

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Sergej Kastelic

Izdelava elektrostaticnega zvočnika

Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija

Mentor: izr. prof. ddr. Iztok Humar, univ. dipl. inž. el.

Ljubljana, 2016

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. ddr. Iztoku Humarju za usmerjanje in nasvete pri pisanju diplomske naloge, za možnost pisanja diplome o zvoku in za vso strokovno pomoč. Zahvala gre tudi tehniškemu sodelavcu in laborantu Dragu Tacarju za pomoč in nasvete pri izdelavi zvočnikov za fakulteto ter doc. dr. Samu Begušu za pomoč pri izvedbi meritev prototipnega elektrostaticnega zvočnika.

Za podporo med študijem se še posebno zahvaljujem družini, sošolcem in Vlasti.

Vsebina

1	Uvod	15
2	Opis in delovanje elektrostaticnega zvočnika	17
2.1	Razvoj elektrostaticnih zvočnikov	17
2.2	Osnove elektrostaticnega zvočnika	21
2.3	Glavne komponente zvočnika	22
2.3.1	Membrana	22
2.3.2	Stator ali prevodna perforirana kovinska plošča	23
2.3.3	Distančniki	24
2.4	Delovanje in lastnosti elektrostaticnega zvočnika	24
2.4.1	Polarizacijska napetost	27
2.4.2	Napetost oziroma nateg membrane	27
2.4.3	Frekvenčni razpon	27
2.4.4	Vrste ESZ	29
2.4.5	Kapacitivnost ESZ	31
2.4.6	Elektrostaticna sila na membrani	32
2.4.7	Zvočni tlak ESZ	33
3	Izdelava elektrostaticnega zvočnika	37
3.1	Uporabljeni gradniki ESZ	37
3.2	Sestavljanje ESZ	42
4	Meritve ESZ	47
4.1	SPL oziroma maksimalna jakost zvočnika	48
4.2	Frekvenčni odziv zvočnika	48
4.3	Jakost zvočnika pri določenem merjenem kotu	49

4.4 Povzetek meritev in izdelave ter primerjava z dinamičnim zvočnikom.....	51
5 Zaključek	55
Literatura	57

Kazalo slik

Slika 2-1: Eden prvih elektrostatičnih zvočnikov [15]	18
Slika 2-2: Eden prvih stožčastih zvočnikov [14]	18
Slika 2-3: Janszenov elektrostatičen visokotonski zvočnik [3]	19
Slika 2-4: Quad ESL-57 [3]	19
Slika 2-5: KLH 9 [18]	20
Slika 2-6: Glavne komponente elektrostatičnega zvočnika [13]	21
Slika 2-7: Membrana oz. plastična folija [6]	22
Slika 2-8: Stator ali perforirana kovinska plošča [13]	23
Slika 2-9: Distančnik oz. dvostranski lepilni trak [9]	24
Slika 2-10: Prikaz delovanja ESZ [12]	25
Slika 2-11: Električna shematika prototipnega elektrostatičnega zvočnika	26
Slika 2-12: Klasični frekvenčni odziv <i>full range</i> ESZ [1, stran 15]	28
Slika 2-13: Prikaz segmentacije ESZ [1, stran 21]	29
Slika 2-14: MartinLogan hibridni ESZ [3]	30
Slika 2-15: ESZ uporabimo kot mikrofona, da poslušamo gibanje zvočnih valov iz točkovnega vira [17, stran 156]	35
Slika 3-1: PETP material [8]	37
Slika 3-2: Techspray Licron crystal [10]	38
Slika 3-3: Lepilni bakreni trak [16]	38
Slika 3-4: Prebarvani stator	39
Slika 3-5: Prikaz iztekanja corone [13]	40
Slika 3-6: Brušenje robov na statorju [13]	40
Slika 3-7: Levo slika okvirja, desno slika pokrova	41
Slika 3-8: Prikaz namestitve distančnikov in drugih komponent [13]	42
Slika 3-9: Prikaz nalepljenega bakrenega traku	43
Slika 3-10: Prikaz spajkanja žice na bakreni trak [13]	44
Slika 3-11: Prikaz napenjanja membrane	44
Slika 3-12: Prikaz nameščene membrane na statorju	45

Slika 3-13: Premaz prevodnega pršila na membrano	45
Slika 3-14: Končni izdelek: prototipni ESZ	46
Slika 4-1: Prikaz meritev v gluhi sobi	47
Slika 4-2: Frekvenčni odziv prototipnega zvočnika	48
Slika 4-3: Prikaz razlike zvočne poti pri poslušanju s strani [17]	49
Slika 4-4: Frekvenčni odziv zvočnika pri kotu 0°	50
Slika 4-5: Frekvenčni odziv zvočnika pri kotu 45°	50
Slika 4-6: Frekvenčni odziv zvočnika pri kotu 90°	51
Slika 4-7: Primerjava frekvenčnih karakteristik ESZ (zgoraj) in dinamičnega zvočnika (spodaj)	52

Seznam uporabljenih simbolov

A ... površina statorja

C ... kapacitivnost

c ... hitrost zvoka

D ... razmak med dvema statorjema

d ... razmak med membrano in statorjem

ESZ ... elektrostatični zvočnik

E_s ... električno polje

ε_0 ... fizikalna konstanta

F ... sila na zvočniku

f ... frekvenca

I_{sig} ... tok na statorju

L_p ... raven zvočnega tlaka

p_{rms} ... zvočni tlak

p_0 ... referenčna vrednost

π ... pi

RMS ... efektivna vrednost

r ... razdalja med zvočnikom in mikrofonom

U_p ... polarizacijska napetost

U_{sig} ... signalna napetost

U_{rms} ... maksimalna izhodna napetost ojačevalca

Q ... naboj na statorju

Povzetek

V diplomski nalogi je predstavljena izdelava prototipnega elektrostatičnega zvočnika, ki bo služil kot vzorec in model za izboljšavo še dveh dodatnih elektrostatičnih zvočnikov, ki bodo namenjeni ozvočenju predavalnice na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani ter študentom omogočili lažji prikaz delovanja elektrostatične sile. Opisano je tudi, kako deluje elektrostatičen zvočnik, in navedene so njegove glavne značilnosti, po katerih se razlikuje od klasičnih dinamičnih zvočnikov, ki so najpogostejše uporabljeni in najbolj poznani med ljudmi. Po izdelavi prototipnega elektrostatičnega zvočnika smo tudi izmerili in izračunali njegove specifikacije, kot so: frekvenčna karakteristika, maksimalna jakost zvočnika, kapacitivnost zvočnika, sile, ki delujejo v zvočniku, itd. Meritve in izračuni so pokazali, da ima prototipni zvočnik solidno končno zvočno jakost in dober raven frekvenčni odziv znotraj svojega razpona frekvenc. Tudi izračuni in meritve so dokazali dobro ujemanje med sabo. Treba je tudi upoštevati, da za poganjanje izdelanega zvočnika ni uporabljen ojačevalac najboljše kvalitete. Za še boljši zvok je treba imeti boljše ojačevalnike. Meritve so tudi pokazale, da je prototipni zvočnik zelo usmerjen. Da bi se izognili usmerjenemu zvočniku, bi bilo treba ukriviti statorje, ki bi bolj razpršeno oddali zvok.

Prototipni zvočnik je izdelan po principu hibridnega sistema, ki združuje elektrostatičen zvočnik in dodaten zunanji nizkotonec, ki skrbi za nižje tone, kjer elektrostatičen zvočnik ne zmore. Celotni sistem je treba poganjati preko aktivne kretnice, ki skrbi, da zvočnika delujeta v določenem razponu frekvenc. Ugotovil sem, da sta za izdelavo potrebna strokovno znanje in strokovna pomoč. Čistim laikom ne priporočam izdelave, saj je treba imeti nekaj znanja o elektrotehniko in fiziki. Namen izdelave je prikaz, kako s strokovnim znanjem, pridobljenim na fakulteti, in nizkimi stroški izdelave narediti zvočnik, ki se lahko primerja z drugimi dragimi elektrostatičnimi zvočniki, primernimi za poslušanje visoko kakovostne glasbe.

Ključne besede: elektrostatičen zvočnik, elektrostatika, zvok

Abstract

The thesis presents the making of the electrostatic loudspeaker prototype which will serve as a sample and a model for improvement of two additional electrostatic loudspeakers destined for a lecture room wiring at the Faculty of Electrical Engineering, thus enabling an easier presentation of electrostatic force performance to the faculty students. Furthermore, the thesis also describes the performance of the electrostatic loudspeaker and its major characteristics which make it different from classic dynamic speakers that are most often used and known among people. After the electrostatic speaker prototype had been made, we measured and calculated its specifications, namely frequency characteristics, maximum sound level, speaker capacitance, working forces in the speaker. The measurements and calculations showed that the prototype has a solid final sound level and a good level of frequency response within its frequency span. In addition, the calculations and measurements showed good mutual consistency. It also has to be taken into consideration that the amplifier used was not of best quality. Therefore, better amplifiers should be used for better sound. The measurements also showed that an immersive speaker was much directed. To avoid directed speaker, stators should be curved for the sound to be more dispersed.

The prototype was made on the principle of a hybrid system that merges an electrostatic speaker and an additional outer subwoofer that ensures bass sound where the electrostatic loudspeaker cannot. The whole system has to be driven through an active switch which ensures that the two speakers work in the specific frequency span. The conclusion is that the making of the prototype loudspeaker requires professional knowledge and professional help. Lay people are not advised to make such a speaker, for they lack enough knowledge of electrotechnology and physics. The purpose of the making of the prototype was to show how to, with the knowledge acquired at the faculty and at low cost, make a speaker comparable with other more expensive electrostatic loudspeakers appropriate for listening to high-quality music.

Key words: electrostatic loudspeaker, electrostatics, sound

1 Uvod

Poslušanje dobro posnete in kvalitetne glasbe ob dobrem zvočnem sistemu pozitivno vpliva na človeka tako psihično kot fizično. Zato ni nič nenavadnega, da ima dandanes veliko glasbenih navdušencev dobre domače hi-fi avdio sisteme.

V hi-fi avdio sistemih poznamo več vrst in oblik zvočnikov, ki skrbijo za dober zvok. Najbolj znani so dinamični zvočniki, ki so sestavljeni iz membrane v stožčasti obliki. Ta je na širšem delu pritrjena na obroč, na ožjem pa na tuljavo, ki preko električnega toka deluje kot elektromagnet. Tuljava je na košaro pritrjena preko prožnega harmonikasto oblikovanega obroča, imenovanega pajek, pod njo pa se nahaja trajni magnet, ki povzroči magnetno polje. Ta nato ustvarja mehansko silo, ki premika tuljavo in nanjo pripeto membrano.

Elektrostatični zvočniki so po obliki precej drugačni od dinamičnih. Elektrostatičen zvočnik je sestavljen iz treh različnih komponent. Ena glavnih je membrana, izdelana iz tanke in zelo trde plastične plasti, premazane z izbrano prevodno snovjo, ki meji na dva statorja oziroma perforirani ploščati kovinski plošči. Ločujejo ju neprevodni distančniki, ki skrbijo, da se membrana in statorja med sabo ne dotikajo. Glavna značilnost, po kateri se elektrostatičen zvočnik razlikuje od dinamičnega, je, da prvi pri zelo majhni energiji veliko lažje in natančneje vibrira skozi zrak in posledično proizvaja kvalitetnejši zvok. Razlika pa je tudi v tem, da dinamični zvočnik s tuljavo ustvarja elektromagnetno polje in tako premika stožec ter zrak okrog njega, elektrostatični zvočnik pa premika mnogo večjo membrano ploščate oblike.

Eden večjih problemov elektrostatičnih zvočnikov je, da je zelo malo prostora med membrano in statorjem. Zaradi tega membrana ni zmožna proizvajati velikih odmikov, zato tudi težje proizvaja nizke frekvence in s tem nizke tone. Zato se ta sistem elektrostatičnih zvočnikov pogosto okrepi z nizkotonskim zvočnikom oziroma *subwooferjem*, ki poudarja nizke tone. Tako se izboljša celotna zvočna slika.

Na splošno velja, da dobri hi-fi zvočni sistemi niso finančno dostopni. Ker pa je na spletu veliko navodil in forumov o izdelavi elektrostatičnih zvočnikov kar doma, se veliko uporabnikov odloči za to rešitev. Zato sem se tudi sam odločil, da v sklopu diplomske naloge s pomočjo Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani izdelam prototipni elektrostatični zvočnik in dva dodatna elektrostatična zvočnika, ki bosta montirana v predavalnici in bosta namenjena študijski uporabi.

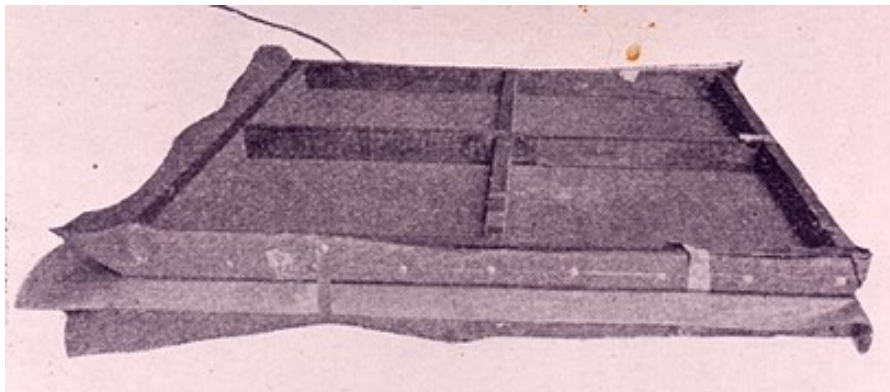
Za temo diplome, elektrostatični zvočnik, sem se odločil, ker me delo z zvokom veseli in želim še bolje spoznati načine ter delovanje drugih tipov zvočnikov poleg klasičnih dinamičnih zvočnikov, ki so najpogostejše uporabljeni za poslušanje glasbe. Namen diplomske naloge je predstaviti razvoj elektrostatičnih zvočnikov skozi čas ter opisati glavne komponente elektrostatičnega zvočnika, delovanje, izdelavo in meritve prototipnega izdelka. Z izdelavo in meritvami prototipnega zvočnika sem potrdil, da imajo ti zvočniki zelo dobro frekvenčno karakteristiko in lastnosti ne glede na kvaliteto izdelave, ter obrazložil, zakaj so boljši od dinamičnih.

