Estimate IR delay«, s katero omejimo časovno okno signala oziroma se znebimo vpliva zvočnih odbojev, ki do mikrofona pridejo po prihodu direktnega avdio signala, kar je bilo v mojem primeru oddaljenosti mikrofona 1 m okoli 20 ms. S tem sem popravil napake v frekvenčni ter fazni karakteristiki.

V meritvah sem se osredotočil na naslednje grafe:

- Graf amplitude v odvisnosti od frekvence (občutljivost)
- Graf faze amplitude v odvisnosti od frekvence
- Graf popačenja (distorzije)

Graf amplitude v odvisnosti od frekvence nam pove, kakšno jakost ima akustični signal glede na velikost oziroma jakost vhodnega signala. Kot sem povedal že prej meritev frekvenčnega odziva poteka pri konstantni napetosti 2.83 V, kar je pri upornosti 8Ω 1 W moči. Pri zasnovi in izdelavi zvočnikov želimo doseči čimbolj enakomerno frekvenčno karakteristiko.

Graf izmerjene frekvenčne karakteristike sem v programu s funkcijo »Capture« slikal in shranil kot .jpeg datoteko. Prav tako sem kot sliko shranil simulacijo frekvenčnega odziva v programu Boxsim. Obe sliki sem nato odprl v programu Photoshop ter vsako postavil v svojo plast. Prosojnost druge plasti oziroma izmerjenega frekvenčnega odziva sem nato nastavil na 50 %. Sliki sem nato uskladil po frekvenčni osi ter po osi amplitude ter končno sliko shranil.



Slika 55: Primerjava med simulirano ter izmerjeno frekvenčno karakteristiko (Vir: Lasten)

Na sliki je prikazana primerjava med grafoma. Črna linija prikazuje simulirano karakteristiko frekvenčnega odziva, oranžna, zelena in vijolična krivulja pa so simulirani odzivi posameznih zvočniških enot. Rdeča linija je izmerjena karakteristika zvočnika. Izmerjena karakteristika frekvenčnega odziva je vidno podobna simulirani frekvenčni karakteristiki, frekvenčni odziv v celotnem območju pa se nahaja v področju od 88 dB do 92 dB, kar je razlika amplitude 4 dB.

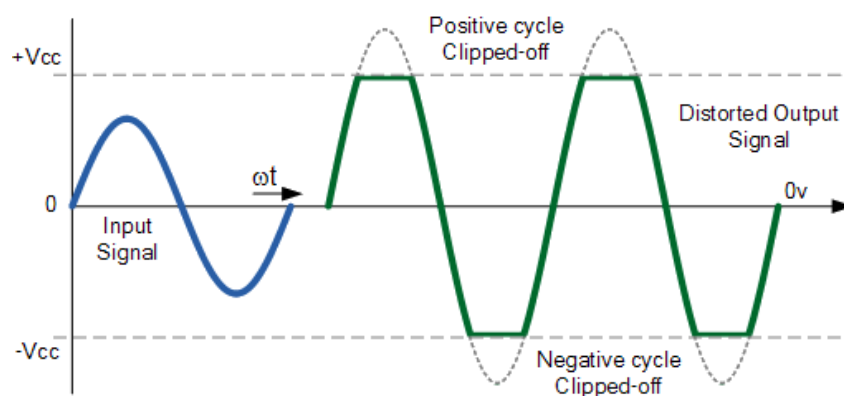
Simulacija karakteristike faze frekvenčnega odziva pokaže fazo posamezne zvočniške enote in imamo 3 različne karakteristike. Pri meritvi zvočnika je faza frekvenčne karakteristike skupna. Primerjava s prekrivanjem grafov je bila zelo težka, zato sem za primerjavo vzel vrednosti pri določenih frekvencah simulacij, kjer je aktivna določena zvočniška enota, ter jo primerjal z vrednostjo simulacije pri enaki frekvenci. Rezultate primerjave faze frekvenčne karakteristike sem navedel v spodnji tabeli.

Tabela 4: Primerjava med simulirano ter izmerjeno vrednostjo faznega kota, ter odstopanje. (Vir: Lasten)

Frekvenca	100 Hz	400 Hz	2 kHz	8 kHz	20 kHz
Fazni kot simulacije (°)	-130	40	174	-4	-73
Izmerjen fazni kot (°)	-170	39	170	10	-106
Odstopanje (°)	-40	-1	-4	14	-33

Kot je razvidno iz tabele je odstopanje faze pri nizkih ter visokih tonih precej večje od simulacije, faza signala srednjih tonov od približno 400 Hz do 2 kHz pa se ujema s simulacijo. Razlog za razliko v faznem kotu pri 100 Hz bi lahko pripisali napaki meritve zaradi vpliva sobe, kar je potrdil pregled in primerjava karakteristik simulacije ter meritev prednjega ter zadnjega zvočnika. Točnega razloga za odstopanje faznega kota frekvenc od 8 kHz naprej ne poznam, po pregledu meritve zvočnika z mikrofonom na osi 45° pa sumim, da je napaka posledica slabe postavitve merilnega mikrofona. Tega odstopanja akustičnega faznega kota pri meritvi prednjega ter zadnjega zvočnika ni bilo.

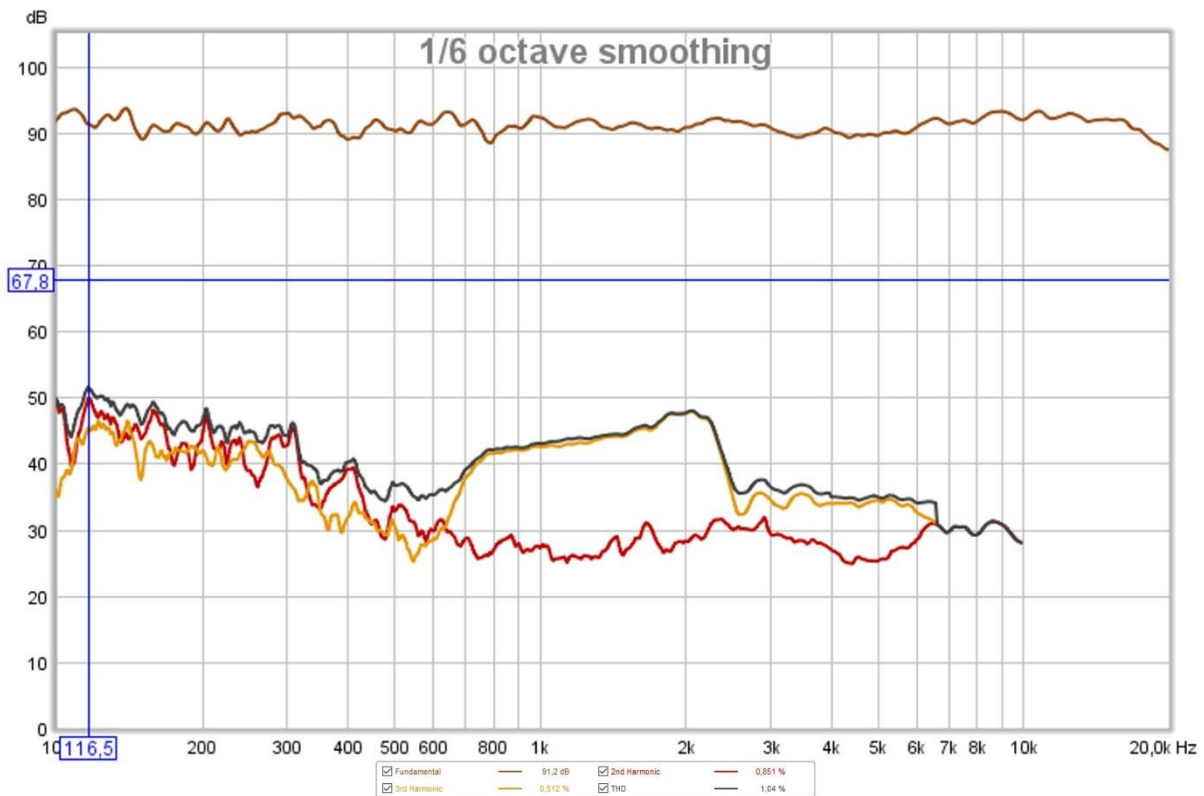
Cilj pri reprodukciji zvoka je čim manjša distorzija oziroma popačenje. Distorzija signala nastane že pri močnostnem ojačevalniku, v obliki popačenja sinusnega signala. Če signal pogledamo na osciloskopu, vidimo porezane vrhove.



Slika 56: Primer popačenja signala (Vir: www.google.com)

Na sliki je primer distorzije signala (zeleno), pri dosegu maksimalne napetosti ojačevalnika. Popačen signal lahko v tem primeru zaradi enosmerne komponente poškoduje zvočnik.

V območju normalnega delovanja imajo ojačevalniki popačenje do okoli 1 %, izrazi se kot THD (Total Harmonic Distortion), kar pomeni skupno popačenje signala. Močnostni ojačevalnik Yamaha RX-V450, ki sem ga uporabil pri izvajanju meritev ima v območju 20 Hz - 20 kHz pri moči 40 W in impedanci 8 Ω, popačenje 0.06 %, kar bom odštel od izmerjene vrednosti popačenja.



Slika 57: Graf izmerjenega popačenja zvočnika (Vir: Lasten)

Zgoraj je graf izmerjenega popačenja prednjega zvočnika. Črna krivulja predstavlja skupno popačenje, rumena krivulja popačenje 2. reda, rdeča pa 3. harmonično popačenje. Če upoštevamo popačenje ojačevalnika, ki je v mojem primeru 0,06 % in ga odštejemo od skupne distorzije, je največja vrednost 0,98 % THD pri frekvenci 116,5 Hz in napetosti 2.83 V.

Najvišja vrednost popačenja prednjih zvočnikov je bila 0,76 % pri frekvenci 205 Hz, pri zadnjem paru zvočnikov pa je bila ta vrednost 1,17 % pri 240 Hz. Pri poslušanju na normalni jakosti (do 90 dB), so tako vsa popačenja majhna, z vrednostmi le do okoli 1,2 %. V področju do 600 Hz in nad 2,5 kHz sta 2. in 3. harmonična distorzija približno enaki, medtem ko v področju od 600 Hz do 2,5 kHz prevladuje 2. harmonična distorzija.