2 Opis in delovanje elektrostatičnega zvočnika

Elektrostatičen zvočnik ni dobro poznan med ljudmi, saj se po obliki precej razlikuje od ostalih zvočnikov. Bolj znan je dinamičen zvočnik v obliki stožca. Elektrostatičen zvočnik je navadno visok in ozek, serijski zvočniki pa so dodatno ukrivljeni za boljšo pokritost prostora. Da bomo bolje razumeli ta zvočnik, je dobro poznati njegov razvoj in zgodovino.

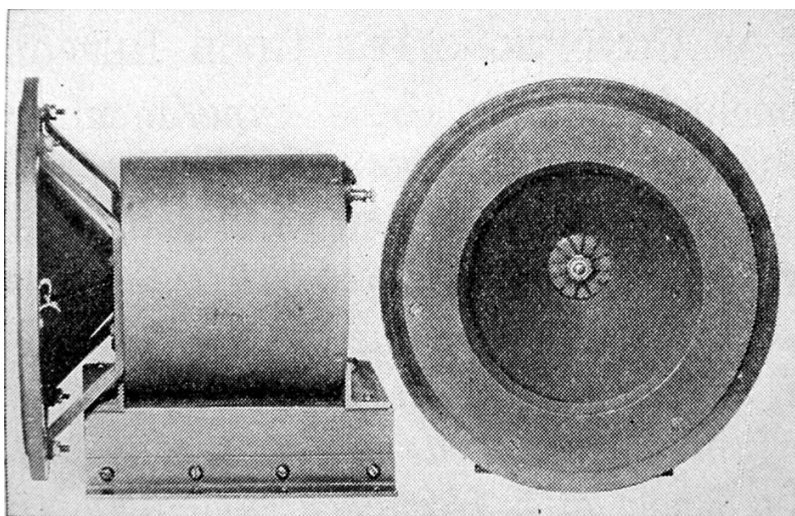
2.1 Razvoj elektrostatičnih zvočnikov

V nadaljevanju je opisana kratka zgodovina ter razvoj prvih elektrostatičnih zvočnikov, ki je povzeta s spletne strani izdelovalcev serijskih zvočnikov *Martin Logan* [3]. Prvi elektrostatičen zvočnik sta izdelala W. Rice in Edward W. Kellogg leta 1923. Za ta projekt sta bila imenovana s strani *Bell Telephone Laboratories*, ki je bil takrat eden bolj opremljenih laboratorijev. Elektrostatični zvočnik (v nadaljevanju ESZ) je bil takrat bipolaren zvočnik, enak dimenziji vrat. Membrana je bila narejena iz prašičjega črevesja in pokrita s finimi zlatimi listi. Težava te membrane je bil organski izvor, kar pomeni, da je sčasoma začela razpadati in smrdeti. Ko sta Rice in Kellogg začela predvajati nove izrezane električne plošče preko ESZ, je bila javnost zelo presenečena in navdušena. ESZ je proizvajal edinstven zvok, ki v tistem času iz zvočnika še ni bil slišan. Prekašal je trobljenje in vreščanje akustičnega gramofona, ki je tedaj postal zastarel. Zaradi velikega navdušenja so veliko časa namenili razvoju ESZ, vendar so kmalu naleteli na težave, s katerimi se srečujejo tudi današnji oblikovalci. Raven zvočnik zahteva veliko površino za reprodukcijo nizkih frekvenc zvočnega spektra, zato ravno zaradi velikosti ESZ niso bili uporabni za komercialni namen. Uprava *Bells* laboratorija je tako prenehala investirati v ESZ, razvoj pa je za naslednjih 30 let stagniral.



Slika 2-1: Eden prvih elektrostatičnih zvočnikov [15]

V času velike krize, leta 1930, je avdio potrošnik skoraj izumrl. Novi električno ojačan zvočnik se ni nikoli uveljavil, saj je večina ljudi še naprej uporabljala svoje zastarele akustične gramofone. V poznih 40. letih 20. stoletja je avdio industrija doživela velik preporod. Nenadoma je bilo ogromno zanimanja za avdio izdelke in s tem veliko povpraševanje po boljših avdio komponentah. Najprej se je uveljavil zvočnik v obliki stožca, ki je razvijalcem postavil nov izziv.



Slika 2-2: Eden prvih stožčastih zvočnikov [14]

Leta 1947 je Arthur Janszen, mlad pomorski inženir, sodeloval pri projektu za mornarico, kjer so želeli razviti boljši inštrument za testiranje mikrofонов. Ta inštrument je moral biti zelo natančen zvočnik, zato je Janszen verjel, da je zaradi linearnosti ESZ boljši kot zvočnik stožčaste oblike. Zato je zgradil model z zelo tanko plastično membrano, obdano s prevodno oblogo. Rezultat je bil zelo dober; dosežena je bila izjemna amplitudna linearnost.



Slika 2-3: Janszenov elektrostatičen visokotonski zvočnik [3]

Janszen je bil tako navdušen nad rezultati, da je začel raziskovati ESZ tudi v prostem času. Do leta 1952 je izdelal elektrostatičen visokotonski zvočnik, ki je bil primeren za komercialne namene. Ta visokotonski zvočnik je bil tisti čas velika senzacija med ljudmi, ki so seanimali za zvok. Ker pa je bil namenjen samo visokim frekvencam, so se pogosto zraven znašli tudi nizkotonski zvočniki, ki so izpopolnjevali zvočni sistem. Taki sistemi so bili zelo cenjeni pri vseh avdio navdušencih.

Leta 1955 je Peter Walker objavil tri članke v zvezi z elektrostatičnim oblikovanjem zvočnikov v britanski reviji *Wireless World*. V njih je opisal večje koristi elektrostatičnega zvočnika v primerjavi z navadnim. Tako je leta 1956 na



Slika 2-4: Quad ESL-57 [3]

podlagi svojih člankov izdelal zdaj slavni *Quad ESL*. Ta zvočnik je zaradi natančnosti pri proizvodnji zvoka takoj postavil nov standard zmogljivosti za avdio industrijo. Vendar se je pri uporabi tega zvočnika pojavilo kar nekaj problemov. Ni bil dovolj glasen ter je zelo slabo deloval pri nizkih frekvencah. Bil je zelo usmerjen, moč pa je bila omejena na 70 vatov, zato se je uporaba stožčastih zvočnikov nadaljevala.

V zgodnjih 60. letih 20. stoletja je Janszen združil moči z zvočniškim podjetjem *KLH* in predstavili so *KLH 9*. Zaradi velikosti *KLH 9* ni imel toliko zvočnih omejitev kot *Quad*. *KLH 9* je lahko igral bistveno glasneje in nižje kot *Quad ESZ*. Tako se je rodilo tudi rivalstvo med proizvajalci.



Slika 2-5: KLH 9 [18]

Janszen je še naprej razvijal elektrostatičen model zvočnika. Bil je ključnega pomena pri razvoju zvočnikov *Koss model one*, *Acoustech* in *Dennesen speakers*. Roger West, vodja razvoja pri Janszenovem podjetju, je postal predsednik Sound Lab. Ko je bilo Janszenovo podjetje prodano, je RTR podjetje, ki se je ukvarjalo z izdelavo zvočnikov, kupilo polovico proizvodnje za izdelavo zvočnikov. Ta je bila uporabljena za izdelavo elektrostatičnih statorjev za *Servosatic*, hibridni elektrostatičen sistem, ki je bil prvi produkt podjetja *Infinity*.

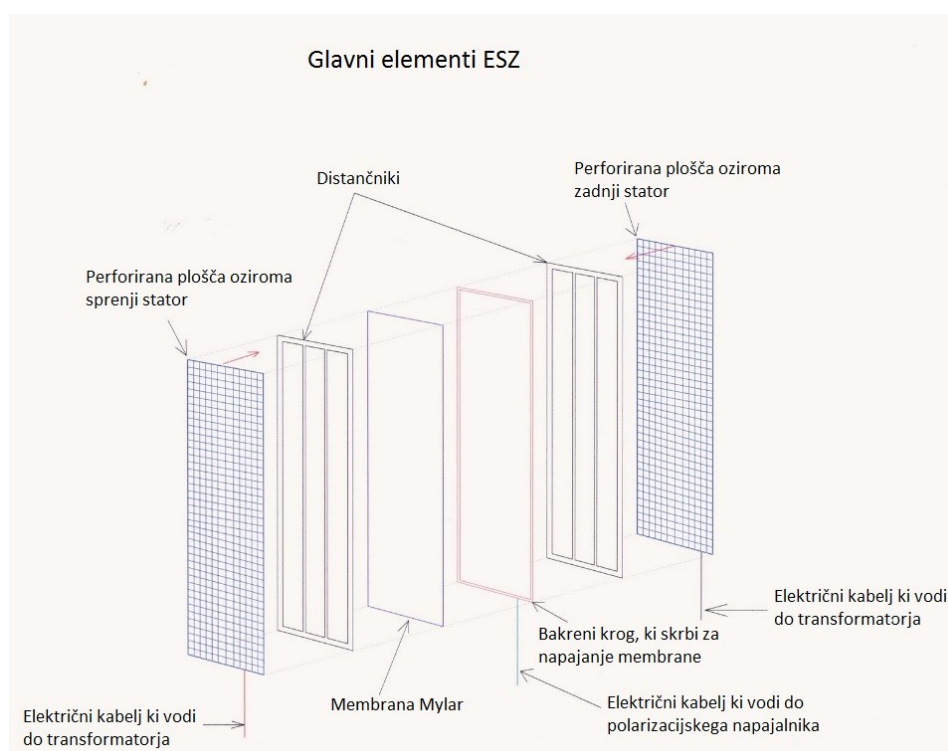
Slabe disperzijske lastnosti zgodnjih modelov so bile izboljšane z uporabo zakasnitvenih linij, akustičnih leč, več nizov plošč in z ukrivljanjem membrane. Prav tako sta se povečali moč in občutljivost zvočnikov. Dandanes so ESZ še vedno zelo neznani med širšo javnostjo. Menim, da zaradi cenovne nedostopnosti in velikosti. V nizkocenovnih zvočnih sistemih so navadno uporabljeni dinamični oziroma stožčasti

zvočniki. Ti ne potrebujejo velike moči za proizvodnjo zvoka ter so cenovno ugodni za masovno izdelavo, saj je veliko proizvajalcev teh zvočnikov. ESZ pa potrebujejo veliko električne energije in predznanja o ravnanju z njimi, kar pri dinamičnih ni potrebno.

2.2 Osnove elektrostatičnega zvočnika

Tak zvočnik sestavljajo tri plasti oziroma komponente: 2 statorja oziroma prevodni plošči in tanka prevodna membrana, ki je kot v sendviču vpeta med njima. Skozi zunanji plošči teče tok tako, da se na eni strani nabere pozitiven naboj, na drugi pa negativen. Sredinska membrana je navadno iz zelo tanke, lahke in zelo trdne plastike, ki je premazana z izbrano prevodno snovjo.

Ko zvočnik prebira avdio signal, si statorja izmenjujeta naboj, zato se membrana premika naprej in nazaj med zunanjsima statorjema. Ko ima sprednji stator, ki gleda proti slušatelju, pozitiven naboj, se membrana, ki ima ves čas pozitiven naboj, pomakne proti zadnjemu statorju z negativnim nabojem; obratno se zgodi, ko se spremenita naboja na statorju. Pri tem premikanju membrane se premika tudi zrak okoli nje in s tem ustvarja zvok [1, strani 11–14].



Slika 2-6: Glavne komponente elektrostatičnega zvočnika [13]

2.3 Glavne komponente zvočnika

Elektrostatičen zvočnik je sestavljen iz treh glavnih delov:

- membrana,
- dva statorja oz. perforirani kovinski plošči,
- distančniki.

Membrana je gibljivi del elektrostatičnega zvočnika in večina teh zvočnikov ima po eno membrano. Statorja sta električno prevodni nepremični plošči, ki premikata membrano. Tipično se na zvočniku uporabljata dve prevodni plošči, lahko pa se tudi samo ena. Distančniki ločujejo stik med membrano in statorjema. So v neposrednem fizičnem stiku s statorjema, zato morajo imeti izjemno dobre električne izolacijske lastnosti, da je naboj na membrani ločen od naboja na statorju [1, stran 11].

2.3.1 Membrana

Membrana je narejena iz izredno tanke, trdne in lahke plastične folije, ki mora biti zelo napeta, kot opna bobna. Membrana poganja zrak v prostoru in s tem nastane zvok. Masa membrane je enaka masi plasti zraka, ki je debela 6,3 mm. V primerjavi s sobnim zrakom je to nepomembno, zato lahko v praktične namene membrano zvočnika obravnavamo kot brezmasno [1, stran 11].

Membrana mora imeti več kilovoltov elektrostatičnega naboja, ki jih proizvaja visokonapetostni napajalnik. Ker je plastična folija izolator, je treba eno stran folije narediti prevodno, da bo sprejemala elektrostatične naboje. Obstaja veliko materialov,



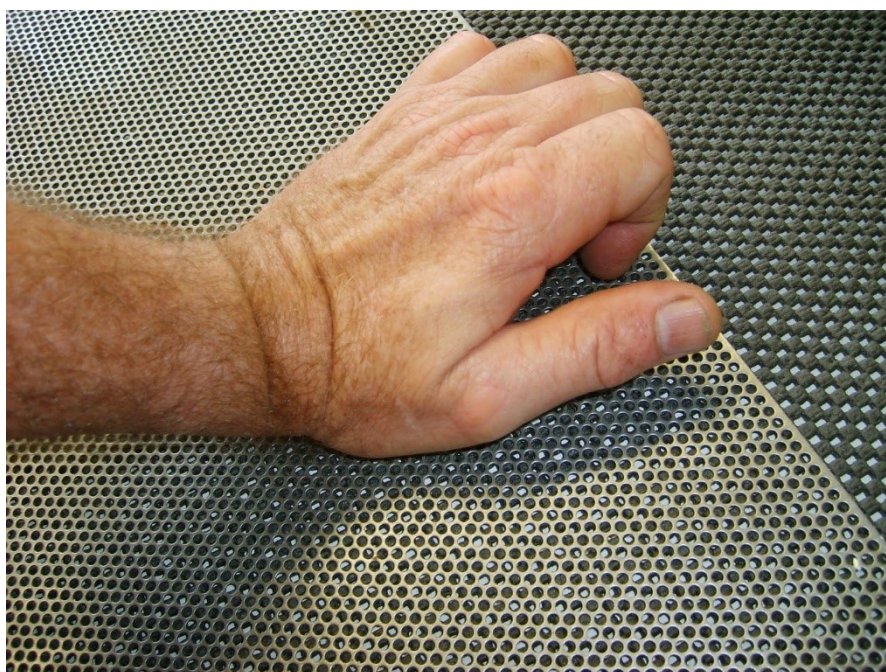
Slika 2-7: Membrana oz. plastična folija [6]

ki ustvarjajo prevodnost nekega materiala. Najpogostejša rešitev za domačo izdelavo elektrostatičnega zvočnika je uporaba prevodnega razpršila pod tlakom, ki s premazom ustvari prevodnost membrane [1, stran 11].

Vedeti moramo, da je naboj statičen in se ne premika. Če ne bi bilo majhnih izpustnih poti elektronov, bi napajalnik zavrgel membrano, polno nabojev. Te izpustne poti povzročata prah in vodna para oziroma vlaga. Če v praksi odstranimo napajalnik, lahko zvočnik predvaja zvok še nekaj ur, ampak zvok postopoma jenja, ker se naboj počasi prazne [1, stran 11].

2.3.2 Stator ali prevodna perforirana kovinska plošča

Elektrostatična membrana se ne giblje sama po sebi, ampak jo premikata statorja oziroma prevodni perforirani kovinski plošči. Stator je električno prevoden in je akustično transparentna plošča ali mreža. Ta plošča je v mirovanju in je odmaknjena od membrane le toliko, da se ne dotikata. Stator predstavlja močno električno polje na membrani, a mora hkrati omogočiti prodor zvoka, zato mora imeti luknje ali reže. Njihova oblika in velikost sta zelo pomembni, saj vplivata na gradnjo, strošek in učinkovitost zvočnika [1, strani 11–12].



Slika 2-8: Stator ali perforirana kovinska plošča [13]

2.3.3 Distančniki

Distančniki držijo razdaljo med membrano in statorjem, ki je ključnega pomena. Če je prevelika, bo izhodni zvok zelo nizek oziroma neobstoječ. Če pa se membrana dotakne statorja, se ne more premikati, kar pomeni, da ne proizvaja zvoka. Tedaj se bo statični naboj na membrani izgubil na statorju. Distančniki morajo biti tudi odličen električni izolator. Običajno so narejeni iz plastike ali samolepilne gume, ki je prosto dostopna, cenovno ugodna ter enostavna za montažo [1, stran 12].

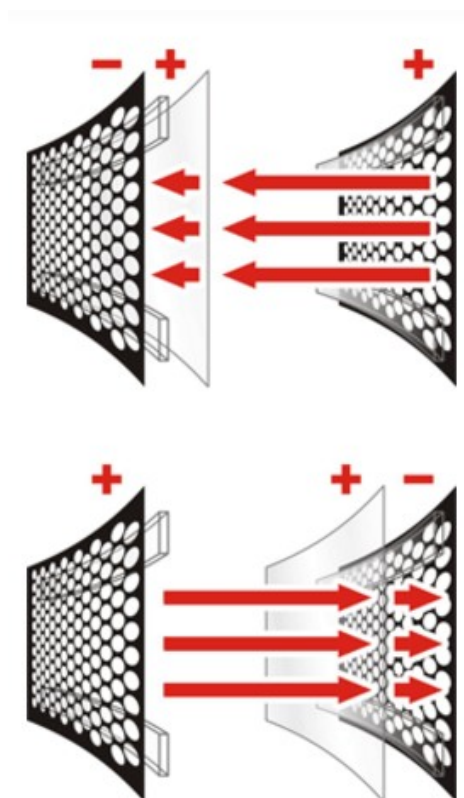


Slika 2-9: Distančnik oz. dvostranski lepilni trak [9]

2.4 Delovanje in lastnosti elektrostatičnega zvočnika

Ko združimo membrano, statorja in distančnike, dobimo elektrostatično celico oziroma panel. Elektrostatičnemu zvočniku z enim samim statorjem angleško pravimo *single-ended*, kar je poslovenjeno 'enojno zaključen'. Zvočniku, ki vsebuje samo en stator in membrano, lahko rečemo tudi kondenzator, saj shranjuje nabite elektrone, tako kot kondenzator. Pomembna značilnost elektrostatičnih zvočnikov je kapacitivnost, saj ojačevalcem predstavlja veliko električno obremenitev. Kapacitivnost zvočnika prav tako predstavlja veliko težav za zvočnik [1, stran 11-14].

Električna sila pada s kvadratom razdalje med statorjem in membrano, zato spreminjanje razdalje povzroči eksponentno spremembo sile, ki jo sprejme membrana, in ta ni linearna. Zato lahko pri elektrostatičnem zvočniku z enim samim statorjem pride do nelinearnega popačenja, razen če je gibanje membrane izredno majhno. Da bi se temu izognili, vsi novejši elektrostatični zvočniki uporabljajo dva statorja. Takemu sistemu angleško pravimo *push/pull drive system*. Ta je sestavljen iz statorjev na obeh straneh membrane. Ker sem tudi sam naredil tak zvočnik, bom nadaljeval z opisom tega sistema [1, stran 11-14].



Slika 2-10: Prikaz delovanja ESZ [12]

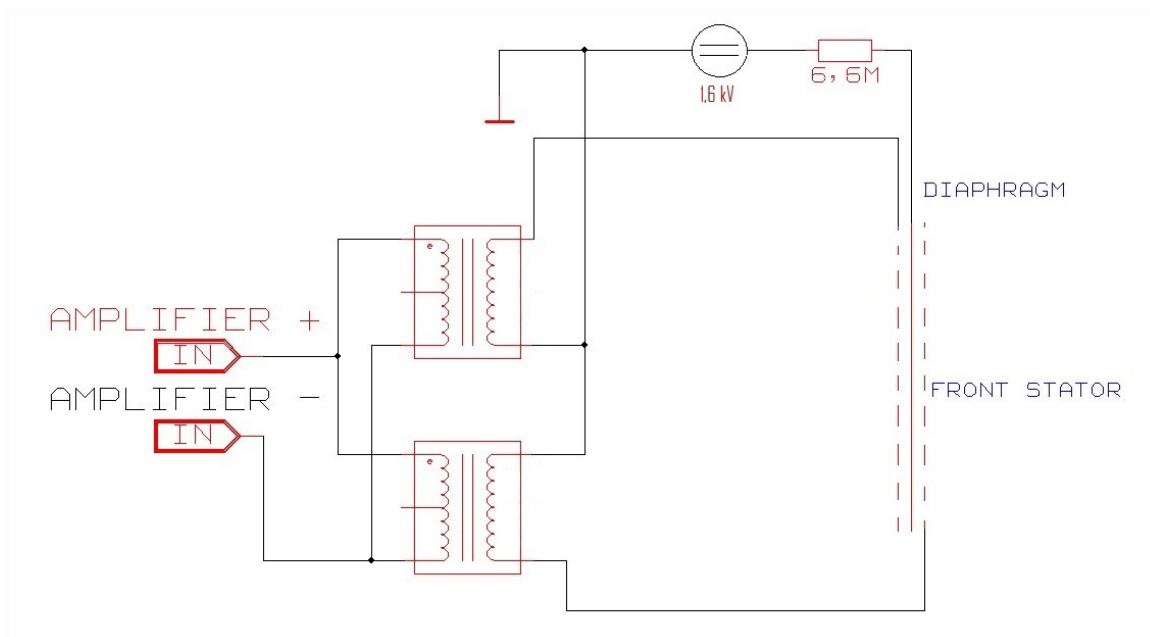
Audio ojačevalnik daje napetost na statorje, kot določa glasba, ki se predvaja preko njega. Nasprotni elektrostatični sili se med seboj privlačita kot magnetna sila. Če ima membrana pozitiven naboj in stator v danem trenutku negativen naboj, bo stator privlačil membrano. Če pa sta oba pozitivna, bo sila odganjala membrano. Hitro spreminjajoče se polaritete ojačevalnika povzročijo, da se membrana približa statorju in nato odbija od njega. To delovanje potiska zrak in ustvarja zvočne valove [1, stran 11-14].

Kot zahteva glasba, ojačevalnik spreminja frekvenco napajalne napetosti statorjev. Višje so napetosti statorjev, močnejša je interakcija s statičnimi naboji na membrani. To ustvarja večjo silo, kar pomeni več gibanja membrane, večjo amplitudo zračnih valov in glasnejši zvok. Električno gledano glasba pomeni le spremembo frekvence in napetosti. Frekvenčni vzorci opredeljujejo tip zvoka (klavir, kitara, orkester ...) in napetost regulira glasnost. Običajnim ojačevalnikom primanjkuje napetosti za poganjanje elektrostatičnih zvočnikov na ustrezno raven učinka. Zato smo

primorani uporabiti transformator med ojačevalnikom in elektrostatičnim zvočnikom, ki poveča moč ojačevalnika do nekaj tisoč voltov [1, stran 11-14].

Nelinearno povečanje sile na membrani, ko se približuje enemu statorju, je uravnoteženo z nelinearnim zmanjševanjem sile na membrani, ki se giblje proč od drugega statorja. Neto učinek je, ko membrana »čuti« konstantno silo in se premika linearno. Potrebno je omeniti, da je gibanje linearno kjer koli med dvema statorjema. Pozitivna lastnost tega je, da kakovost zvoka ni prizadeta zaradi toleranc izdelave, čeprav vpliva na količino zvoka. To je pomembno, ker je nemogoče zgraditi statorje in membrane popolnoma ravne in enakomerno oddaljene drug do drugega. To pa zna biti dobra informacija za vse amaterske graditelje tega zvočnika, saj zagotavlja odličen zvok ne glede na kvaliteto izdelave celotnega zvočnika [1, stran 11-14].

Pri ESZ mora naboj na membrani ostati negiben. Če se premika, ko membrana spreminja položaj med statorjema, se bodo sile na membrani spremenile. To povzroči nelinearno distorzijo [1, stran 11-14].



Slika 2-11: Električna shematika prototipnega elektrostatičnega zvočnika

Slika 2-11 kaže poenostavljen shematski prikaz električnega pogonskega sistema, ki je potreben za prototipni zvočnik. Električna pot poteka od membrane skozi polarizacijski napajalnik ter skozi polovico transformatorskega sekundarnega navitja do statorjev. Naboj na membrani lahko sledi tej poti in spremeni vrednost, ko se prelije v en ali drugi stator [1, stran 11-14].

ESZ potrebuje več elektronskih komponent kot dinamični zvočniki. To so lahko: avdio ojačevalnik, transformator, kretnica, izenačevalnik (*equalizer*) in visokonapetostni polarizacijski napajalnik. Večina ESZ uporablja vse te komponente, nekateri bolj specializirani zvočniki pa uporabljajo samo nekatere od njih [1, strani 11–14].

2.4.1 Polarizacijska napetost

Statična napetost na membrani je polarizacijska (angl. *bias*) napetost. Ta medsebojno sodeluje z naboji na statorjih, da se membrana lahko premika. Višja kot je polarizacijska napetost, močnejše so elektrostatične sile. Za maksimalen izkoristek je potrebno uporabiti čim večjo polarizacijsko napetost. S tem pridobimo več gibanja membrane. Ampak veliko povečanje te napetosti lahko povzroči veliko težav. Ena od njih je iskrenje zaradi izpada napetosti skozi zrak, ki je slab izolator. Nekaj tisoč voltov na membrani lahko preseže njene izolacijske lastnosti ter povzroči iskro med membrano in statorjem. To je zelo nadležno, ker iskra ustvari neprijeten zvok in za trenutek zmanjša raven glasnosti zvočnika. Lahko pa tudi poškoduje zvočnik oziroma stopi in preluknja membrano, uniči prevodni premaz in povzroči vžig. Nastale luknjice so zelo majhne, vendar ne vplivajo na kvaliteto zvoka, dokler ne postanejo velike in številne [1, strani 25–27].

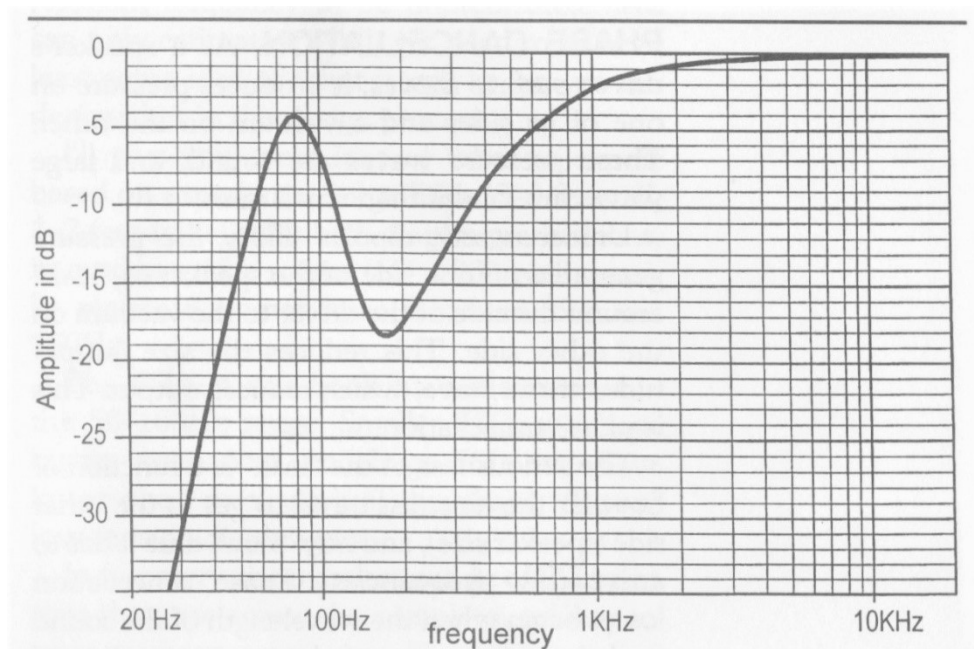
2.4.2 Napetost oziroma nateg membrane

Povečanje napetosti membrane poveča obnovitveno silo (angl. *restoring force*). To ima ogromen vpliv na končno glasnost ali *output* zvočnika. Če želimo imeti visoko glasnost, je potrebno maksimalno napeti membrano. Večja je napetost membrane, večji je prag nestabilnosti, večja je lahko polarizacijska napetost in s tem glasnost. Lahko pa tudi z nizkim nategom membrane povzročimo nižjo resonančno frekvenco, kar pripomore h glasnejšemu in boljšemu odzivu nižjih tonov [1, strani 27–28].