4.8 Primerjava mojih zvočnikov z zvočnikoma ELAC Debut B6 ter SVS Prime Bookshelf

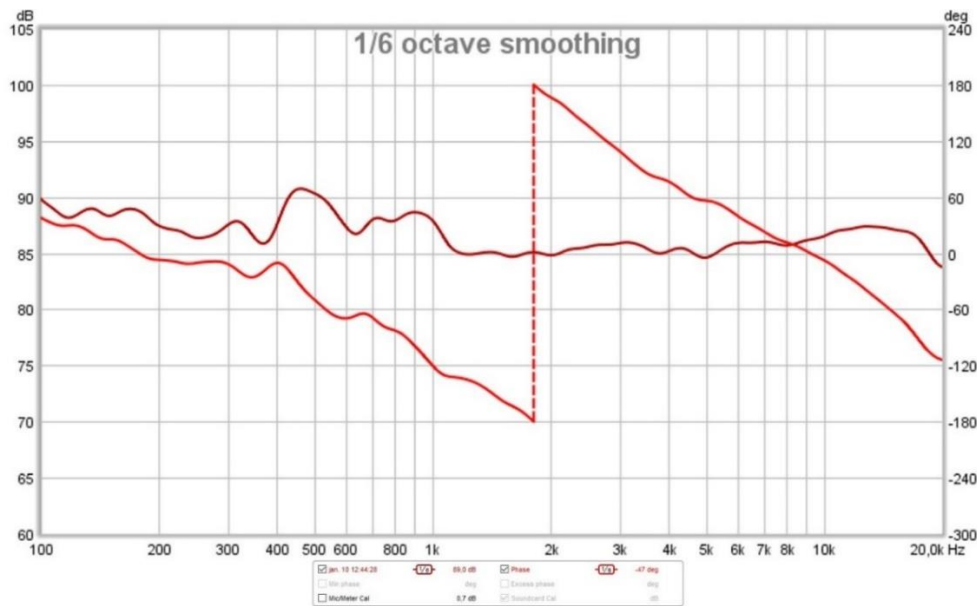
Kot končni preizkus sem svoje zvočnike primerjal z zvočnikom proizvajalca ELAC, in sicer model Debut B6, ter zvočnikom SVS Prime Bookshelf. Pomembno je omeniti, da sem zvočnike primerjal le po izmerjenih karakteristikah. Dejanski zvok je stvar percepcije ter preference in je za vsakega posameznika drugačen. Prav tako sem primerjal le par prednjih zvočnikov oziroma stereo sistema, ne pa celotnega sistema.

Specifikacije ter meritve zvočnikov ELAC Debut B6 sem našel na spletni strani Stereophile, zvočnika SVS Prime Bookshelf pa na uradni strani proizvajalca SVS ter spletni strani NoAudiophile.

Spodaj je tabela, kjer so navedeni nazivni podatki zvočnikov.

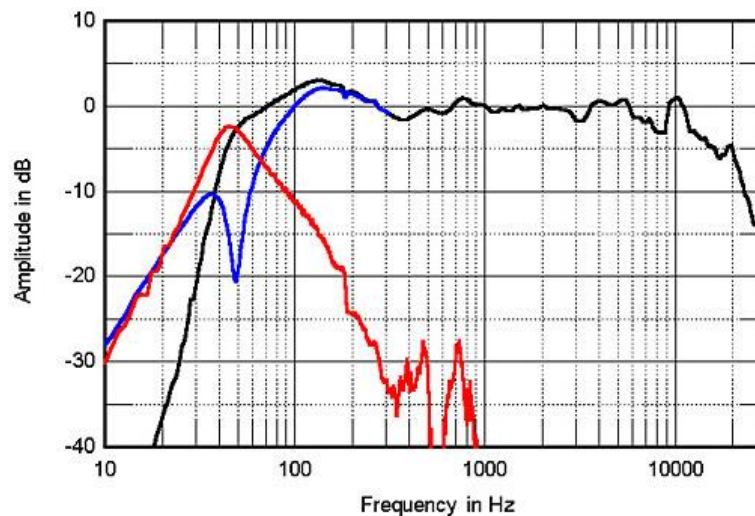
Tabela 5: Nazivni podatki mojih zvočnikov, ter zvočnikov s katerimi sem jih primerjal. (Vir: Lasten)

Zvočnik	Moj prednji zvočnik	ELAC Debut B6	SVS Prime Bookshelf
Velikost/Dimenzije (Š*V*G)	24 cm * 36 cm * 32 cm	21,6 cm * 35,6 cm * 25,4 cm	20 cm * 33,5 cm * 24 cm
Teža	10,5 kg	6,5 kg	7 kg
Nazivno frekvenčno območje (+/-3dB)	50 Hz – 20 kHz	44 Hz – 25 kHz	48 Hz – 25 kHz
Občutljivost	86 dB/2,83 V	87 dB/2,83 V	87 dB/2,83 V
Nazivna impedanca	4 Ω	6 Ω	8 Ω
Moč (RMS)	40 W	50 W	40 W
Tip zvočniške škatle	Bass-reflex	Bass-reflex	Bass-reflex
Nizkotonska enota	SB16PFC25-4 (160 mm)	160 mm	160 mm
Visokotonska enota	SB26STC-C000-4 (25 mm)	25 mm	25 mm
Tip kretnice	2-sistemska, 12 dB in 18 dB/oktavo	2-sistemska, 12 dB/oktavo	2-sistemska 12 dB/oktavo
Frekvenca križanja	2 kHz	3 kHz	2,3 kHz



Slika 58: Graf izmerjenega frekvenčnega odziva ter akustičnega faznega kota (Vir: Lasten)

Cena materiala ter komponent potrebnih za izdelavo para sprednjih zvočnikov znaša okoli 200 €. Graf je glajen na 1/6 oktave. Najnižja točka frekvenčnega odziva je na frekvenci 20 kHz in znaša malenkost manj kot 84 dB, najvišja pa se nahaja na frekvenci 450 Hz in znaša 91 dB. Maksimalna razlika znaša 7 dB v območju celotnega spektra.



Slika 59: Graf frekvenčnega odziva zvočnika Elac Debut B6 (Vir: www.stereophile.com)

Graf frekvenčnega odziva zvočnika ELAC Debut B6. Trenutna cena para zvočnikov na strani www.amazon.com znaša 280 \$ (<https://www.amazon.com/Debut-Bookshelf-Speakers-Andrew-Jones/dp/B014GSEQ06>) Modra krivulja označuje frekvenčni odziv zvočniške enote, rdeča linija pa odziv bass-reflex cevi. Črna linija je seštevek odzivov oziroma skupni frekvenčni odziv. Amplitude referenčne vrednosti 0 dB avtor grafa v članku ni omenil, zato učinkovitosti zvočnika iz grafa ni bilo mogoče razbrati. Grafa akustične faze za ta zvočnik nisem našel. Razlika med maksimalno in minimalno amplitudo frekvenčne karakteristike znaša 16 dB, drugače pa je karakteristika v področju 200 Hz-10 kHz precej enakomerna.

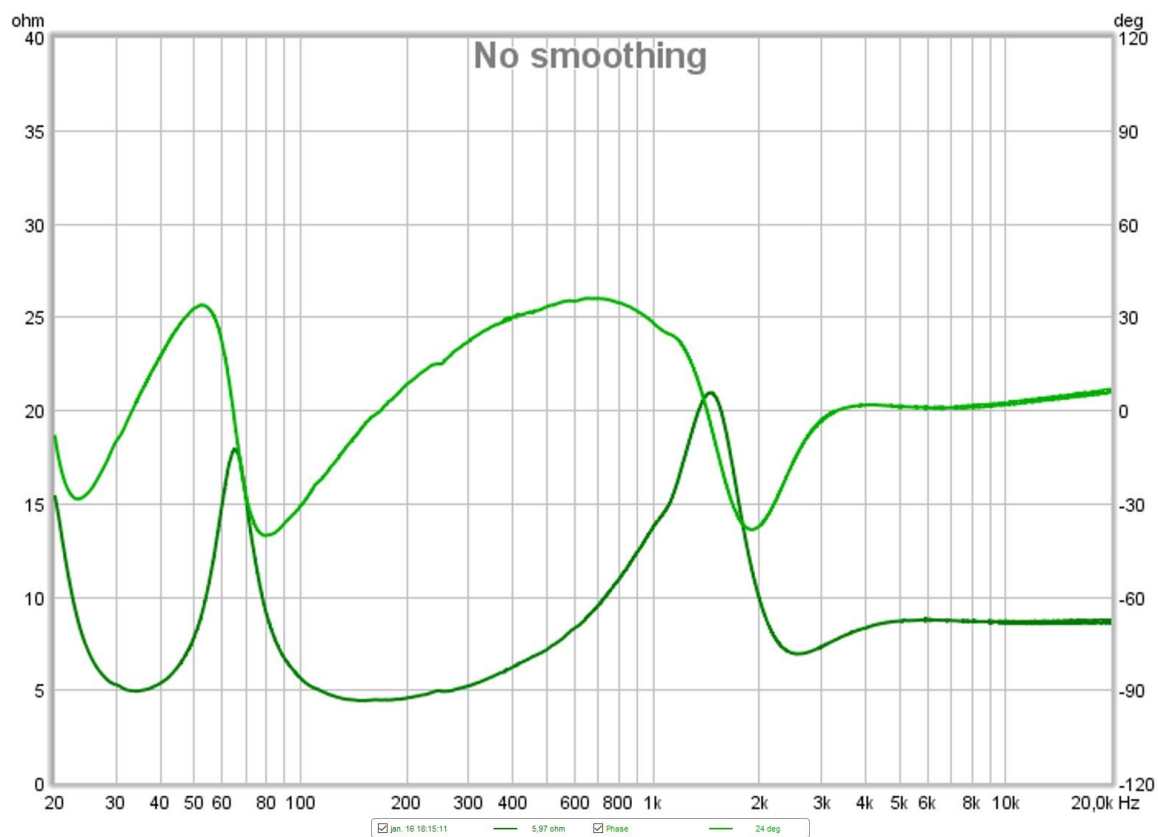


Slika 60: Frekvenčna karakteristika zvočnika SVS Prime Bookshelf (Vir: www.noaudiophile.com)

Frekvenčna karakteristika zvočnika SVS Prime Bookshelf. Cena zvočnika na uradni strani SVS Sound znaša 250 \$ po kosu oziroma 500 \$ za par (<https://www.svsound.com/products/prime-bookshelf>). Frekvenčni odziv je predstavljen z rdečo krivuljo. Grafa akustične faze za ta zvočnik prav tako nisem našel. Legenda amplitude na levi strani je napačna in ne prikazuje dejanske vrednosti oziroma se graf nahaja okoli 40 dB prenizko na lestvici. Dejanska občutljivost zvočnika pri napetosti 2.83 V naj bi bila okoli 87 dB, kar se ne ujema z grafom. Oblika grafa oziroma frekvenčna karakteristika je posledično razen zamaknjenosti v amplitudi pravilna. Maksimalna razlika v amplitudi tega zvočnika znaša okoli 6 dB.