2.4.3 Frekvenčni razpon

Gonilne sile v ESZ so linearne in točne. Majhna masa ESZ povzroči, da zvočnik poganja zrak direktno, zato pričakujemo, da ima perfekten frekvenčni odziv. Ampak žal ni tako, saj imajo resne težave z visokimi in nizkimi frekvencami. Slika 2-12 prikazuje klasičen frekvenčni odziv – *full range* – ESZ, ki ga imajo zvočniki, večji od

50 cm. Masa membrane ESZ je omejena na visokofrekvenčnem odzivu, ampak po navadi to ni težava, ker je zgornja meja nadzvočna [1, strani 15–16].



Slika 2-12: Klasični frekvenčni odziv *full range* ESZ [1, stran 15]

Dve jasni težavi škodujeta nizkofrekvenčnemu odzivu: fazna odpoved (zamik) in osnovna resonanca. Normalno ESZ deluje kot dipolni oziroma dvostranski zvočnik. To pomeni, da nima ohišja, tako da se zvok širi z obeh strani statorjev zvočnika. Potrebno se je tudi izogibati ohišju oz. zaprtju zvočnika, ker povzroča resonanco in difrakcijo, obe pa škodita zmogljivosti zvočnika. Pri navadnih dinamičnih oziroma magnetnih zvočnikih ohišja ne moremo izključiti, kar je tudi razlog, da zvok ni tako čist kot pri ESZ. Dipolna operacija je boljša, ampak je uporabna samo pri velikih zvočnikih [1, strani 15–16].

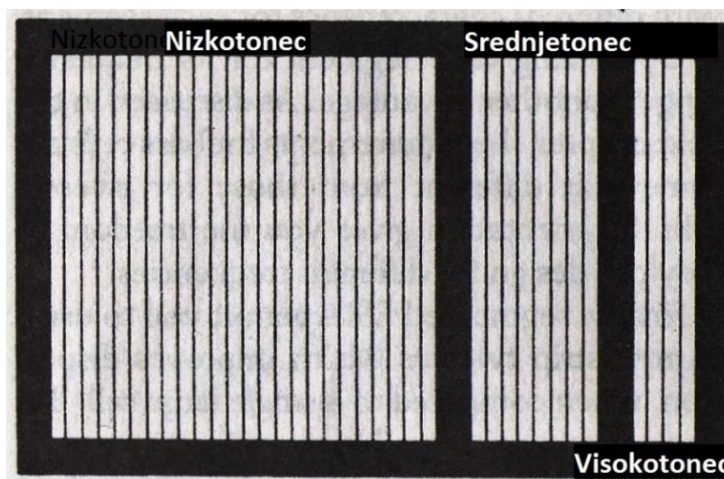
Treba je tudi razjasniti, kaj je fazna odpoved. Ko se membrana premika, proizvaja tlak oziroma silo na eni strani in vakuum na drugi strani. Ti tlačni valovi so zvok in večji valovi so glasnejši od manjših. Na žalost dipola omogočata, da tlak, ki je bil narejen na eni strani zvočnika, uhaja na drugi strani zvočnika, kjer je vakuum. To zmanjša amplitudno valovanje, kar povzroči zmanjšanje izhodne moči (*output*) zvočnika [1, strani 15–16].

2.4.4 Vrste ESZ

Do zdaj smo govorili o ESZ, ki je kot ena velika celica, enakomerno gnana po vsej površini zvočnika. ESZ se lahko razdeli na različne segmente oziroma trakove, ki so samostojno poganjani na različnih frekvencah. Ti segmenti se običajno razlikujejo po velikosti in zmogljivosti. Majhni segmenti delujejo kot visokotonski, veliki pa kot nizkotonski, kot recimo klasični dvo- ali trisistemski dinamični zvočniki [1, stran 21].

2.4.4.1 Segmentacija zvočnika

Segmentacija zvočnika nadzoruje fazno odpoved z zmanjševanjem jakosti določenega segmenta, ko se jakost frekvenc poveča. Gledano z druge smeri, gnana površina se poveča, ko frekvenca upada. Rezultat tega je več nizkih frekvenc v povezavi z visokimi, kar kompenzira fazno odpoved. To je bila običajna metoda, ki je reševala težave s komercialnimi ESZ v 50. in 60. letih 20. stoletja, čeprav se več ne uporablja v trenutnih modelih. Prvotni QUAD in KLH 9 sta bila segmentirana. KLH 9 je imel 4 velike nizkofrekvenčne panele in enega majhnega visokofrekvenčnega. Kretnica je razdelila vhodni signal ojačevalca na 2 dela. En signal je bil namenjen nizkim frekvencam oziroma večjim segmentom, drugi pa visokim frekvencam oziroma manjšemu segmentu. QUAD pa je bil oblikovan v trisistemski zvočnik. Vseboval je 3 segmente zvočnika: visokotonec, srednjetonec in nizkotonec.



Slika 2-13: Prikaz segmentacije ESZ [1, stran 21]

To je zagotovilo tesnejše približevanje frekvenčnih krivulj med njimi, vendar so bili še zmeraj daleč od popolnosti. Segmentni zvočniki imajo težave v nelinearnem frekvenčnem odzivu med različni segmenti, zato ne proizvajajo gladkega frekvenčnega odziva, ki je potreben za natančno produkcijo zvoka. Poleg tega je

potrebno dobro nastaviti odziv frekvenc med paneli, ker imajo velike izhodne omejitve. Zmanjšanje gnanega območja zmanjša izhodno moč visokih frekvenc, da se ujame s šibkim nizkofrekvenčnim panelom. Ker pa je membrana na nizkofrekvenčnih panelih bolj oddaljena od statorjev, da lažje proizvaja nizke frekvence, potrebuje več moči, da je celotni zvočni sistem prilagojen na končno izhodno moč [1, strani 21–22].

2.4.4.2 Hibridni sistem

Prednosti ESZ na nizkih frekvencah niso potrebne, saj imajo težavo s frekvenčnim odzivom in jakostjo. Bolj smiselno je, da to delo nadomesti nizkotonski dinamični zvočnik, angl. *woofer*, ker tam deluje najbolje. Za srednje in višje tone pa poskrbi ESZ, ki je za to področje specializiran. Sistemu, ki vsebuje dinamični nizkotonec in ESZ, rečemo tudi hibridni sistem. Dinamični nizkotonec zagotavlja raven frekvenčni odziv in nizke frekvenčne zmogljivosti. Magnetni *wooferji* premagajo ESZ v tej kategoriji. So tudi veliko manjši s podobnimi zmogljivostmi. Vsi moderni ESZ so v večini hibridi. Izdelava in nastavitve dobrega hibridnega sistema ni tako lahka, vendar je možna, da je zvok tako čist kot klasični *full range* ESZ. Hibridni sistem pa ima tudi nekaj slabosti, kot so zapletenost, velikost in strošek. Hibridi zahtevajo tudi krenico, dvokanalni ojačevalec (angl. *BI-amp*), ohišje nizkotonca, dodatno delo in prostor [1, strani 22–23].



Slika 2-14: MartinLogan hibridni ESZ [3]

2.4.5 Kapacitivnost ESZ

Kapacitivnost je tudi ena od pomembnih lastnosti elektrostatičnega zvočnika. Kapacitivnost je električna obremenitev, ki jo mora poganjati ojačevalnik. Spodaj je matematična enačba, ki se pogosto uporablja za izračun kondenzatorjev oziroma kapacitivnosti elektrostatičnega zvočnika, ki temelji na razmiku med dvema ravnima, nepreluknjanima satorjema in membrano (S/M) [17, stran 159].

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{2d},$$

kjer je C kapacitivnost z enoto μF , A površina satorja, ε_0 konstanta in d razmik med satorjem in membrano [1, stran 53].

S to enačbo lahko le približno ugotovimo kapacitivnost, saj ne vemo natančne dimenzije med satorjem in membrano. Poznamo le debelino distančnika, vendar to ni dovolj točen podatek, saj lahko tudi drugi faktorji vplivajo na S/M razmik. Distančnikov material je zelo prožen in se ga zlahka stisne skupaj, zato lahko izgubi prvotno debelino. Prav tako ne vemo, kakšno debelino povzroči premaz membrane s prevodnim sprejem. Tudi satorji niso čisto ravni, prav tako ni lesen okvir, ki skupaj s pokrovom stisne celico. Skratka, natančna dimenzija razmika S/M nam ni znana. Roger R. Sanders meni, da minimalna sprememba S/M razmika povzroči velike spremembe v kapacitivnosti in da zgornja enačba ne more zagotoviti natančne vrednosti kapacitivnosti [1, strani 53–54].

Standardna enačba za kondenzatorje temelji na kapacitivnosti, ugotovljeni med dvema trdnima ploščama. Satorji so polni lukenj oziroma odprtini. Zaradi velikosti lukenj naj gostota satorjevega polja ne bi bila višja od trdne nepreluknjane plošče. Če uporabimo dodatno izolacijo med distančniki in membrano, se pojavi še ena spremenljivka, katere dielektrične lastnosti vplivajo na spremembo kapacitivnosti. Prav tako se povečuje razmik S/M. Te neznanke niso praktične za natančno izračunavanje kapacitivnosti zvočnika, zato je bolj smiselno, da slednjo izmerimo z inštrumentom. Izmerjena vrednost kapacitivnosti prototipnega zvočnika oziroma kapacitivnost med dvema satorjema znaša 600 pF pri 1 kHz. Izračunana vrednost kapacitivnosti po zgornji enačbi pa je 587 pF, če upoštevamo 2,2 mm S/M razmik in površino zvočnika 0,292 m², kar privede do spoznanja, da enačba za izračun kapacitivnosti kondenzatorjev ni tako nenatančna, kot pravi Roger R. Sanders.

2.4.6 Elektrostatična sila na membrani

V elektromagnetnem polju delujejo sile, ki so pomembne za delovanje zvočnika. Za izračun elektrostatične sile na membrani je potrebno poznati enačbo za kapacitivnost membrane med statorjema, ki smo jo že opisali [17, strani 171–172]:

(1)

$$C_{membrana} = 2\varepsilon_0 \frac{A}{d},$$

kjer je A površina zvočnika, d je S/M razmik in ε_0 konstanta, ki je enaka 8.854×10^{-12} F/m. Pri tej enačbi je potrebno zanemariti zmanjšanje kapacitivnosti zaradi lukenj v statorju. Skupna kapacitivnost se tudi spreminja, ko se membrana premika, narašča pa, ko se oddaljuje od ravnovesja.

Izračun celotnega polarizacijskega naboja Q med membrano in statorjem, na katerega vplivajo sile, je tak:

(2)

$$Q_p = C_{membrana} \times U_p = 2\varepsilon_0 \frac{A}{d} U_p,$$

kjer je U_p polarizacijska napetost. Ker Q ostane nespremenjen, sledi, da se bosta kapacitivnost in V spreminjala v obratnem razmerju med seboj. Nato privedemo napetostni signal med statorja, ki ustvarita električno polje E_s med sabo:

(3)

$$E_s = \frac{U_{sig}}{2d},$$

kjer je U_{sig} napetostni signal, ki deluje na statorjih. Ta pa se izračuna tako:

(4)

$$U_{sig} = U_{rms} \times R_t \times \sqrt{2},$$

kjer je U_{rms} maksimalni izhod napetosti ojačevalca, ki je priklopljen na transformator, R_t je razmerje transformatorja, $\sqrt{2}$ pa pomnožimo, da pridobimo *peak* oziroma vrh vrednosti signala. Po zagonu napetostnega signala med statorjem nastane električno polje, ki povleče polarizacijski naboj s silo:

$$F = E_s \times Q_p,$$

ki se s pomočjo enačb 2, 3 in 4 spremeni v [17, stran 171]:

$$F = \varepsilon_0 \frac{A}{d^2} U_{pol} U_{sig},$$

kjer je sila podana v njutonih (N). Tako dobimo enačbo za izračun elektrostatične sile na membrani pri določeni vhodni napetosti. Za prototipni zvočnik velikosti 0,97 m x 0,3 m in membrano z S/M 2,2 mm razmika, polarizacijske napetosti 1,6 kV in napetosti signala na statorju 730 V vrha oziroma *peaka* so sile v razponu 0,62 N. Ker pa en stator oddaljuje membrano z enako silo kot drugi, ki jo privablja, moramo silo pomnožiti z dva. Sile na membrano delujejo v razponu 1,24 N.

Zgornja analiza zanemarja kakršno koli izgubo nabojev, ki lahko nastanejo na membrani. Prav tako zanemarja dejstvo, da se bo sila razlikovala glede na položaj membrane med statorjema. Vendar nam to lahko da splošno predstavo o tem, kaj se dogaja v elektrostatičnem zvočniku in kakšne sile so na delu [7, stran 4].

2.4.7 Zvočni tlak ESZ

Po tretjem Newtonovem zakonu mora biti sila v ravnovesju z zračnim pritiskom oziroma z zvočnim tlakom na obeh straneh membrane. Zaradi simetrije je zračni pritisk na obeh straneh enak po velikosti, vendar z nasprotnim predznakom [17, stran 172]. Za izračun zvočnega tlaka potrebujemo tudi vrednost signalnega toka na statorjih, ki se izračuna po tej enačbi:

$$I_{sig} = 2\pi f C U_{sig},$$

kjer je f frekvenca, kjer je bila izmerjena kapacitivnost. Naš izmerjeni tok v statorjih znaša 2,3 mA.

Maksimalna izhodna moč elektrostatičnega zvočnika je tudi sorazmerna z maksimalno močjo elektrostatične sile, ustvarjene med membrano in statorjema. Ta vrednost je vsota polarizacijske napetosti in vrha oziroma *peaka* napetosti signala, ki se uporablja na statorjih. Ko je ta skupna vrednost prevelika, se pojavi dielektrična preobremenitev zraka med membrano in statorjem. Da bi se temu izognili, nastavimo polarizacijsko napetost hkrati z maksimalno predvideno signalno napetostjo tako, da sta nekoliko manjši od preobremenitve zraka [7, stran 7].

Največjo silo, ki lahko nastane, smo izračunali v prejšnjem podnaslovu. Izračun zvočnega tlaka pa se izračuna po izpeljavi *Walkerjeve* enačbe:

$$p_{rms} = \frac{I_{sig}}{r} \frac{V_{pol}}{d} \frac{1}{2\pi c},$$

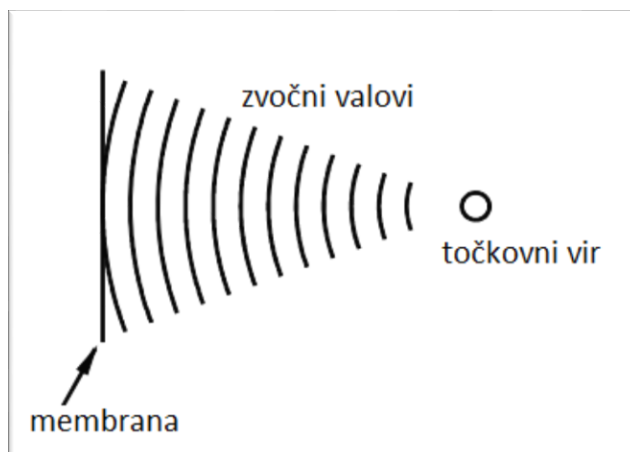
kjer je p_{rms} zvočni tlak oziroma efektivna vrednost zvočnega tlaka, I_{sig} signalni tok na statorjih, V_{pol} polarizacijska napetost, c hitrost zvoka (343 m/s), r merilna razdalja zvoka in d razmik med membrano in statorjem (S/M). Enota za tlak je N/m². Izračunani zvočni tlak pri našem prototipnem zvočniku znaša 0,776 N/m². Zvočnik naj bi imel po izračunu pri maksimalni izhodni moči ojačevalnika 12 V maksimalno raven zvočnega tlaka 91,7 dB. Raven zvočnega tlaka izračunamo po spodnjem izračunu:

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p_{rms}}{p_0}$$

kjer je L_p raven zvočnega tlaka, p_0 pa je referenčna vrednost 2×10^{-5} .

Ne bom izpeljeval *Walkerjeve* enačbe za zvočni tlak, ampak jo bom opisal, kot jo je Frank Verwal [17, strani 155–156]. Ta temelji na vzajemnosti. Grobo rečeno je sistem vzajemen, kar pomeni, da imamo enako moč, če zamenjamo vhod in izhod zvoka. Da lahko to vpeljemo na ESZ, je treba zamenjati poslušalca (ki naj bi bil pravokotno na osi zvočnika) za točko vira in ESZ uporabimo kot kondenzatorski mikrofona, ki posluša zvok točkovnega vira. Izhodno napetost tega mikrofona lahko izračunamo. Vzajemnost pravi, da je razmerje med močjo točkovnega vira in izhodno napetostjo mikrofona enako razmerju med tokom signala na ESZ in posledično zvočnim tlakom na mestu poslušalca.

Valovi iz točkovnega vira ustvarijo premikanje delcev na mestu ESZ. Predvidevamo tudi, da je membrana na ESZ brezmasna in da njeni gibi niso omejeni z napetostjo oziroma z nategom. Membrana potemtakem sledi hitrosti zraka. Za to delo moramo zahtevati, da se zvočni valovi iz točkovnega vira pravokotno gibljejo na površino ESZ. Glej Sliko 2-15.



Slika 2-15: ESZ uporabimo kot mikrofona, da poslušamo gibanje zvočnih valov iz točkovnega vira [17, stran 156]

To zahteva, da je zvočnik dovolj majhen in/ali da je razdalja do točkovnega vira dovolj velika. S tem zagotovimo, da se celotna membrana premika na približno enak način. Pod temi pogoji je enostavno izračunati izhodno napetost, ki nastane na statorjih zaradi membranskih odmikov od prvotne lege. Za razliko od daljnega polja velikost in oblika membrane nimata vpliva. Na koncu Verwal ugotovi, da se vsak vpliv akustičnega kratkega stika posredno upošteva pri tej enačbi.

3 Izdelava elektrostatičnega zvočnika

Po preučevanju strokovne literature sem si zadal nalogo, da tudi sam s pomočjo fakultete izdelam elektrostatični zvočnik. Sprva je bilo potrebno pridobiti ves material in pripomočke za njegovo izdelavo.

3.1 Uporabljeni gradniki ESZ

Na spletnih trgovinah je več vrst membran, primernih za ESZ. Razlikujejo se po lastnostih in po debelini. Večina prebrane literature je priporočala membrano z debelino 6 mikronov. Membrana se imenuje *Dupont Mylar® Type C* in je dolga 40 m, široka 620 mm in zvita v rolo. Ta membrana je zelo podobna originalnemu 12-mikronskemu filmu, ki je bil uporabljen za QUAD zvočnik. Izdelek *Mylar®* je izumilo podjetje *DuPont* leta 1948. To je Petru Walkerju omogočilo, da je začel razvijati znani ESL 57. Ta material ima tehnično oznako PETP (*Polyethylene terephthalate polyester*) in je perfekten za izdelavo membran ESZ, saj ga vročina stisne le za 2 %, kar je idealno za napetost membrane [6].



Slika 3-1: PETP material [8]

Za distančnik smo uporabili penasti montažni trak širine 25 mm in debeline 1,1 mm. Je bele barve in iz polietilenske pene ter prestaja temperaturni razpon od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9].

Da je membrana postala prevodna, je jo bilo treba premazati s prevodnim sprejem. Ta se imenuje *ESD coating*, *Licron crystal* in vsebuje *1-Butanol*, *2-Propanol*, *Metanol*, *N-Butan*, *Nitrometan*, *Polimer*, *Propan*, *Proprietary* in vodo [10].



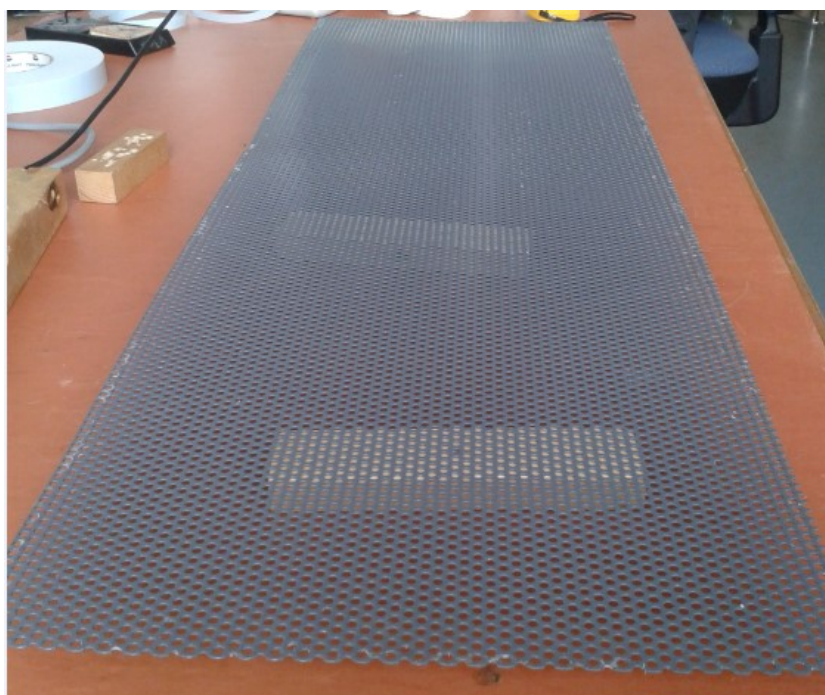
Slika 3-2: Techspray Licron crystal [10]

Membrano je treba povezati z napetostjo in jo s pomočjo bakrenega traku povezati z električnim tokom na prevodni premaz, ki je na membrani. Na spletni trgovini smo kupili lepilni bakreni trak, ki je širok 25 mm.



Slika 3-3: Lepilni bakreni trak [16]

Za izdelavo statorja smo vzeli ploščo iz jekla in ne iz aluminija, ker je lažje spajkati električen kabel na jeklo, ker je malenkost težji, zaradi česar je tudi manj dovzeten za donenje, in ker stane manj. Pri izbiri velikosti odprtin in prostora med njimi je potrebno paziti, kako bodo statorji premazani z barvo. Razpršilo, ki ustvari 0,3 mm premaza barve po površini statorja, bo verjetno znotraj lukenj premazalo samo okoli 0,07 mm barve, ker pištola za barvo ne more biti usmerjena pravokotno na notranjo površino luknje [13].



Slika 3-4: Prebarvani stator

Priporočljivo je, da se uporabi prašno barvanje, ki uporablja elektrostatično privlačnost, da se premaz bolje nanese na vse površine lukenj v primerjavi z navadnim barvanjem s pištolo. Zaradi tega je dobro, da je razmerje odprtosti lukenj na statorju okoli 50 % oz. višje. Prašno barvanje na splošno velja za najboljšo možno rešitev [13].

Pred nanašanjem barve je treba pritrditi električen kabel na oba statorja, da imata kabel in stator dober stik. Stator mora biti raven, kolikor se le da. Treba je paziti tudi na robove, saj lahko pride do *corone* [13].



Slika 3-5: Prikaz iztekanja corone [13]

Slika 3-5 prikazuje kovinsko vetrnico, nabito z visoko napetostjo, in rezultat, ki povzroči, da corona prične iztekati iz ostrih robov. Prav tako se na ostrih točkah pri robovih nabitega satorja kažejo enaki corona učinki, ki bi se lahko hitro vžgali skozi barvo in tako ustvarili lok poti do sosednjega satorja. To bi povzročilo kratek stik in s tem konec delovanja zvočnika. To je pomemben razlog, zakaj moramo zelo paziti, da odstranimo vse ostre robove na satorju, ki so porezani. Luknje v satorju pa ne smejo biti povrtane, ampak odtisnjene, ker ta proces naredi robove luknje na eni strani gladke, na drugi pa ostre. Gladka stran mora gledati na membrano, da zmanjšamo možnosti corona isker [13].



Slika 3-6: Brušenje robov na satorju [13]

Statorji z manjšimi luknjami so učinkovitejši, saj proizvajajo enotnejše in gostejše električno polje. Vendar manjše luknje zahtevajo tanjšo debelino statorja (stator mora biti tanek za maksimalno polovico premera luknje), sicer zvok vidi luknje kot valje; zrak v valju pa ima impedanco, ki deluje kot *roll off* visokih frekvenc. Torej na koncu debelina statorja določa spodnjo mejo za velikost luknje [13].

Ko se predvaja glasba, statorji vibrirajo, zlasti ploščati. Predvidevamo, da se na tankih statorjih lahko pojavita zvočno zvonjenje in morebitni šum na resonančni frekvenci. Zato za ploščate statorje ni priporočljivo uporabiti debeline, manjše od 0,9 mm. Veliko razprav je bilo o tem, kako zelo odprt prostor je najboljši na statorju. Nekateri, ki so se tudi sami lotili izdelave elektrostatičnega zvočnika, pravijo, da se ni slišalo velike razlike med statorji z odprtostjo 40 % in 51 %. Pri 51-odstotni odprtosti statorja se je zdelo, da je imel zvočnik malo svetlejši zvok, pri 40-odstotni pa nekoliko mehkejši. To se lahko zgodi, ker manjši odprti prostor dovolj omejuje pretok zraka, da ublaži osnovno resonanco in harmonijo membrane, vendar to ni nedvomno [13].

Skupek teh elementov je treba nekam umestiti, da ne pride do razdrtja med njimi. Izdelali smo poseben leseni okvir, ki omogoča, da elementi ostanejo statični in zavarovani pred razdrtjem.

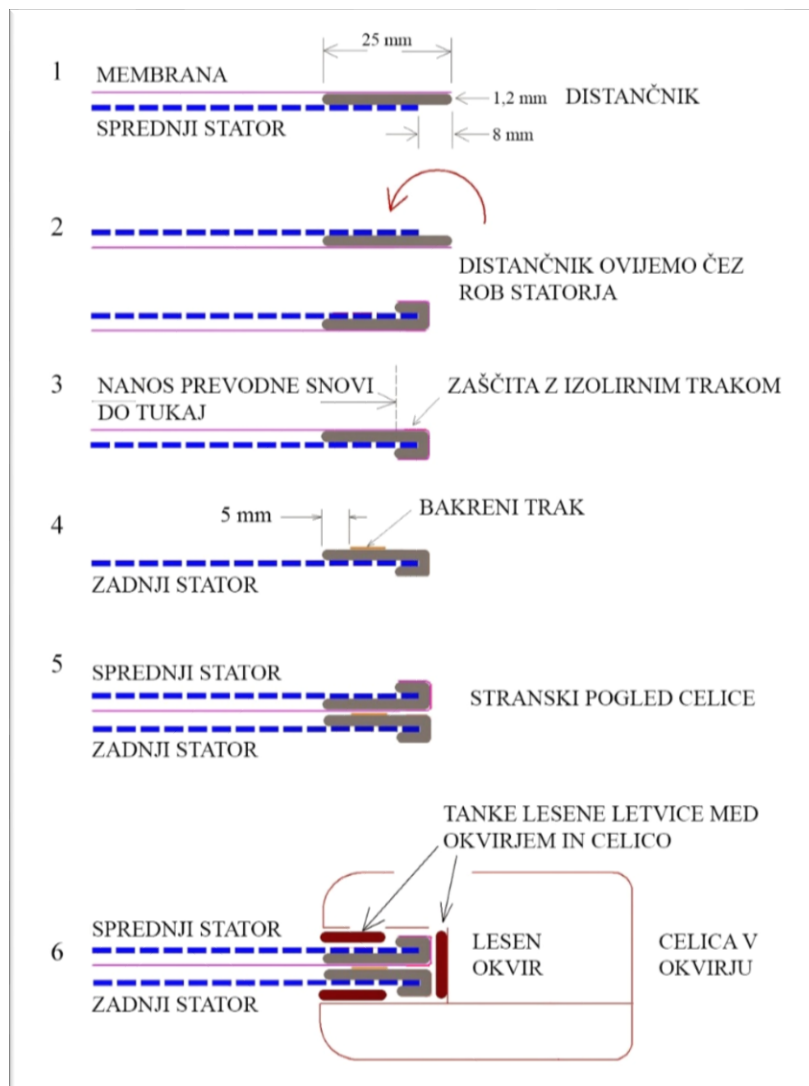


Slika 3-7: Levo slika okvirja, desno slika pokrova

Leseni okvir ima utor, kjer je nameščena celica. Med utorom in celico je potrebno pustiti nekaj prostora za lažje nameščanje. Po nameščanju pa je treba ta prostor zapolniti s samolepilni trakom ali s kakšnim drugim neprevodnim materialom.