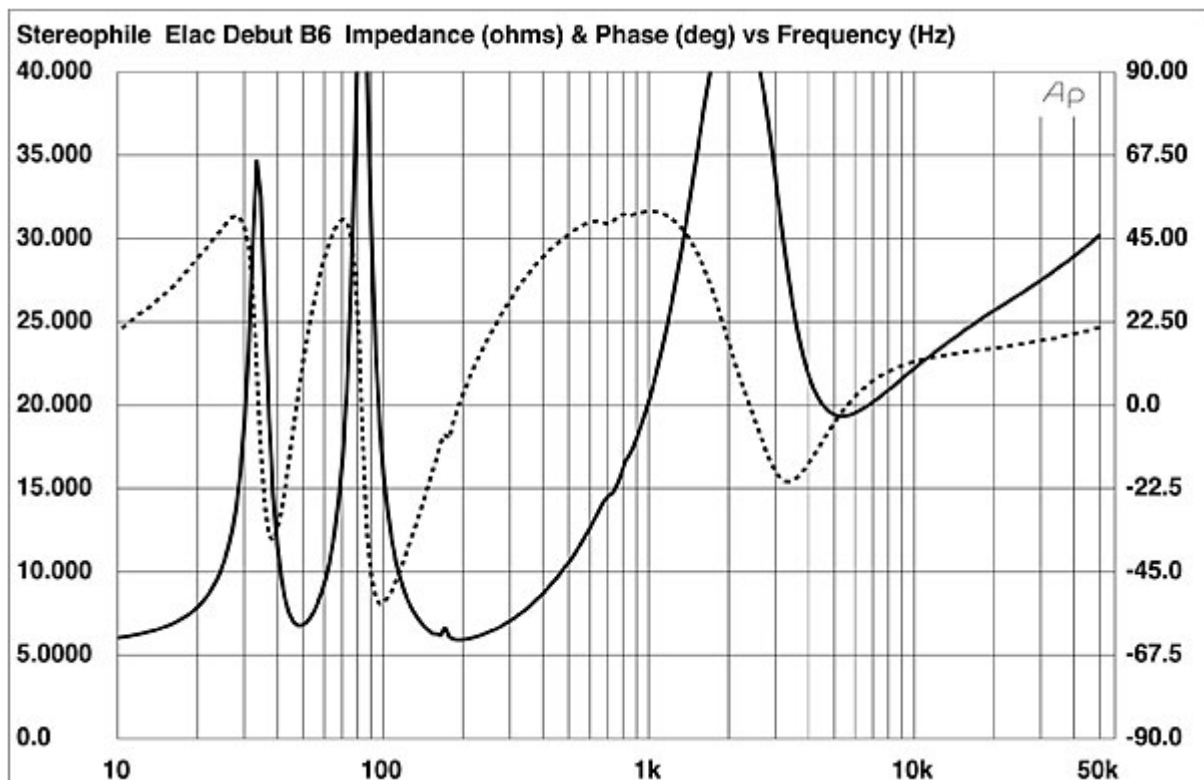
Krivulja grafa frekvenčnega odziva mojega zvočnika je primerljiva s krivuljama zvočnikov Debut B6 in Prime Bookshelf. Razen rahlo povečanega odziva med 400 Hz ter 1 kHz, je graf precej enakomeren. To nam pove, da je zvočnik tonalno uglašen in zvoke vseh frekvenc predvaja približno enako glasno. Zvočnik Debut B6 ima nad frekvenco 10 kHz enakomeren padec amplitude do vrednosti 14 dB pod referenco. Pri mojem in Prime Bookshelf zvočniku se padec začne šele pri frekvenci okoli 18 kHz in znaša nekaj dB pri frekvenci 20 kHz. Slednji ima prav tako padec odziva pri frekvenci 4 kHz, ta pa znaša okoli 3 dB.

Grafa akustične faze nisem našel za nobenega od zvočnikov s katerimi sem primerjal svoje, zato ta primerjava žal ni bila mogoča.



Slika 61: Graf faznega kota ter velikosti impendance prednjega zvočnika (Vir: Lasten)

Na sliki je impedančna karakteristika prednjega zvočnika, katerega sem izdelal. Temno zelena krivulja označuje impedanco v odvisnosti od frekvence svetlo zelena pa fazni kot impendance. Kot je razvidno z grafa, se impedanca ne spusti pod nazivno impedančo 4Ω , oziroma se ji približa pri frekvencah od 30 Hz do 40 Hz ter 100 Hz do 300 Hz. Impedančna krivulja ima 3 vrhove. Vrhova, ki se nahajata na frekvencah 20 Hz ter 65 Hz sta posledica resonance ohišja ter resonance zvočniške enote, vrh na 1.5 kHz pa je posledica križanja zvočniških enot oziroma kretnice. Kot sem omenil že prej, fazni kot pove zaostanek oziroma prehitevanje toka za napetostjo. Je posledica kombinacije kapacitivnih in induktivnih elementov celotnega zvočnika, ter v glavnem pove zahtevnost pogona zvočnika za ojačevalnik. Pri faznem kotu 45° ter -45° je tok na ojačevalniku 2-kratno večji kot bi bil pri faznem kotu 0° , kar pomeni 2-kratno obremenitev tranzistorjev ojačevalnika. Fazni kot v zgornjem primeru se nekajkrat približa vrednosti 45° ter -45° , vendar je pri najvišjih in najnižjih vrednostih faznega kota impedanca približno 10Ω . Posledično ojačevalnik nikoli ne »vidi« večjih obremenitev. Zaradi enakomerne impedančne karakteristike, so zvočniki prav tako zelo primerni za ojačevalnike na elektronke oziroma lampe.



Slika 62: Graf velikosti in faznega kota impedance zvočnika Elac Debut B6 (Vir: www.stereophile.com)

Zgoraj je impedančna karakteristika zvočnika Debut B6. Polna linija prikazuje velikost impedance v odvisnosti od frekvence črtkana linija pa fazni kot impedance. Najnižja impedanca zvočnika sodeč po grafu je 6Ω , kar se ujema s podatkom nazivne impedance zvočnika, ki je prav tako 6Ω . Tudi pri tem zvočniku ima krivulja impedance 3 vrhove in sicer pri 34 Hz, 80 Hz ter 2 kHz. Vrhova pri nižji frekvenci sta posledica resonance škatle ter zvočniške enote, višji pa je posledica križanja zvočniških enot oziroma kretnice. Fazni kot impedance nekajkrat preseže vrednost 45° ter -45° , vendar se te točke ne pojavljajo pri nizkih vrednostih impedance.

Če primerjam krivulje impedance ter faznega kota obeh zvočnikov, lahko rečem, da sta si razen različnega števila preskokov (fazni kot mojega zvočnika pri frekvenci pod 100 Hz preide skozi izhodišče 0° 1-krat manj) precej podobni. Velika razlika je v velikosti impedance v vrhovih. Impedanca mojih zvočnikov se nikoli ne dvigne nad 21Ω , medtem ko impedanca zvočnikov Debut B6 kar 2-krat naraste nad vrednost 40Ω .

Končni sklep je, da je set zvočnikov, ki sem jih naredil po specifikacijah in meritvah primerljiv z zvočniki v podobnem cenovnem razredu. Zvočnika, ki sem jih naredil sta sicer malce večja in težja od modelov s katerimi sem jih primerjal, vendar sta si po ostalih specifikacijah primerljiva. Frekvenčna karakteristika mojih zvočnikov je primerljiva z karakteristikama ostalima dvema zvočnikoma, ki imata podobno občutljivost. Impedanca mojega zvočnika je sicer nižja kot impedanca Debut B6, vendar ima moj zvočnik manjši fazni kot in zaradi tega manj obremenitve ojačevalnika.

6 ZAKLJUČEK IN RAZPRAVA

Kot začetniku v samogradnji zvočnikov se mi je zasnova in izdelava zvočnikov sprva zdela preprosta, vendar sem kmalu ugotovil, da je za uspešen projekt potrebnega veliko znanja. Pridobil sem ga predvsem na internetu s spremljanjem forumov, raznimi navodili ter vodiči. Poleg interneta sta mi v veliko pomoč prišli tudi knjigi »Sustavi Ozvučenja« avtorja Ozrena bilana ter »Akustika« avtorja Jurija Mikeln. Skozi nalogo sem spoznal faze zasnove, simulacije ter konstruiranja zvočnika. Prav tako sem se naučil obdelave lesa z izdelavo zvočniških omaric ter pridobil spretnost pri spajkanju kretnic. Kljub temu, da zvočnike poznamo že skoraj 100 let, je za kvalitetno zasnovo in izdelavo potrebno veliko znanja, moderna programska oprema pa vse skupaj nekoliko poenostavi, saj nam nudi celotne simulacije zvočniških omaric ter kretnic, le te pa so se izkazale za dokaj natančne, z manjšimi odstopanji, ki bi jih lahko pripisali tudi napakam med samo meritvijo. Končni izdelek je presegel moja začetna pričakovanja, saj je bil zvok primerljiv z zvočniki višjega cenovnega razreda, z nekaj manjšimi popravki ohišja, kot na primer tanjši mediapan za zadnja zvočnika ter kretnice, ki bi zmanjšala celotni strošek, pa bi bil primeren celo za izdelavo za širši trg.

Potrdil sem prvo hipotezo, ki pravi da je zvočnike mogoče narediti za ceno nižjo od 600 €. Končna cena zvočnikov je bila 596 €, sam pa sem plačal le okoli 100 €, saj sta mi podjetji SB Acoustics in Jantzen Audio sponzorirali zvočniške enote, komponente kretnice ter periferijo.