3.2 Sestavljanje ESZ

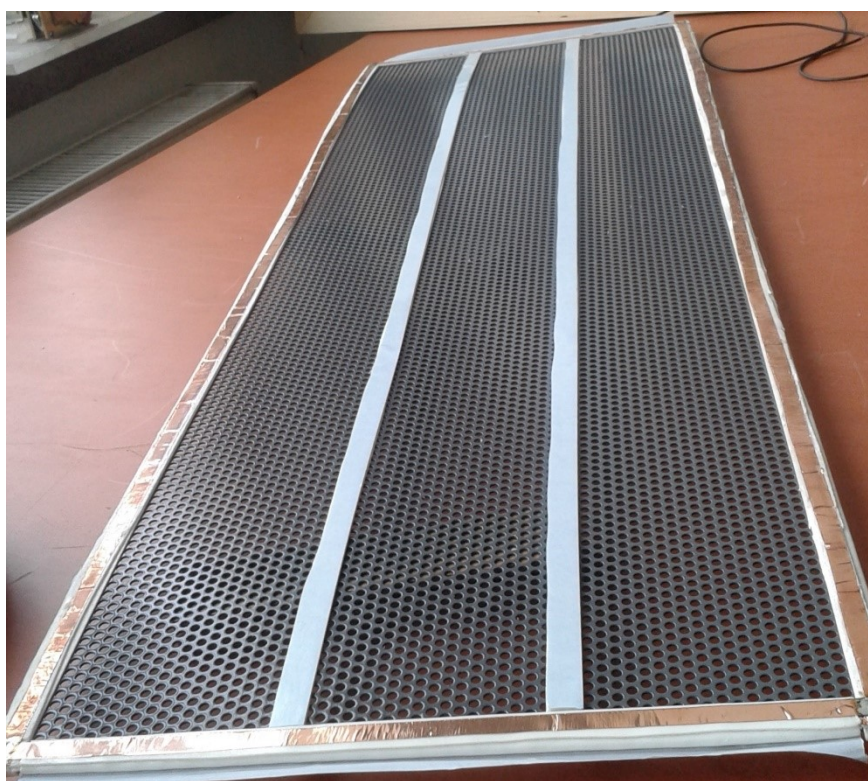
Ko imamo vse gradnike in orodje na voljo, začnemo združevati vse glavne elemente zvočnika. Najprej je treba namestiti žice na satorja in jih dobro spajkati, da ne bo kasneje prišlo do odstopa žic. Potem se na oba satorja prilepi samolepilni dvostranski trak oziroma distančnik. Potrebno ga je bilo namestiti na vse robove, da ne bo prišlo do stika z membrano ali drugim satorjem. Distančnik je treba namestiti na obeh straneh robov. Zunanji rob se bo stikal z lesnim okvirjem, kjer bo distančnik varoval stik med njima. Notranja stran pa bo po robovih držala razmak med satorjem



Slika 3-8: Prikaz namestitve distančnikov in drugih komponent [13]

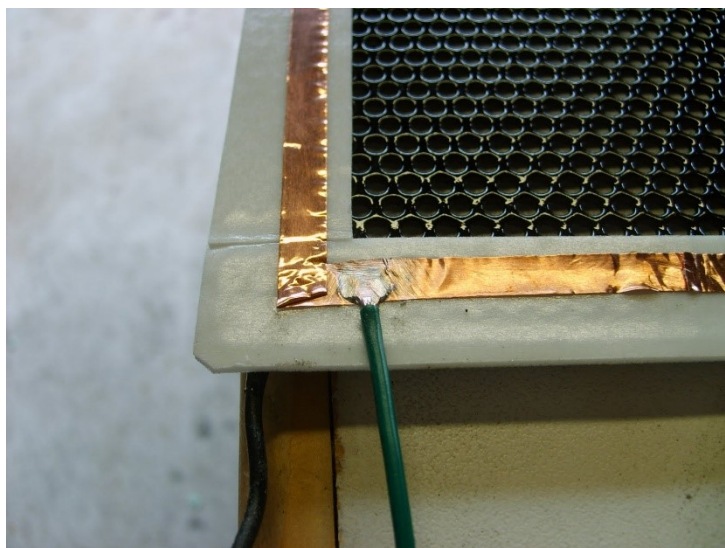
in membrano (v nadaljevanju razmak S/M). Za največjo učinkovitost zvočnika je zaželen minimalen razmak med S/M, saj jakost električnega polja pada s kvadratom razdalje. Tako bi podvojitev S/M razmaka zahtevala štirikrat večji vnos energije za enako delovanje. Hibridni zvočniki naj bi uporabljali razmak S/M cca 1,5 mm, ampak za *full range* zvočnik je priporočljiv razmak 3 mm ali več zaradi nizkih frekvenc. Izdelovalci zvočnikov priporočajo umestitev podpornih distančnikov po sredini statorjev za membrano. Ker je moj stator širok 300 mm in distančnik širok 1,25 mm, smo se odločili, da bo razmak za podporne distančnike 97,5 mm. Distančniki na obeh statorjih morajo biti nameščeni na enakih pozicijah, da ne bo prišlo do vidnega zamika distančnikov med statorjema ob združitvi, kar bi povzročilo slabše delovanje membrane in bi imelo neestetski videz.

Ko uspešno namestimo vse distančnike na oba statorja, je treba po robovih na enega od statorjev nalepiti bakrene trakove. Te je treba namestiti na notranje robove zunanjih distančnikov.



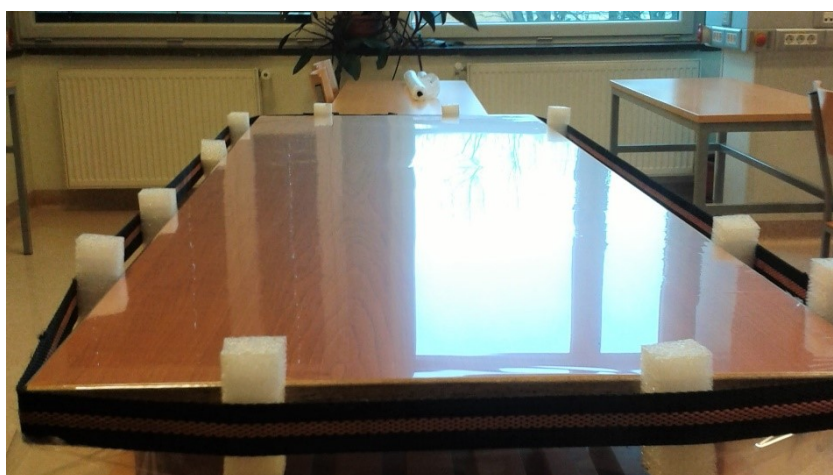
Slika 3-9: Prikaz nalepljenega bakrenega traku

Bakreni trak moramo tudi povezati z žico, ki jo spajkamo nanj, in pazimo, da ne poškodujemo traku, saj je zelo krhek.



Slika 3-10: Prikaz spajkanja žice na bakreni trak [13]

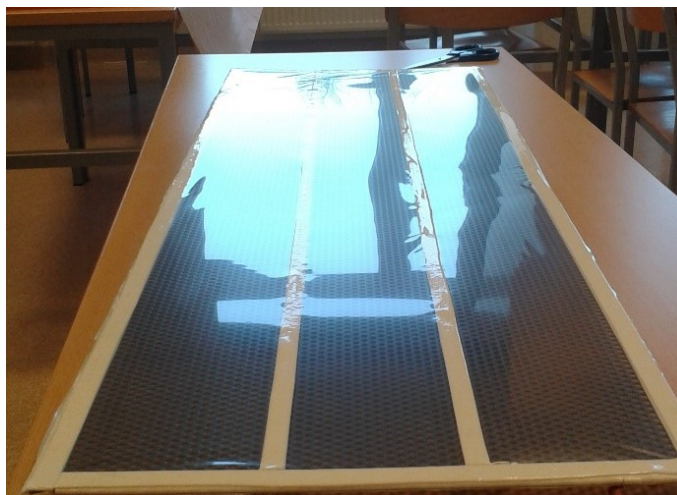
Ko namestimo bakreni trak, pričnemo napenjati membrano. Ta del je zelo težak in naporen. Treba si je bilo izmisliti orodje za napenjanje membrane. Membrana je zelo občutljiva in se ob nepravilnih prijemih hitro strga. Za nateg membrane smo uporabili desko, ki je bila po robovih pobrušena, da ni imela ostrih robov, ki bi povzročili trganje. Da smo obdržali določeno napetost membrane, smo uporabili trak za pritrjevanje tovora. Lahko bi uporabili tudi zračnico kolesa. Med trak in membrano smo namestili dodatne blažilne trakove, ki so znižali trenje med njima.



Slika 3-11: Prikaz napenjanja membrane

Ko smo uspeli čim bolj napeti membrano, smo nanjo položili stator z distančniki, ki ni imel bakrenega traku. Pri nameščanju statorja na membrano je potrebno biti izredno pazljiv in natančen, da zagotovimo čim boljši oprijem in napeto

membrano med njima. Ko je stator položen na membrano, z nožem odstranimo odvečno membrano in skušamo rezati čim bolj ravno, da ne pride do raztrganega roba membrane. Ta namreč lahko pride v stik s statorjema, ki sta v bližini.



Slika 3-12: Prikaz nameščene membrane na statorju

Po namestitvi membrane na stator pričnemo prekrivati membrano s prevodnim sprejem *ESD coating*, *Licron crystal*. Da preprečimo uhajanje nabojev iz membrane, pustimo njene zunanje robove neprevodne. Premaz je potreben zgolj znotraj membrane, vendar se mora stikati z bakrenim trakom, ki je nameščen na drugem statorju. Zato na robove statorjev namestimo izolirni trak, ki bo skrbel, da ne bomo robov membrane premazali s sprejem. Ko namestimo izolirni trak, pričnemo z namazom prevodnega pršila. Skušamo ga čim bolj enakomerno namestiti na membrano.



Slika 3-13: Premaz prevodnega pršila na membrano

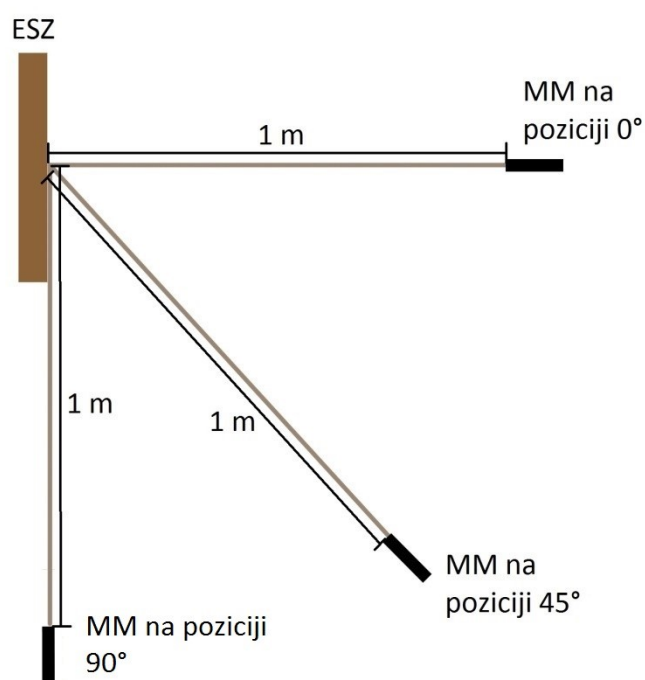
Ko končamo, počakamo en dan, da se membrana dobro posuši, in nato nadaljujemo s sestavljanjem zvočnika. Odstranimo izolirni trak in previdno namestimo drugi stator, ki ima ob robu bakreni trak, na prevodno membrano. Skušamo čim bolje namestiti statorja enega na drugega, da bosta skupaj kot ena velika celica. Ko uspemo združiti statorja, damo to celico v leseni okvir in pokrijemo z lesenim pokrovom. Tega dobro fiksiramo na okvir z lesenimi vijaki. Ko smo končali, preverimo delovanje in občudujemo svoje delo.



Slika 3-14: Končni izdelek: prototipni ESZ

4 Meritve ESZ

Meritve prototipnega zvočnika smo opravili v gluhi sobi na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani s pomočjo doc. dr. Sama Beguša. Za meritve smo uporabili profesionalni merilni mikrofoni, kasneje MM, *Bruel & Kjaer 4191* s predojačevalnikom 2669 ter ojačevalnikom za mikrofoni *Nexus*. Zmerili smo frekvenčni odziv prototipnega elektrostatičnega zvočnika, maksimalno jakost zvočnika pri maksimalni izhodni moči in meritve zvočne jakosti na kotnih pozicijah 0° , 45° in 90° .