Drugo hipotezo, ki pravi, da lahko zvočnike izdelamo z uporabo dostopnih ročnih orodij za obdelavo lesa, sem potrdil le delno. Plošče mediapana sem razrezal z uporabo formatne žage, prednje ter zadnje stranice pa so bile izdelane na CNC stroju. Oba stroja sta namenjena profesionalni rabi. Notranje ojačitve zvočnikov ter okvirje zaščitnih mrežic sem izdelal s pomočjo nadrezkarja, zvočnike pa sem brusil z ekscentičnim brusilnikom.

Ovrgel sem tretjo hipotezo, saj je za začetnika zasnova ter izdelava zvočnikov precej zahteven projekt. Potrebno je znanje iz akustike, vedeti moramo kakšne enote izbrati ter kako zasnovati zvočnikom optimalno ohišje. Določiti je potrebno optimalno frekvenco križanja ter zasnovati shemo pasivne kretnice, ter vse skupaj znati simulirati v programski opremi. Pri sami izdelavi pride prav znanje iz obdelave lesa, prav tako pa moramo znati spajkati (spajkanje povezav elementov kretnic).

Četrto hipotezo sem potrdil, saj sem za zasnovo zvočnikov uporabil izključno brezplačno programsko opremo. Za simulacijo ohišja sem uporabil program WinISD, za zasnovo kretnic program BoxSim, ohišje pa sem zmodeliral v programu Autodesk Inventor, ki dijakom in študentom nudi brezplačno uporabo za obdobje treh let.

Peta hipoteza je bila potrjena delno. Izmerjen frekvenčni odziv zvočnikov se je od simulacij razlikoval za največ 3 dB simulirane vrednosti, kar vključuje možnost napake meritve zaradi prostora in opreme. Odstopanje akustičnega faznega kota je bil pri nizkih ter visokih frekvencah do 40°, kar presega zadani cilj odstopanja 10°, kar 4-kratno. Odstopanje impedance zvočnikov od simulacije je bilo do 2 Ω pri resonančnih frekvencah, kar je za 1 Ω več kot zadani cilj.

Šesta hipoteza je bila potrjena, saj so meritve vseh zvočnikov pokazale, da so zmožni reprodukcije frekvenc med 80 Hz in 20 kHz z amplitudo do 3 dB pod nazivno vrednostjo. Pod frekvenco 80 Hz se občutljivost zvočnikov zmanjša, za nadomestek pa lahko dodamo subwoofer oziroma nizkotonec, ki pokrije del spektra pod 80 Hz.

Z zadnjo hipotezo sem se vprašal, ali je moj set zvočnikov primerljiv s komercialnimi zvočniki večjih proizvajalcev v podobnem cenovnem razredu. Tudi ta hipoteza je bila potrjena, saj sem za ceno 600 € zasnoval in izdelal zvočnike po specifikacijah in zvoku primerljive z zvočniki, ki stanejo do 2-krat toliko.

7 POVZETEK

Za to raziskovalno nalogo sem se odločil predvsem zaradi želje po izdelavi kvalitetnega seta zvočnikov, ki bi bil lahko kasneje uporabljen kot domači kino. Skozi celoten potek raziskovalne naloge ter izdelave zvočnikov sem pridobival znanje akustike, uporabe programske opreme WinISD ter Boxsim za zasnovu ter simulacijo zvočniških omaric in kretnic. Prav tako sem med konstruiranjem zvočniških ohišij pridobil in uporabil znanja o uporabi programske opreme Autodesk Inventor za 3D modeliranje. Zvočniške omarice sem nato izdelal, jih pobarval ter vanje vgradil zvočniške enote, katere je sponzoriralo podjetje SB Acoustics ter zvočniške kretnice oziroma frekvenčne filtre, katerih pasivne komponente je sponzoriralo podjetje Jantezn Audio. Po končani izdelavi sem v šolskem studiu izmeril frekvenčne ter impedančne karakteristike zvočnikov, ki sem jih kasneje primerjal s simulacijo ter karakteristikami zvočnikov v podobnem cenovnem razredu. Ugotovil sem, da je bil set zvočnikov, ki sem ga izdelal po karakteristikah ter zvoku primerljiv z zvočniki višjega cenovnega razreda. Na koncu sem tudi potrdil ali ovrgel hipoteze, ki sem si jih zadal na začetku naloge.

8 ZAHVALA

Zahvaljujem se svojim mentorjema gospodu Francu Štravsu in gospodu Karlu Planku za pomoč, spodbudo in podporo pri izdelavi raziskovalne naloge, gospe Bojani Vrbnjak ter gospe Jolandi Melanšek pa za lektoriranje naloge. Prav tako gre zahvala mojemu stricu, ki mi je pomagal z izdelavo in barvanjem zvočniških škatel. Za večinsko sponzorstvo naloge se zahvaljujem podjetju SB Acoustics, ki je prispevalo zvočniške enote ter Jantzen Audio, ki je prispevalo komponente kretnice ter nekaj periferije. Zadnja zahvala gre vsem, ki so na kakršenkoli način pripomogli k nastajanju naloge.

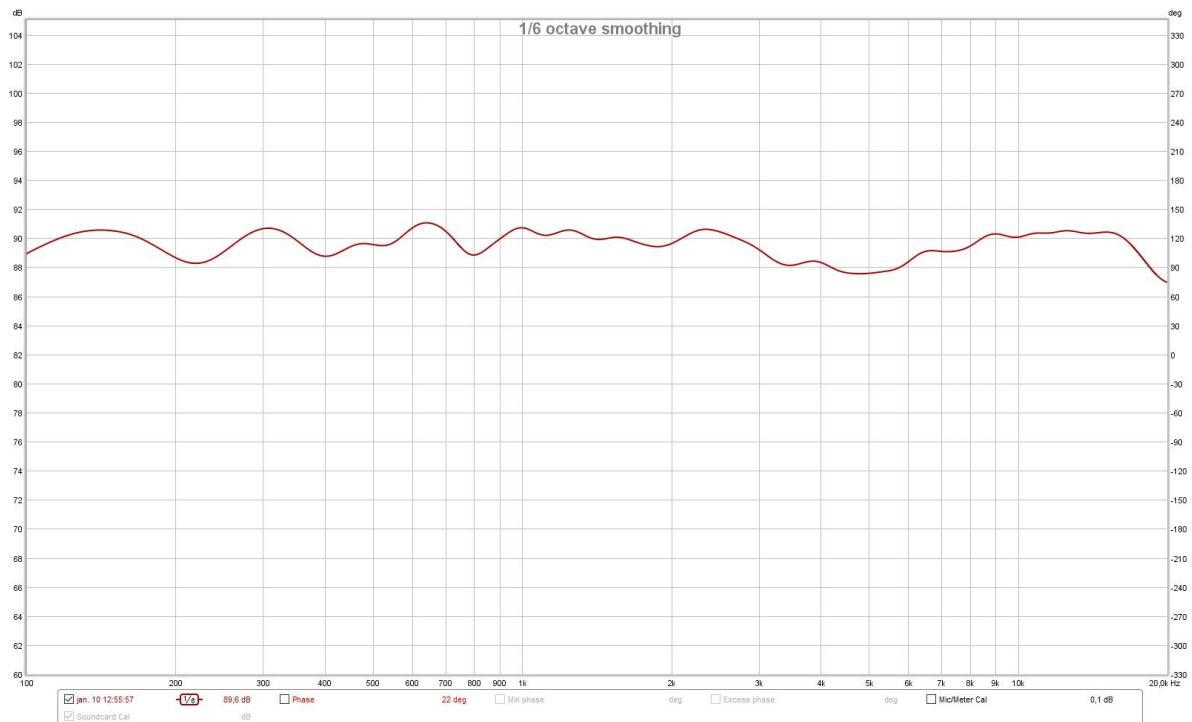
9 LITERATURA TER VIRI

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Loudspeaker#Other_speaker_designs> (5.2.2017)
2. <<http://www.loudspeaker-chassis.com/High-End-Wide-Range/TangBand-W6-2144.html>> (5.2.2017)
3. <<http://www.eminence.com/support/understanding-loudspeaker-data/>> (5.2.2017)
4. <<http://www.sbacoustics.com/>> (5.2.2017)
5. <http://www.visaton.de/en/chassis_zubehoer/tiefmittelton/ti100_8.html> (5.2.2017)
6. <<https://www.madisoundspeakerstore.com/seas-soft-dome-tweeters/seas-prestige-27tdfc-h1189-textile-dome-tweeter/>> (5.2.2017)
7. <<http://audiojudgement.com/types-of-enclosures-which-is-the-best/>> (5.2.2017)
8. <https://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure> (5.2.2017)
9. <<http://diyaudiocorner.tripod.com/formula.htm>> (5.2.2017)
10. <<http://www.mediacollege.com/audio/01/sound-waves.html>> (5.2.2017)
11. <https://en.wikipedia.org/wiki/Linkwitz%E2%80%93Riley_filter> (5.2.2017)
12. <<http://arqen.com/acoustics-101/surround-sound-speaker-placement/>> (5.2.2017)
13. <http://www.troelsgravesen.dk/download/MeasuringLoudspeakers_JohnAtkinson.pdf> (5.2.2017)
14. <<https://www.roomeqwizard.com/>> (5.2.2017)
15. <<http://www.boxsim.de/>> (5.2.2017)
16. <<https://news.microsoft.com/stories/building87/audio-lab.php>> (5.2.2017)
17. <<http://audiojudgement.com/measure-speaker-frequency-response/>> (5.2.2017)
18. <<http://www.hometheatershack.com/forums/rew-forum/46374-impedance-measurement-cabling-mess.html>> (5.2.2017)
19. <http://noaudiophile.com/SVS_Prime_Bookshelf/> (5.2.2017)
20. <<http://www.stereophile.com/content/elac-debut-b6-loudspeaker-measurements#HJqHxDLQYilKT02Y.97>> (5.2.2017)
21. BILAN, Ozren. 2005. Sustavi ozvučenja, snimanje zvuka i digitalna audio tehnika. Split. ISBN 953-97685-1-9
22. MIKELN, Jurij. 2001. AKUSTIKA: Konstrukcije in samogradnje akustičnih naprav. Ljubljana. ISBN 961-90703-4-8

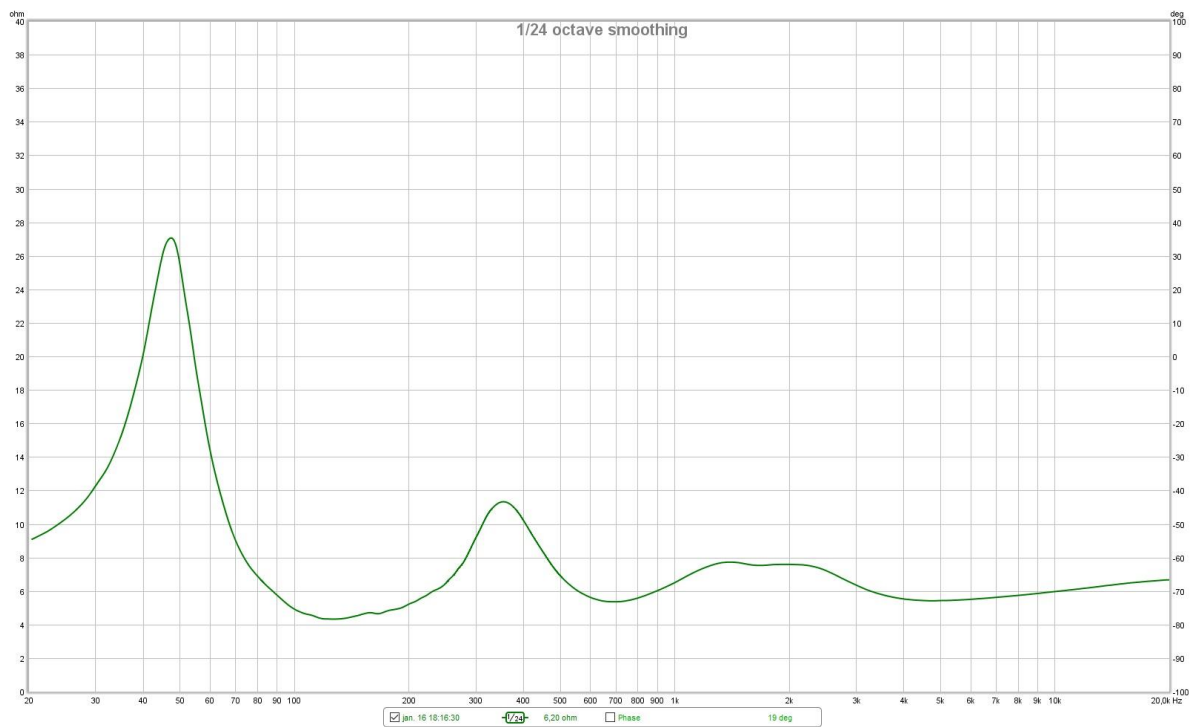
10 PRILOGE



Priloga 1: Slika izdelanega center zvočnika (Vir: Lasten)



Priloga 2: Izmerjena frekvenčna karakteristika center zvočnika (Vir: Lasten)



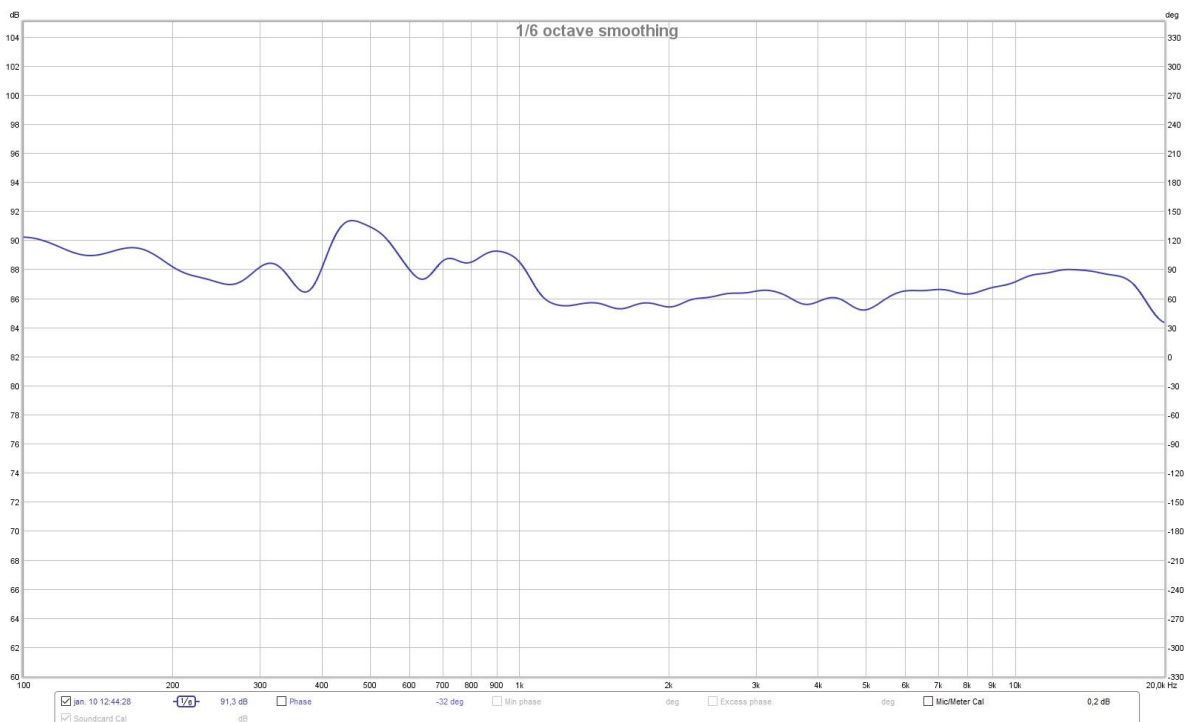
Priloga 3: Izmerjena impedančna karakteristika center zvočnika (Vir: Lasten)



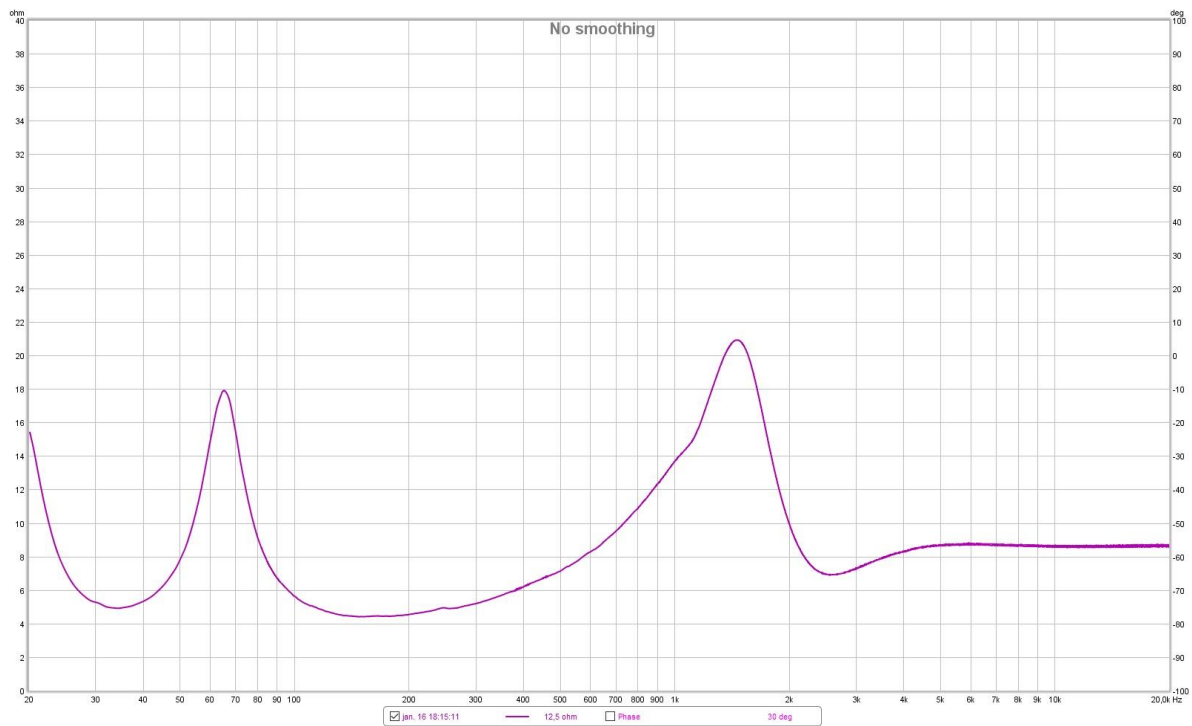
Priloga 4: Izmerjena karakteristika distorzije center zvočnika (Vir: Lasten)



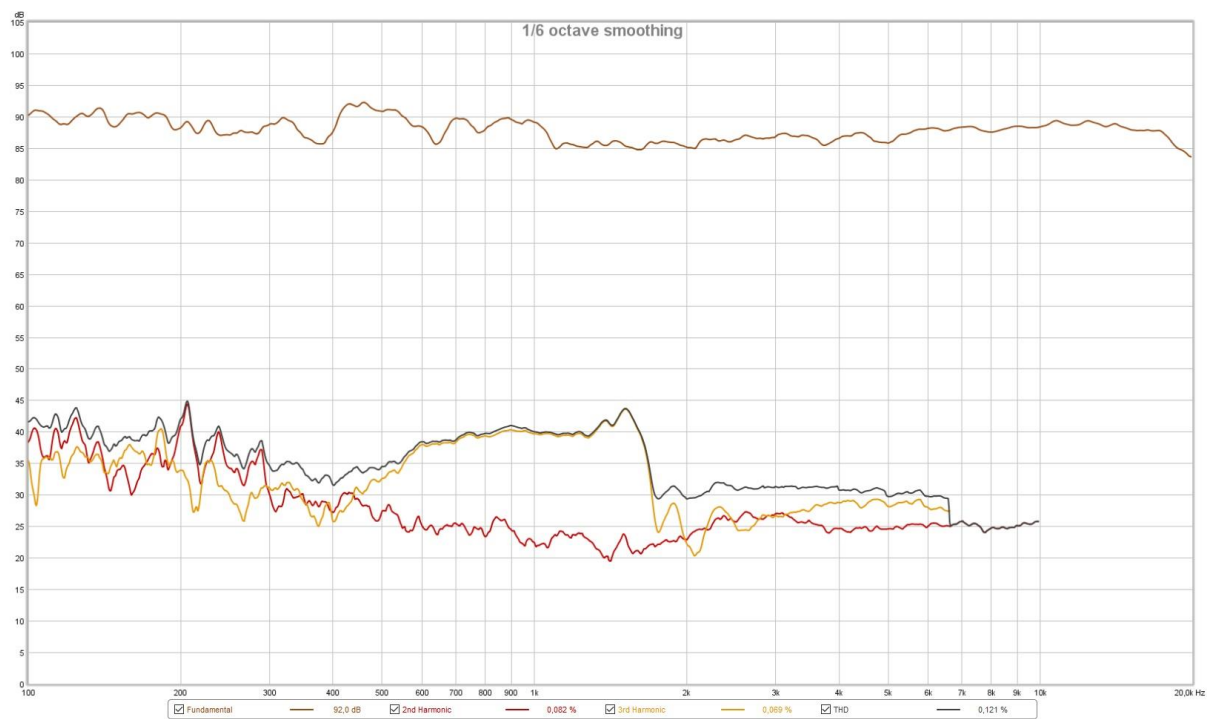
Priloga 5: Slika izdelanega prednjega para zvočnikov (Vir: Lasten)