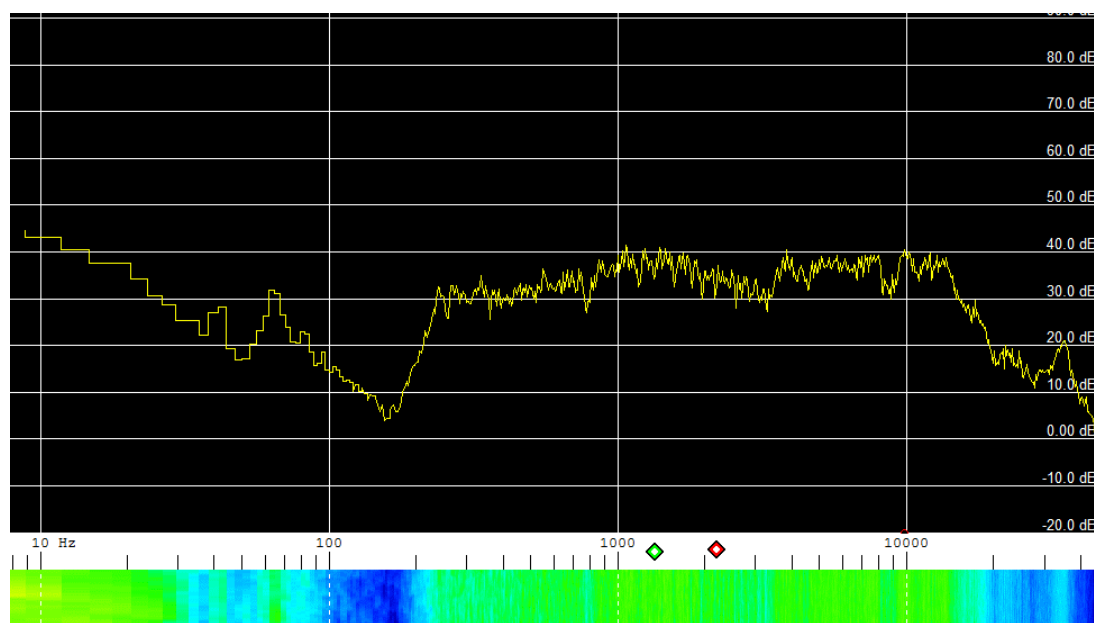
Slika 4-1: Prikaz meritev v gluhi sobi

4.1 SPL oziroma maksimalna jakost zvočnika

Zmerjena jakost zvočnika pri 1,04 V pri oddaljenosti mikrofona od zvočnika za en meter, ki je nameščen pravokotno na sredino zvočnika oziroma 0° (glej Sliko 4-1) znaša 72,9 dB na frekvenci 1 kHz. Ojačevalec, uporabljen na zvočniku, ima po podatkih maksimalno izhodno moč 12 V. Iz tega lahko izračunamo maksimalno jakost zvočnika pri tej voltaži. Vemo tudi, da vsaka podvojitve voltaže prispeva dodatnih 6 dB glasnosti zvočnika. Po izračunu naj bi zvočnik pri izhodni voltaži ojačevalnika 12 V proizvajal zvočno jakost 93,5 dB na enem metru oddaljenosti, kar je za 1,8 dB več od izračunane vrednosti.

4.2 Frekvenčni odziv zvočnika

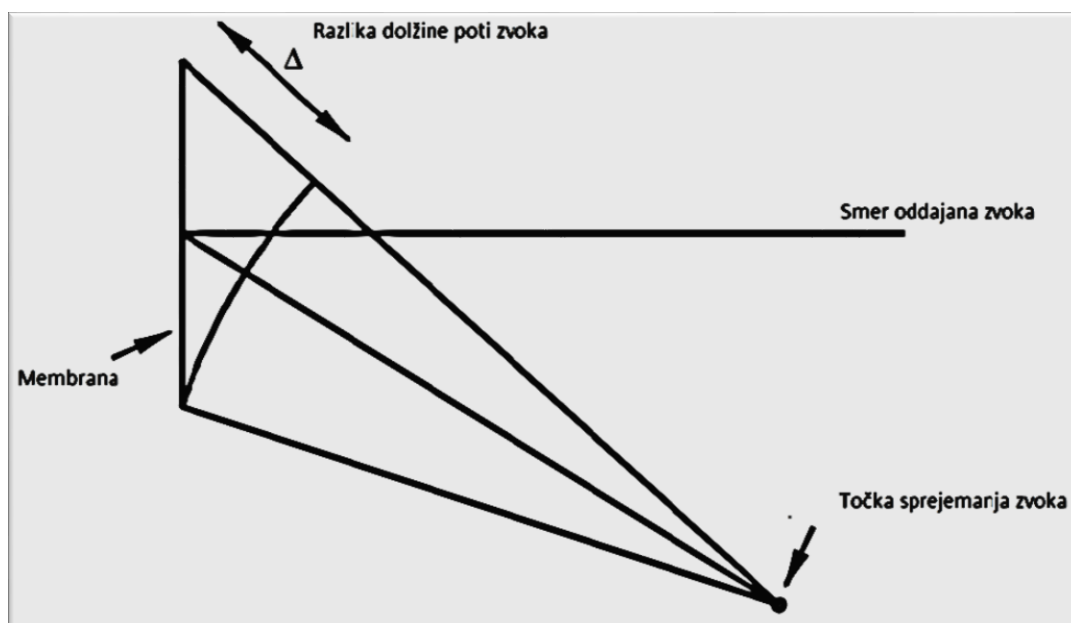
Frekvenčni odziv zvočnika je merjen z merilnim mikrofonom pravokotno na sredino zvočnika na oddaljenosti enega metra, brez krenice. Na Sliki 4-2 je prikazan frekvenčni odziv prototipnega zvočnika. Opaziti je, da ima zvočnik frekvenčni razpon med približno 200 Hz in 18 kHz, kar pomeni, da je ESZ pravilno izdelan, saj ne more proizvajati nizkih tonov, ker je izdelan po načrtu za hibridni sistem, ki mora imeti dodatni nizkotonski zvočnik. Na srednjih in visokih frekvencah ima zvočnik dokaj raven oziroma »flat« frekvenčni odziv. Pri 18 000 Hz najprej opazimo padec glasnosti na visokih frekvencah, kar nas načeloma ne zanima, saj povprečno ljudje slišimo od 17 do 18 kHz, redki pa tudi do 20 kHz. Tudi predvajana glasba oziroma inštrumenti težko proizvedejo tako visoke frekvence.



Slika 4-2: Frekvenčni odziv prototipnega zvočnika

4.3 Jakost zvočnika pri določenem merjenem kotu

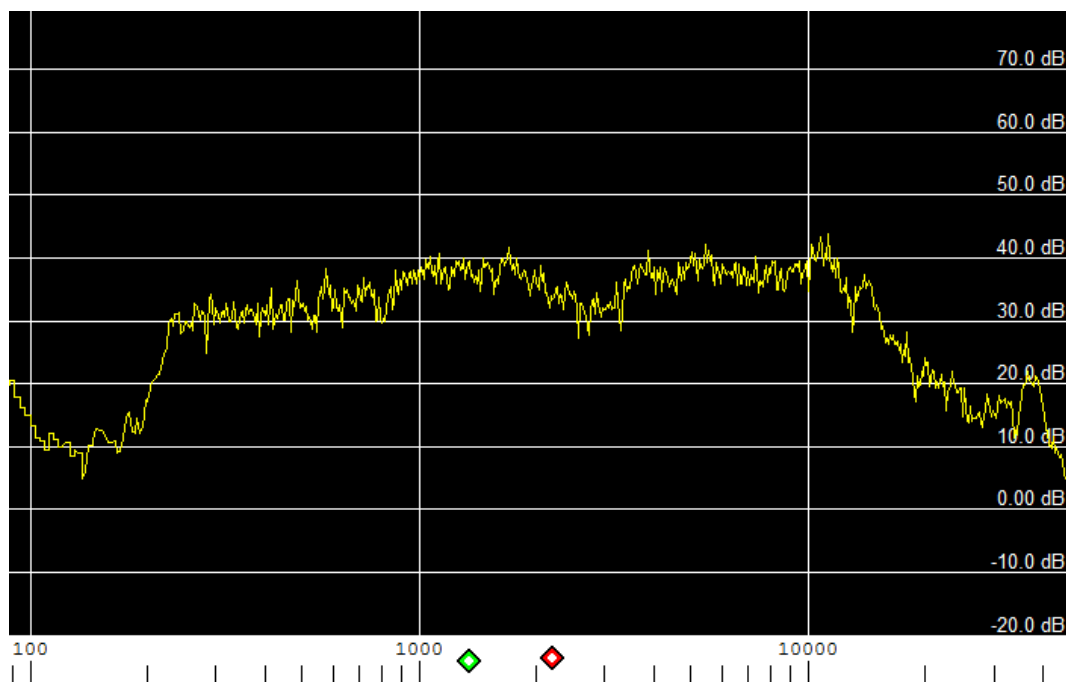
Meritev jakosti zvočnika smo izmerili na treh pozicijah pri enaki glasnosti: pravokotno na zvočnik oziroma 0° , 45° in od strani oziroma 90° . Vse meritve so bile merjene na oddaljenosti mikrofona 1 meter od središča zvočnika (glej Sliko 4-1). Prva stvar, ki nam lahko pride na misel pri poslušanju glasbe pri kotu 45° , je, da slišimo kratek odmev zvočnika zaradi podaljšane poti zvoka iz najbolj oddaljene stranice zvočnika, ki jo gledamo na tem kotu. Za lažje predstavljanje glej Sliko 4.3.



Slika 4-3: Prikaz razlike zvočne poti pri poslušanju s strani [17]

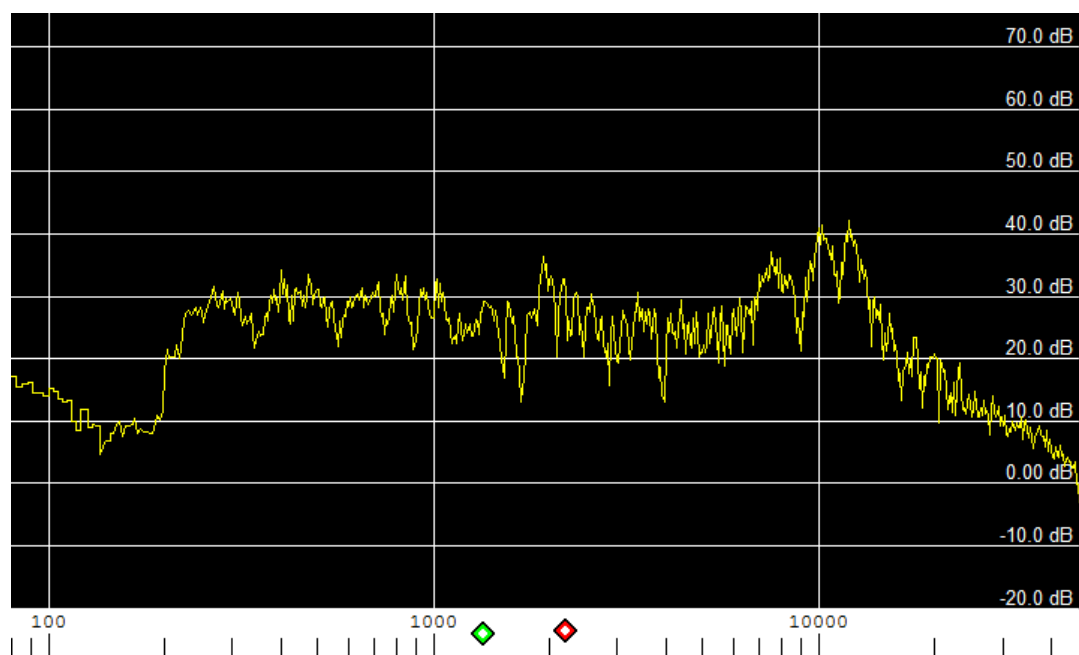
Ta razlika zvočne poti dodatno vpliva na kakovost zvoka, zato imajo novejši in serijski zvočniki ukrivljeno celico, ki omogoča boljšo pokritost zvoka po prostoru.

Izmerjena vrednost glasnosti pri izhodni moči ojačevalnika 1,04 V na osi zvočnika oziroma 0° pri enem metru znaša 69,9 dB. Slika 4-3 prikazuje frekvenčni odziv zvočnika pri tej meritvi.

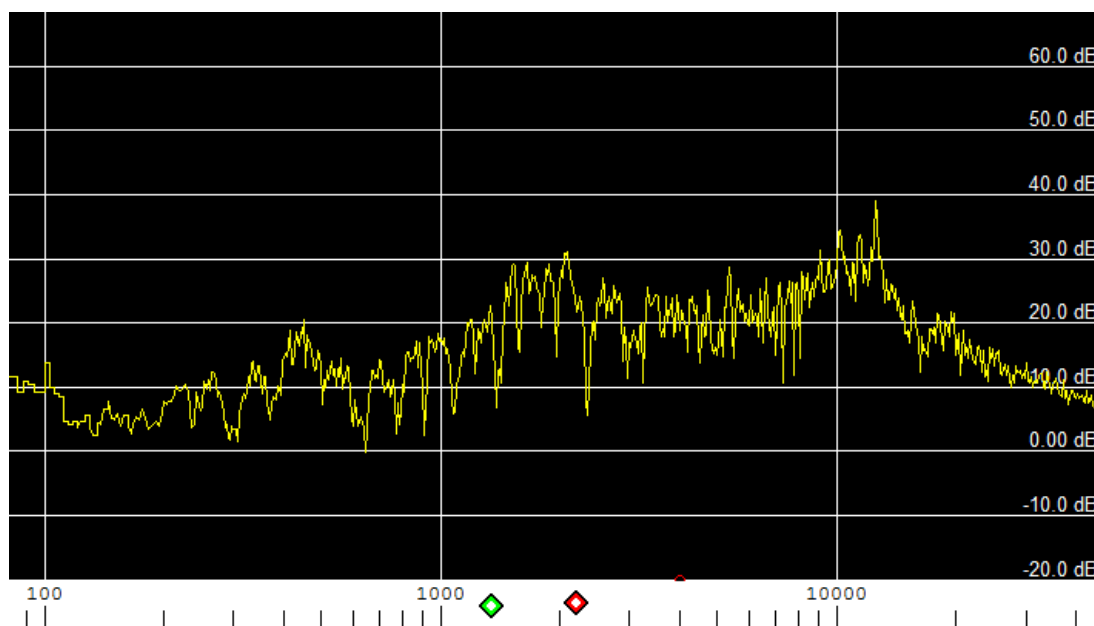


Slika 4-4: Frekvenčni odziv zvočnika pri kotu 0°

Izmerjena vrednost glasnosti pri enaki izhodni moči ojačevalnika pri kotu 45° znaša 65 dB, kar je za približno 5 dB manj kot na osi zvočnika. Tudi frekvenčni odziv, ki je prikazan na Sliki 4-4, prikazuje nihanje frekvenčnega odziva, po vsej verjetnosti zaradi različne zvočne poti oddajanja zvočnika.