Priloga 6: Izmerjena frekvenčna karakteristika prednjega para zvočnikov (Vir: Lasten)



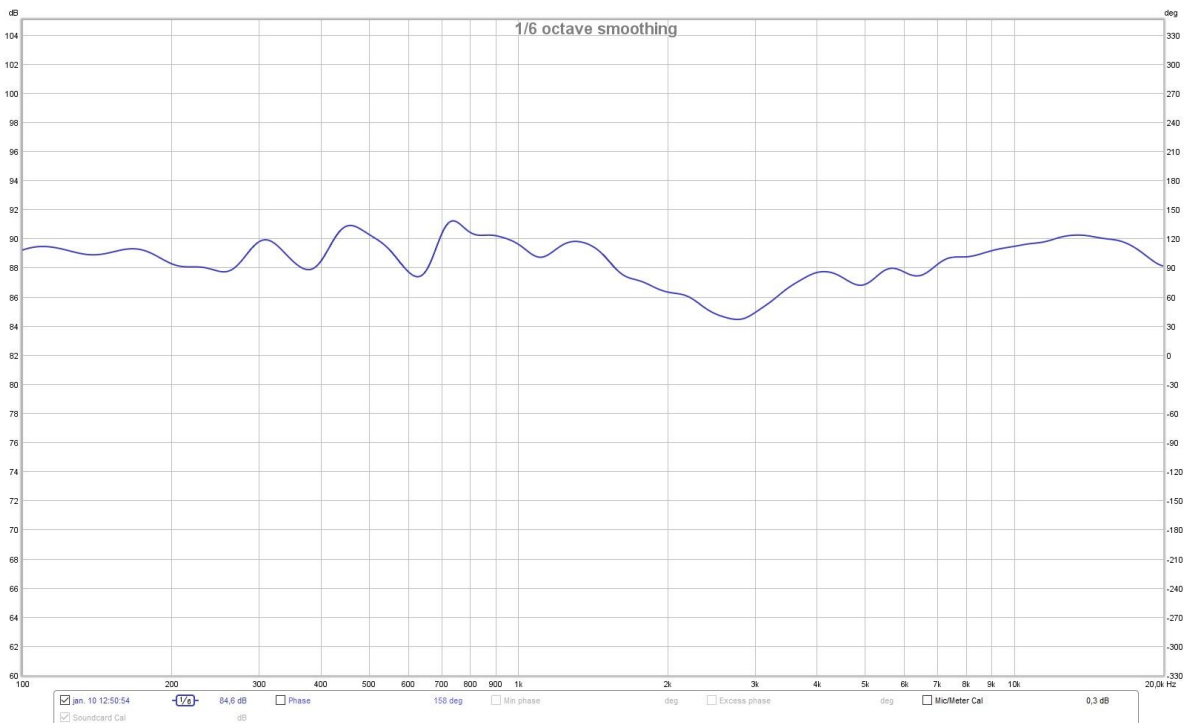
Priloga 7: Izmerjena impedančna karakteristika prednjega para zvočnikov (Vir: Lasten)



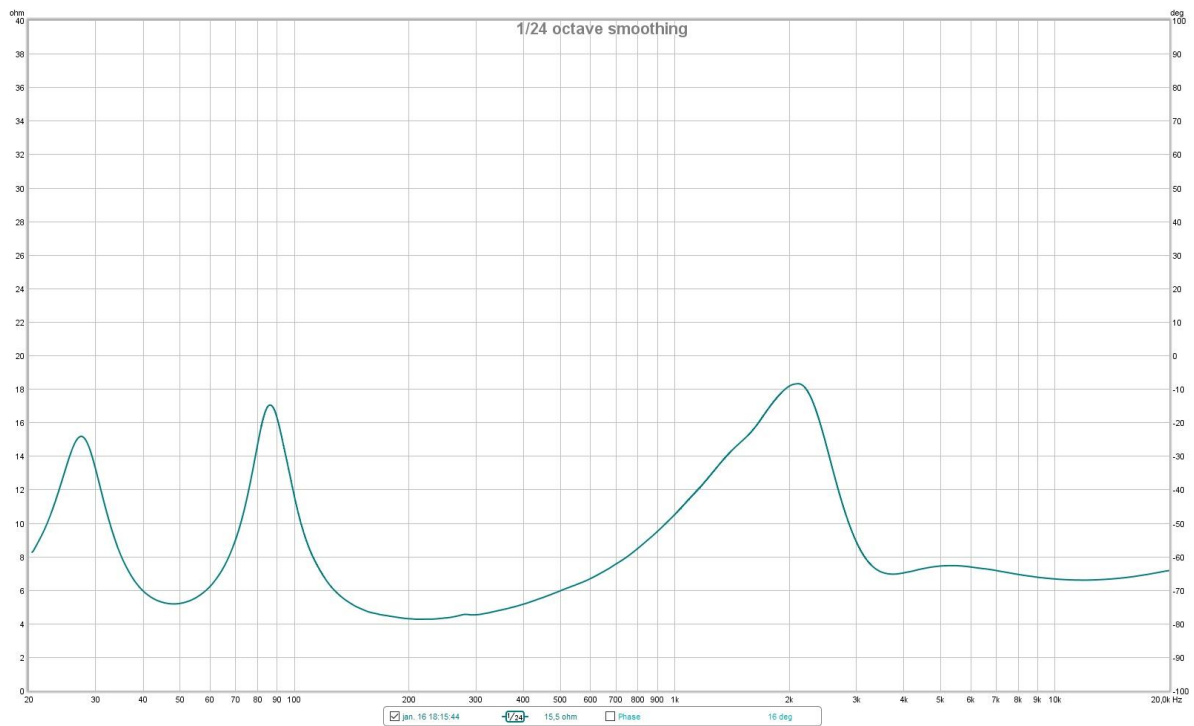
Priloga 8: Izmerjena karakteristika distorzije prednjega para zvočnikov (Vir: Lasten)



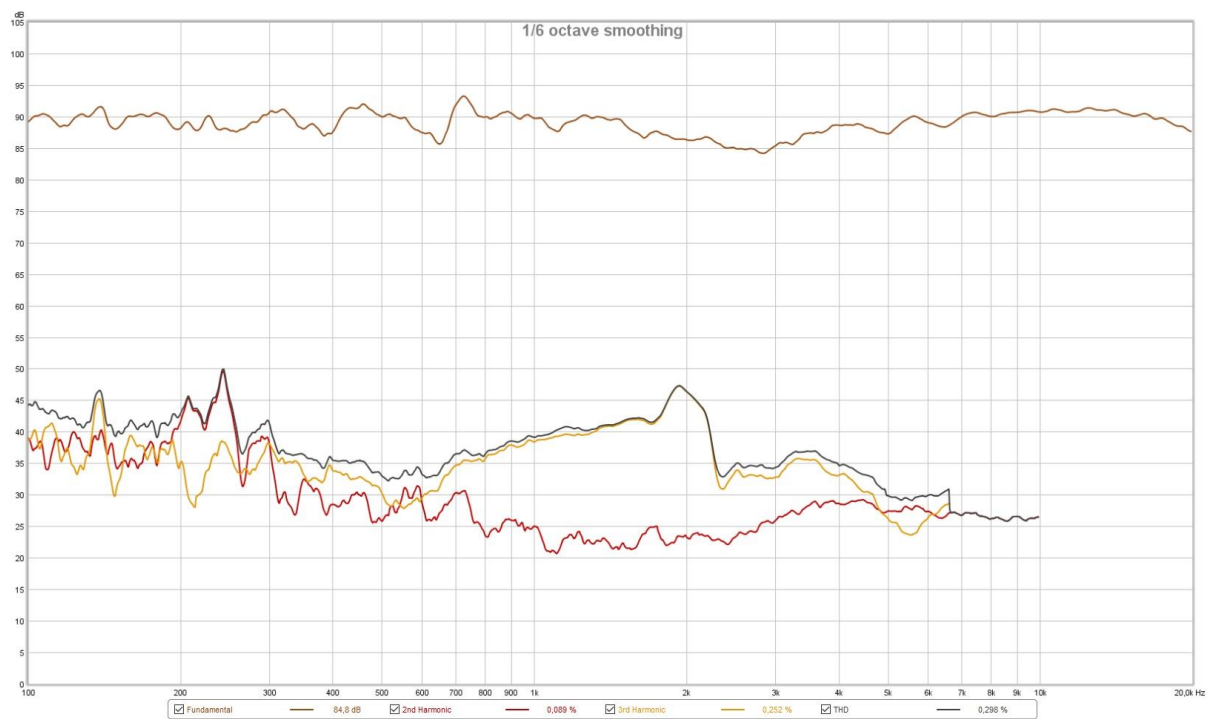
Priloga 9: Slika izdelanega zadnjega para zvočnikov (Vir: Lasten)



Priloga 10: Izmerjena frekvenčna karakteristika zadnjega para zvočnikov (Vir: Lasten)



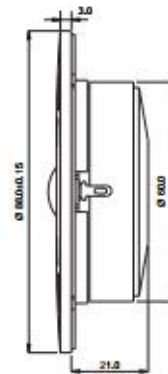
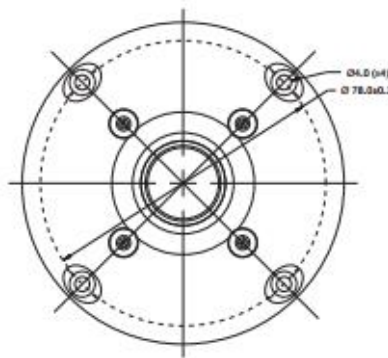
Priloga 11: Izmerjena impedančna karakteristika zadnjega para zvočnikov (Vir: Lasten)



Priloga 12: Izmerjena karakteristika distorzije zadnjega para zvočnikov (Vir: Lasten)



SB19ST-C000-4



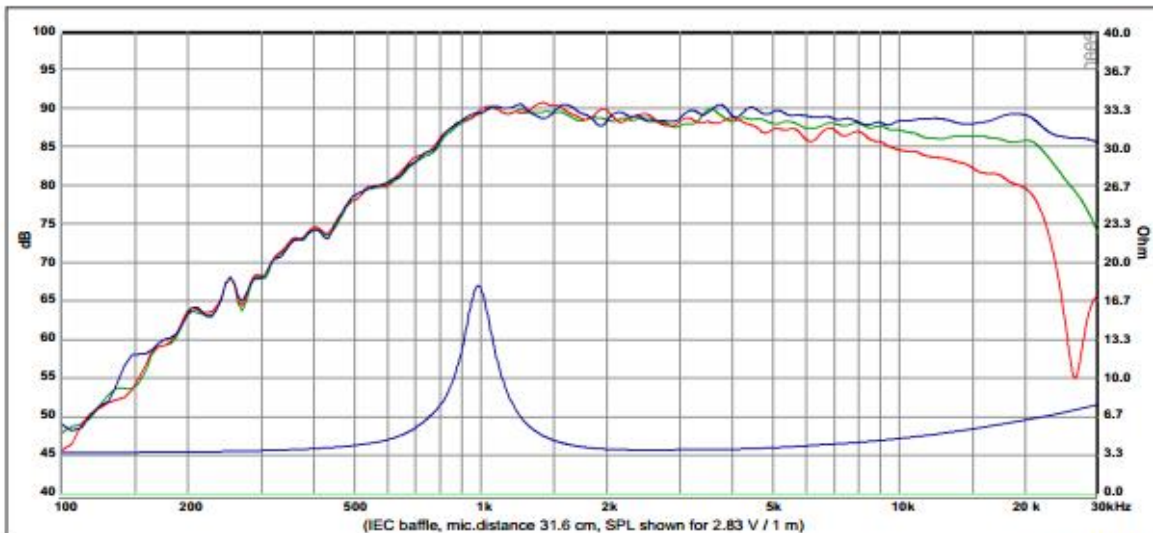
FEATURES

- Optimized damping in pole cavity to eliminate internal reflection
- Fine weave soft fabric dome for smooth frequency response
- Saturation controlled motor system for reduced distortion
- CCAW voice coil for low moving mass
- Long life silver lead wires

Specs :

Nominal Impedance	4 Ω	Free air resonance, Fs	980 Hz
DC resistance, Re	3.4 Ω	Sensitivity (2.83 V / 1 m)	88.5 dB
Voice coil inductance, Le	0.07 mH	Mechanical Q-factor, Qms	6.45
Effective piston area, Sd	3.8 cm ²	Electrical Q-factor, Qes	1.50
Voice coil diameter	19.1 mm	Total Q-factor, Qts	1.22
Voice coil height	1.8 mm	Force factor, Bl	1.75 Tm
Air gap height	3 mm	Rated power handling*	30 W
Linear coil travel (p-p)	1.2 mm	Magnetic flux density	1.24 T
Moving mass incl. air, Mms	0.22 g	Magnet weight	0.13 kg
		Net weight	0.32 kg

* IEC 268-5, high-pass Butterworth, 2600 Hz, 12 dB/oct.

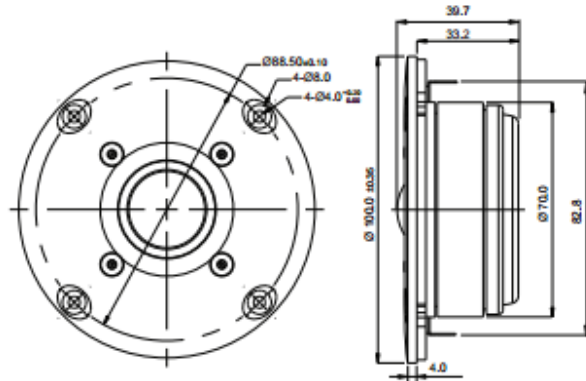


Response Curve :
 (Blue) : on axis (Green) : 30° off-axis (Red) : 60° off-axis

REV. 3 (11.03.2016)

SBACOUSTICS

SB26STC-C000-4



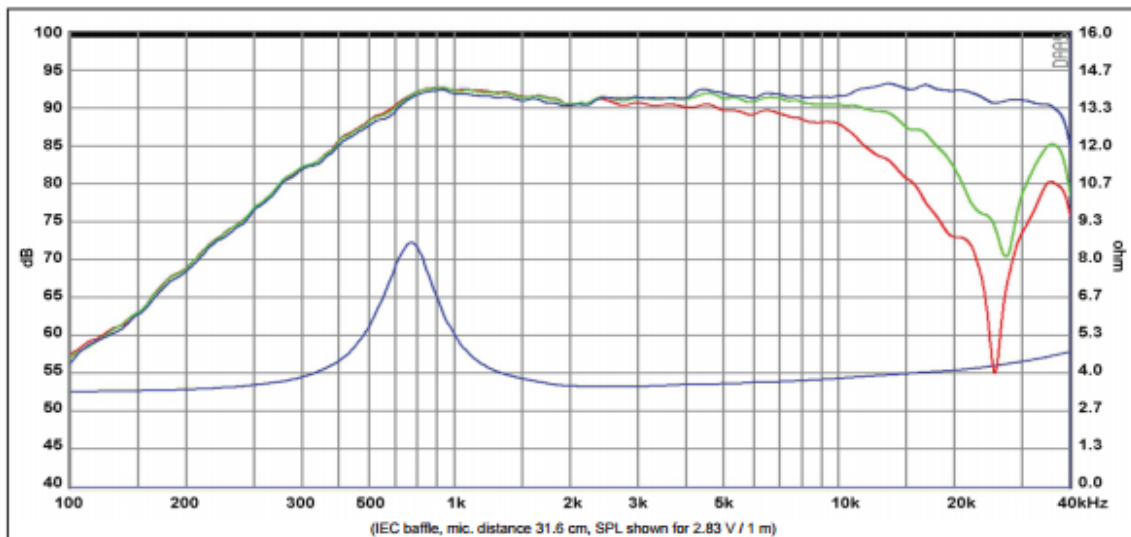
FEATURES

- Copper cap for reduced voice coil inductance and minimum phase shift
- Non-reflective rear chamber with optimized damping for improved dynamics
- Flow optimized vented pole piece for optimum coupling to rear chamber
- Fine weave soft fabric dome for smooth frequency response
- Saturation controlled motor system for low distortion
- CCAW voice coil for low moving mass
- Long life silver lead wires
- Low resonance frequency

Specs :

Nominal Impedance	4 W	Free air resonance, Fs	750 Hz
DC resistance, Re	3.2 W	Sensitivity (2.83 V / 1 m)	91.5 dB
Voice coil inductance, Le	0.04 mH	Mechanical Q-factor, Qms	3.0
Effective piston area, Sd	6.2 cm ²	Electrical Q-factor, Qes	1.78
Voice coil diameter	25.4 mm	Total Q-factor, Qts	1.12
Voice coil height	1.3 mm	Force factor, Bl	1.6 Tm
Air gap height	2.5 mm	Rated power handling*	120 W
Linear coil travel (p-p)	1.2 mm	Magnetic flux density	1.15 T
Moving mass incl. air, Mms	0.3 g	Magnet weight	0.22 kg
		Net weight	0.53 kg

* IEC 268-5, high-pass Butterworth, 2600 Hz, 12 dB/oct.

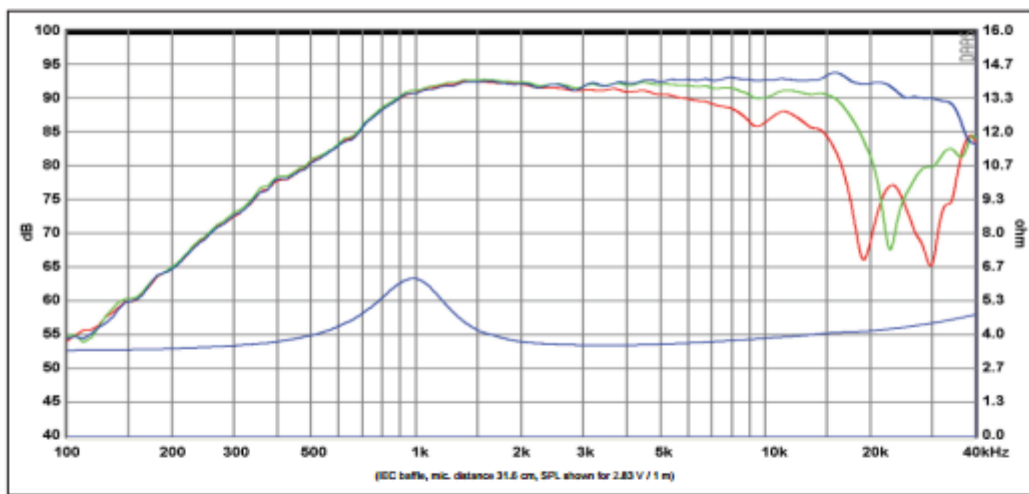
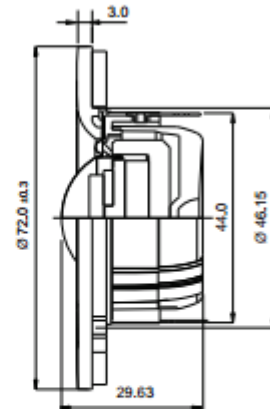
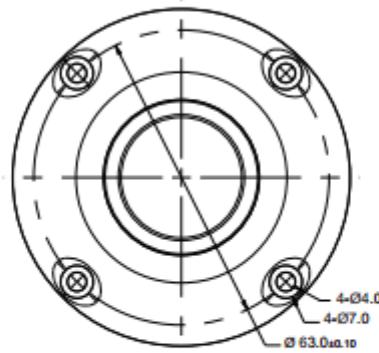