Slika 4-5: Frekvenčni odziv zvočnika pri kotu 45°



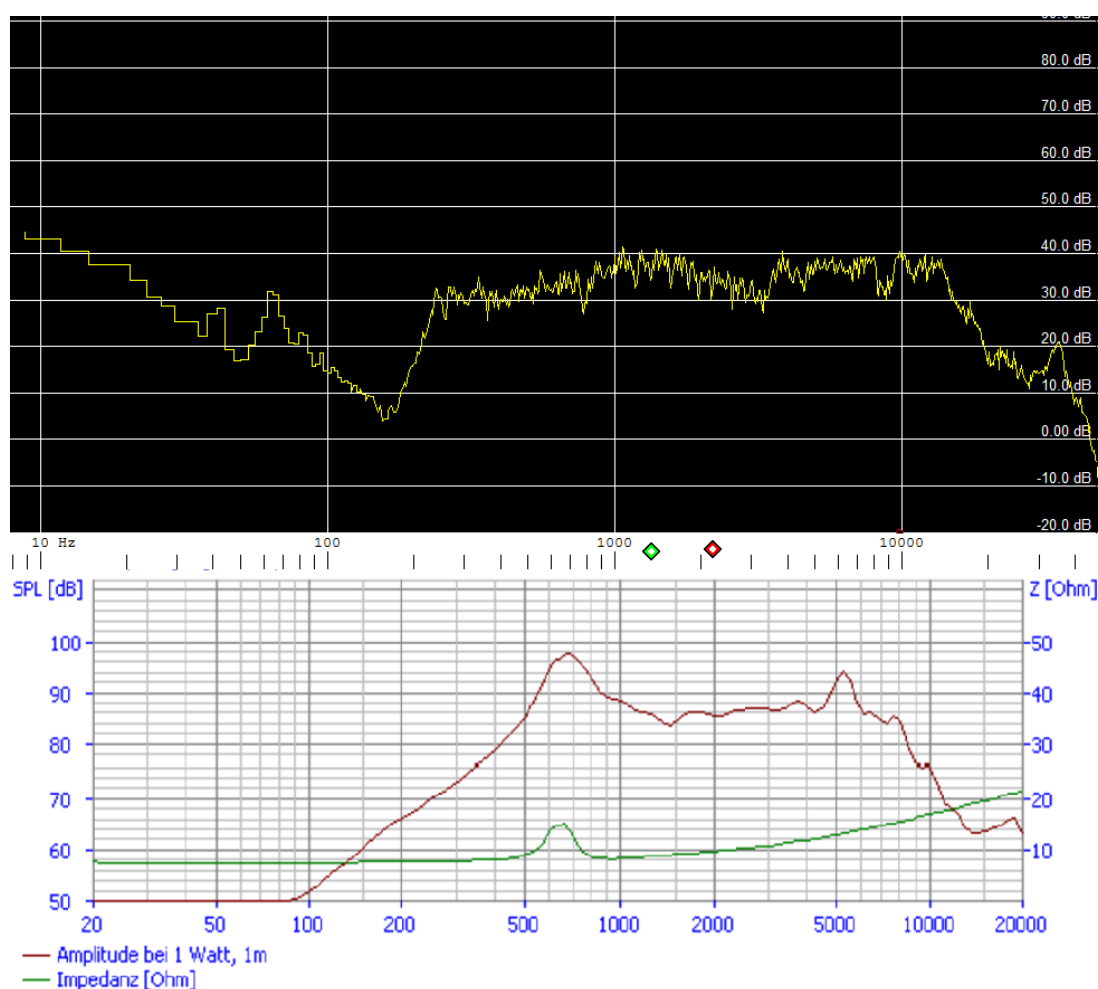
Slika 4-6: Frekvenčni odziv zvočnika pri kotu 90°

Vrednost glasnosti pri kotu 90° pri enakih pogojih znaša 58,4 dB, kar je 11,5 dB manj kot na osi zvočnika. Slika 4-6 prikazuje frekvenčno karakteristiko odmeva zvočnika, saj zvočnik pri tem kotu ne proizvaja zvoka v tej smeri in mikrofoni posname šum njegovega odmeva.

4.4 Povzetek meritev in izdelave ter primerjava z dinamičnim zvočnikom

Kot sem že omenil, kakovost zvoka ESZ ni prizadeta zaradi toleranc in načina izdelave. Treba je upoštevati, da je nemogoče zgraditi popolnoma ravne statorje in membrane, ki bodo enakomerno oddaljeni drug do drugega, vendar to bistveno ne vpliva na kvaliteto izdelave celotnega zvočnika, ampak zgolj na količino zvoka. Za vse amaterske gradnje tega zvočnika je to dobra informacija. Meritve so pokazale, da ima prototipni zvočnik solidno končno zvočno jakost in dober raven frekvenčni odziv znotraj svojega razpona frekvenc in za delovanje v svojem okolju. Za še boljše delovanje oziroma pokritost prostora bi bilo treba ukriviti statorje, kar bi privedlo do boljše razpršenosti zvoka po prostoru. Treba je tudi upoštevati, da zvočnik ni edini, ki skrbi za najboljši zvok. Za še boljše delovanje je treba imeti kvalitetne tudi ostale komponente, ki skrbijo za delovanje celotnega zvočnega sistema (ojačevalnik, kabli, transformatorji ...). Trenutno uporabljeni ojačevalci ni najboljše kvalitete oziroma ni najprimernejši za poganjanje takih sistemov.

Po preučevanju in izdelavi sem ugotovil, da lahko sami z izdelavo ESZ naredimo zvočni sistem, ki bo dovolj konkurenčen serijsko izdelanim elektrostatičnim zvočnikom ter klasičnim dinamičnim zvočnikom. Glavna razlika med dinamičnim in elektrostatičnim zvočnikom je ta, da ima ESZ zelo tanko membrano, ki veliko lažje in natančneje vibrira skozi zrak, zato proizvaja kvalitetnejši zvok kot dinamični zvočnik, ki s tuljavo ustvarja elektromagnetno polje in tako premika stožec ter zrak okrog njega. Če primerjamo frekvenčno karakteristiko prototipnega ESZ in dinamičnega zvočnika znamke Visaton, model zvočnika M 10 – 8 Ohm [20], lahko opazimo razliko v frekvenčnih karakteristikah. To prikazuje tudi Slika 4-7.



Slika 4-7: Primerjava frekvenčnih karakteristik ESZ (zgoraj) in dinamičnega zvočnika (spodaj)

V primerjavi z dinamičnimi zvočniki je elektrostatični precej drugačen in bolj zanimiv na pogled. Oba imata tako dobre kot slabe lastnosti. ESZ, ki je zgrajen po principu »full range«, ne potrebuje kretnice za delovanje, dinamični zvočnik pa jo

potrebuje za razporeditev frekvenc za vsak segment. ESZ tudi ne potrebuje zaprtega ohišja, kot ga potrebuje dinamičen zvočnik. Če se odločimo za izdelavo slednjega, je potrebno pravilno izračunati prostornino ohišja celotnega zvočnega sistema, potrebnega za optimalno delovanje. Znotraj celotnega zvočnega sistema moramo dodati še dodatno trobljo, ki skrbi za visoke tone, saj dinamični zvočnik nima tako velikega razpona, da bi pokrila celotni frekvenčni spekter, ki je potreben. Dodati je treba še kretnico, ki skrbi za določanje frekvenčnega spektra posameznemu segmentu. Magnetni zvočniki niso primerni za domačo izdelavo, zato je primerneje kupiti posamezne že narejene komponente in sestaviti svoj zvočnik, če se že odločimo za to, vsekakor pa raje priporočam izdelavo elektrostatičnega zvočnika, saj je kakovosten zvok zagotovljen.

Kot že omenjeno, je ESZ kvalitetnejši od dinamičnega sistema zaradi majhne mase membrane, ki producira natančen zvok. Njegova »slabost« pa je ta, da težko proizvaja nizke frekvence oziroma jih ni zmožen producirati. Dinamični zvočnik jih lažje proizvede. ESZ lahko proizvaja nizke frekvence, vendar tak zvočnik ni majhen in potrebuje veliko energije za poganjanje nižjih frekvenc zaradi večje oddaljenosti membrane in statorja. To ne pomeni, da so veliki ESZ slabši od manjših, ki delujejo skupaj z magnetnimi nizkotonci. Magnetni nizkotonski zvočniki premagajo ESZ v tej kategoriji, zato se veliko ljudi, ki se odločijo za gradnjo ESZ, odloči za izdelavo hibridnega sistema, saj je precej enostavnejši od gradnje *full range*. ESZ in dinamični nizkotonci skupaj delujeta zelo dobro, saj vsak deluje tam, kjer sta oba najboljša.

5 Zaključek

V diplomski nalogi sem podrobno opisal sestavo, delovanje, izdelavo in meritve prototipnega elektrostatičnega zvočnika ter naredil primerjavo slednjega z dinamičnim zvočnikom. Ugotovil sem, da sta za izdelavo potrebna strokovno znanje in strokovna pomoč. Popolnim laikom ne priporočam izdelave, saj je treba imeti nekaj znanja o elektrotehniki in fiziki.

Izdelava takega zvočnika ni lahka, saj ta traja več dni in zahteva kar nekaj napora, a se ob zaslišanem zvoku iz lastnega prototipnega zvočnika ves trud poplača. Kot že omenjeno kakovost zvoka elektrostatičnega zvočnika naj ne bi bila prizadeta zaradi slabih toleranc in načina izdelave, kar so nam tudi prikazale meritve prototipnega zvočnika. Tudi izmerjena glasnost prototipnega zvočnika je dovolj visoka za normalno poslušanje glasbe doma. Za še boljšo kakovost in lažjo izdelavo bi bilo treba imeti dodatna specifična orodja, ki bi še bolj pripomogla h kakovostnejšemu zvočniku. Potrebovali bi posebno orodje, kjer bi čim bolj napeli membrano in se s tem izognili slabo napeti membrani in pripomogli h glasnejšemu delovanju elektrostatičnega zvočnika na srednjih in visokih frekvencah. Prav tako bi potrebovali orodje, kjer bi lažje sestavili ukrivljen stator in membrano skupaj v celico. Vsekakor pa bi izdelovanje teh orodji še dodatno otežilo in podaljšalo delo izdelave elektrostatičnega zvočnika. Pri izdelavi statorjev je potrebna še dodatna pazljivost, luknje morajo biti povrtane tako, da sta si oba čim bolj enaka. To pripomore k lepši vizualni podobi in delovanju zvočnika, saj potem ne more priti do zamika lukenj pri sprednjem in zadnjem statorju, ko sta združena v celico.

Ob zaključku preučevanja in izdelave prototipnega zvočnika se mi je porodilo že nekaj novih idej, ki bi pripomogle k še kakovostnejšemu zvoku. Nekatere sem tudi upošteval pri izgradnji dveh drugih ESZ, ki sta montirana v predavalnici na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Te ideje bom zagotovo upošteval pri izdelavi svojega naslednjega elektrostatičnega zvočnega sistema. Pri izgradnji svojega

hibridnega sistema bo treba še dodatno izdelati nizkotonec z ohišjem in skupaj z okvirjem ESZ narediti lep in prijeten koncept, da bo prijeten na posluh in na ogled.

Upam, da bo moja diplomska naloga dobro služila prihodnjim generacijam, ki se bodo odločile za izdelavo ESZ. Vsem, ki ste se že odločili za izdelavo, pa priporočam, da si preberete knjigo Rogerja R. Sandersa, ki laikom ali poznavalcem elektrotehnike dobro razloži izdelavo in osnove ESZ.

Literatura

- [1] Roger R. Sanders, "The electrostatic loudspeaker design cookbook".
- [2] <http://www.janszenaudio.com/#!/brand-history/fzwwk>
- [3] <http://www.martinlogan.com/learn/electrostatic-loudspeaker-history.php>
- [4] <http://sound.westhost.com/project105.htm>
- [5] <http://www.mh-audio.nl/ElectrostaticLoudspeaker.asp>
- [6] <http://www.ebay.com/itm/Electrostatic-Speaker-Membrane-Dupont-Mylar-C-6um-40M-/171504893878>
- [7] <http://educyclopedia.karadimov.info/library/Electrostatic.pdf>
- [8] <http://www.bgrstextiles.com/Yarns.html>
- [9] https://www.conrad.si/PE-penasti-montazni-trak-%28D-x-S%29-33-mx-25-mm,-bela-polietilenska-pena-1811B2533C-TOOLCRAFT-vsebinska-rola-%28s%29.htm?websale8=conrad-slowenien&pi=1235210&ci=SHOP_AREA_40118_2301070
- [10] <http://si.farnell.com/techspray/1756-8s/static-dissipative-coating-8-oz/dp/2501345?ost=esd+coating&selectedCategoryId=&categoryId=700000004393>
- [11] <http://www.diyaudio.com/forums/planars-exotics/181041-my-2-nd-esl-attempt.html>
- [12] <http://www.martinlogan.com/learn/electrostatic-speakers.php>
- [13] <http://jazzman-esl-page.blogspot.si/2010/01/building-stat-panels.html>
- [14] <http://www.novacon.com.br/audioafca.htm>
- [15] <http://www.inventricity.com/#!/and-the-next-speaker-is-part2/cyc5>

- [16] https://www.conrad.si/Bakren-lepilni-trak-Conrad-CFT25%2f20M,-%28D-x-S%29-20-m-x-25-mm,bakrene-barve.htm?websale8=conrad-slowenien&pi=542626&ci=SHOP_AREA_19751_2301030
- [17] http://home.kpn.nl/verwa255/esl/ESL_English_2011.pdf
- [18] <http://forum.polkaudio.com/discussion/157549/need-some-advice-older-marantz-receivers/p2>
- [19] <http://www.avsforum.com/forum/89-speakers/1908977-me-bose-getting-better.html>
- [20] http://www.visaton.de/en/chassis_zubehoer/konus_mt/m10_8.html