Response Curve :
 (Blue) : on axis (Green) : 30° off-axis (Red) : 60° off-axis

Priloga 14: Tehnična dokumentacija visokotona SB26STC-C000-4 (Vir: www.sbacoustics.com)

SBACOUSTICS

SB26STCN-C000-4



Response Curve :
 (Blue) : on axis (Green) : 30° off-axis (Red) : 60° off-axis

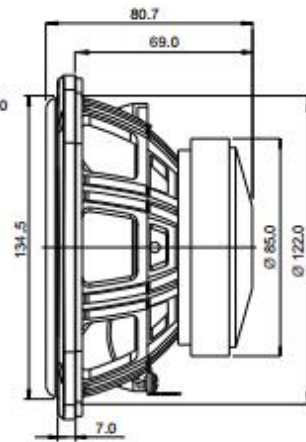
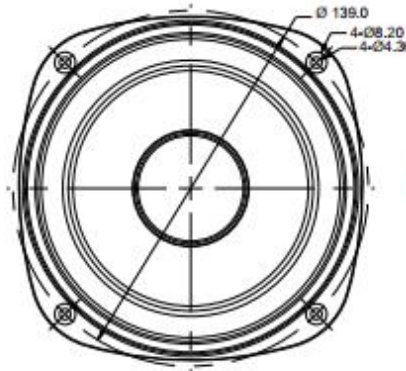
Specs :

Nominal Impedance	4 Ω	Free air resonance, Fs	960 Hz
DC resistance, Re	3.2 Ω	Sensitivity (2.83 V / 1 m)	92.5 dB
Voice coil inductance, Le	0.04 mH	Mechanical Q-factor, Qms	1.6
Effective piston area, Sd	6.2 cm ²	Electrical Q-factor, Qes	1.77
Voice coil diameter	25.4 mm	Total Q-factor, Qts	0.84
Voice coil height	1.3 mm	Force factor, Bl	1.8 Tm
Air gap height	2.5 mm	Rated power handling*	120 W
Linear coil travel (p-p)	1.2 mm	Magnetic flux density	1.2 T
Moving mass incl. air, Mms	0.3 g	Magnet weight (neo)	21 g
		Net weight	0.1 kg

* IEC 268.5, high-pass Butterworth, 2600 Hz, 12 dB/oct.

SBACOUSTICS

5" SB13PFC25-04



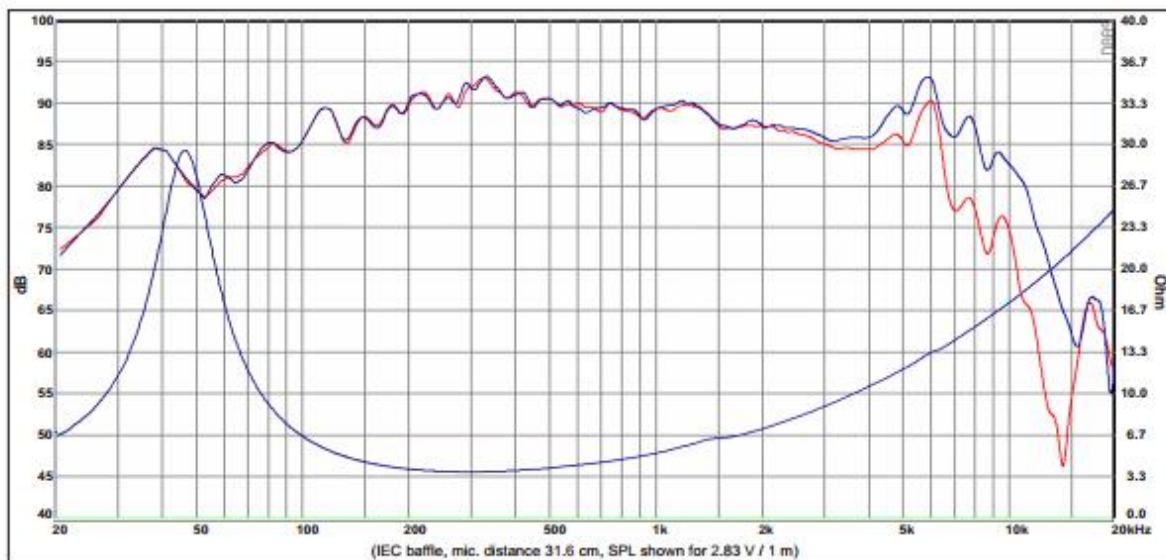
Specs :

FEATURES

- Vented reinforced plastic chassis
- Proprietary cone material with natural fibers made in-house
- Soft low damping rubber surround for improved transient response
- Optimized motor system
- Vented coil former for low compression
- Non-resonant long life lead wires

Nominal Impedance	4 Ω	Free air resonance, F _s	44 Hz
DC resistance, R _e	3.2 Ω	Sensitivity (2.83 V / 1 m)	89 dB
Voice coil inductance, L _e	0.56 mH	Mechanical Q-factor, Q _{ms}	2.6
Effective piston area, S _d	87 cm ²	Electrical Q-factor, Q _{es}	0.33
Voice coil diameter	25.4 mm	Total Q-factor, Q _{ts}	0.29
Voice coil height	14 mm	Moving mass incl.air, M _{ms}	10.5 g
Air gap height	5 mm	Force factor, Bl	5.3 Tm
Linear coil travel (p-p)	9 mm	Equivalent volume, V _{as}	13.4 liters
Magnetic flux density	1.06 T	Compliance, C _{ms}	1.25 mm/N
Magnet weight	0.36 kg	Mechanical loss, R _{ms}	1.1 kg/s
Net weight	0.89 kg	Rated power handling*	40 W

* IEC 268-5, T/S parameters measured on drive units that are broken in.

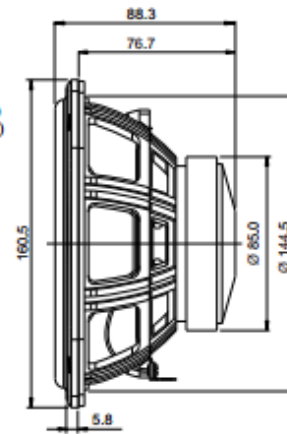
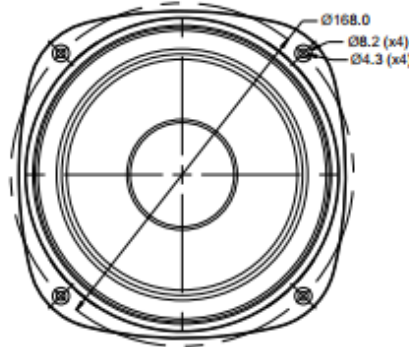


Response Curve :

— (Blue) : on axis — (Red) : 20° off-axis



6" SB16PFC25-04



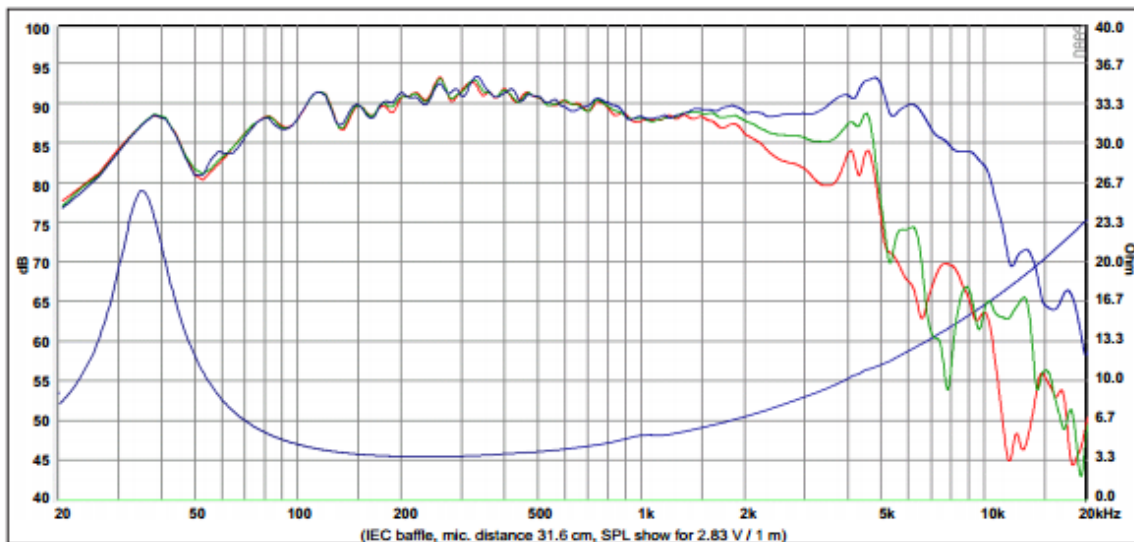
FEATURES

- Vented reinforced plastic chassis
- Proprietary cone material with natural fibers made in-house
- Soft low damping rubber surround for improved transient response
- Optimized motor system
Vented coil former for low compression
- Non-resonant long life lead wires

Specs :

Nominal Impedance	4 Ω	Free air resonance, F _s	35 Hz
DC resistance, R _e	3.2 Ω	Sensitivity (2.83 V / 1 m)	89.5 dB
Voice coil inductance, L _e	0.56 mH	Mechanical Q-factor, Q _{ms}	2.76
Effective piston area, S _d	124 cm ²	Electrical Q-factor, Q _{es}	0.39
Voice coil diameter	25.4 mm	Total Q-factor, Q _{ts}	0.34
Voice coil height	14 mm	Moving mass incl.air, M _{ms}	13.8 g
Air gap height	5 mm	Force factor, Bl	5.0 Tm
Linear coil travel (p-p)	9 mm	Equivalent volume, V _{as}	32.7 liters
Magnetic flux density	10.6 T	Compliance, C _{ms}	1.50 mm/N
Magnet weight	0.36 kg	Mechanical loss, R _{ms}	1.1 kg/s
Net weight	0.96 kg	Rated power handling*	40 W

* IEC 268-5, T/S parameters measured on drive units that are broken in.



Response Curve :
 (Blue) : on axis (Green) : 30° off-axis (Red) : 60° off-axis

REV.1 (04.04.2014)