

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: Profesor fizike

Darko Milpak

Diplomski rad

ELEKTROSTATSKI PLANARNI
EMITER AUDIO SIGNALA

Voditelj diplomskog rada: Doc.dr.sc. Darko Androić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2007.

Sadržaj

1. Uvod	3.
2. Način izvođenja nastavne cjeline	6.
2.1. Konstruktivistička nastava fizike	6.
2.2. Primjena na gradivo elektrostatskog emitera	7.
2.2.1. Uvod	7.
2.2.2. Izvođenje nastavnog sata	8.
3. Zvuk	11.
3.1. Nastanak i prijenos	11.
3.2. Priroda zvučnog vala	12.
3.3. Frekvencija i valna duljina	14.
3.4. Zvučni tlak, intenzitet i snaga	14.
3.5. Decibeli	16.
4. Elektrostatski emiter	20.
4.1. Osnove elektrostatika	20.
4.2. Električni naboj i električno polje	21.
4.3. Izvedba membrane	25.
4.4. Jednostrani elektrostatski emiter	27.
4.5. Push-Pull princip rada	32.
4.6. Izmjenični napon kao signal	34.
4.7. Posebnosti elektrostatika	35.
5. Izrada elektrostatika	38.
5.1. Uvod	38.
5.2. Materijali	38.
5.3. Sastavljanje	42.
6. Zaključak	45.
Literatura	46.

1. Uvod

Tema elektrostatskog emitera je nova i dosad neiskorištena u nastavi. Sam pojam je dosta nepoznat širem krugu ljudi i izaziva znatiželju. Radi se ustvari o zvučniku, dakle, uređaju za reprodukciju audio signala.

Na upit postavljen ljudima znaju li nešto o tome odgovor je, gotovo bez iznimke, bio negativan. Potrebno je napomenuti da se ne radi o tehnički neobrazovanom kadru, već o studentima ili osobama s diplomom iz područja prirodoslovlja ili tehničkih znanosti.

Ta činjenica mora intrigirati s obzirom da je elektrostatski emiter prisutan već gotovo cijelo stoljeće, barem kao ideja i teorija, a kao gotov proizvod već više od 50 godina.

Poslije prve reakcije, nakon čega slijedi kratak opis, brzo se javlja čuđenje. Čuđenje da takvo što uopće postoji i funkcionira. Slijede pitanja tipa: 'proizvodi li to netko' ili 'koristi li se to negdje'. Upravo ta razina nepoznavanja i naknadno pojašnjenje kod većine ljudi izaziva neku, barem kratkotrajnu, fascinaciju.

Naime, upravo se taj faktor 'oduševljenja' kod pojedinca da nešto za što nije imao pojma da postoji, a postoji tako dugo i sasvim normalno funkcionira, može kvalitetno iskoristiti u nastavnom procesu.

Učenici su ovdje posebno zanimljiva populacija s obzirom da se ipak radi o emiteru audio signala, odnosno o zvučniku.

U toj dobi mnogi misle kako puno znaju o zvučnicima te im ih se na ovaj način može puno više motivirati nego s običnim ponavljanjem teorije. Ustvari, radi se o upoznavanju učenika s gradivom elektrostatičke s posebnim naglaskom na električno polje kao vrlo važan dio fizike.

Električno polje zahtjevno je gradivo, ali i težak pojam za prihvatiti te je stoga svaka pomoć dobrodošla, bila ona u obliku dodatne motivacije ili dodatnog pokusa koji će razjasniti stvari.

Upravo je stoga ovo idealan pokus, pod uvjetom da za to postoje uvjeti u školama, odnosno kabinetima fizike. Ali bitno je napomenuti da se praktični dio i ne mora izvoditi, dapače, jednostavna demonstracija je dostatna za veliku većinu. Naime, može se obraditi i samo teoretski dio kako bi se dobio uvid u praktičnu primjenu jednog dijela fizike koji možda i ne bi ostao dostatno razjašnjen.

Tema elektrostatskog emitera je izuzetno široka i objedinjuje više grana fizike pa se mora pažljivo odabrati koje dijelove preskočiti, a opet koje dijelove treba posebno naglasiti.

Ovdje će naglasak biti stavljen na električno polje i elektrostatičku s malo spomena akustike zbog lakšeg usvajanja gradiva, a i s obzirom da je uključen i praktični dio izrade samog emitera.

Nivo na kojem bi se ovo gradivo izlagalo jest svakako srednjoškolski (gimnazije i elektrotehničke škole).

U nekim školama će se tako veći naglasak dati na, primjerice, sustav pogonjenja uređaja, odnosno na pojačala. Iako ovdje to nije tema, u elektrotehničkim školama u kojima je to možda dio nastavnog plana i programa, može se ovome posvetiti više vremena.

Za gimnazijski program više će se vremena utrošiti na teoretska razmatranja iako i ovdje još uvijek ostaje mogućnost pokusa, odnosno izrade.

Za veliku većinu škola praktična izrada nije potrebna, ali bi svakako, ukoliko bi se ovakvo gradivo izlagalo, trebalo raspolagati s jednim demonstracijskim primjerkom emitera kojim bi se pokazalo da sve i praktično radi.

Naime, pravi doticaj s elektrostatskim emiterom iz kojeg dopire zvuk poznate nam glazbe je poseban doživljaj jer, kako je već spomenuto, velika većina nije niti čula za nešto slično.

Dakle, obradu teme elektrostatskog emitera trebalo bi uglavnom svesti na obradu elektrostatičke, a posebno električnog polja.

Nameće se pitanje kad je pravo vrijeme da se ovo gradivo prezentira?! Odgovor bi u većini slučajeva bio nakon što su učenici upoznati s gradivom akustike i osnova elektrostatičke i elektrodinamike. Naime, ovdje je potrebno operativno znanje (razumijevanje) pojmova izmjeničnih i istosmjernih struja, razlike potencijala, naboja, jednostavnih strujnih krugova, akustike i sl. Ustvari, koncept ovog rada može biti i

kao podsjetnik onima koji puno znaju o navedenim područjima fizike ili kao lagani uvod u elektrostatiku s naglaskom na električno polje(slikovit opis polja kroz veliki pokus).

Pravilnim i polaganim izlaganjima gradiva učenik postupno upoznaje i usvaja pojmove kojima kasnije može raspolagati jednostavnije, nego da ih je samo pročitao ili učio kroz rješavanje zadataka.

Neki dijelovi mogu se detaljno obrađivati i na dodatnoj nastavi fizike već prema potrebi i mogućnostima učenika kojima nastavnik drži nastavu.

Iz svega navedenog, vidi se kako je ovo zanimljiva tema i konstruktivan pristup nastavi jednom dijelu fizike koji inače ostaje nedovoljno shvaćen od strane učenika. Znanje koje mogu steći novim metodama u kojima više sudjeluju i u kojima mogu pokazati kreativnost, puno je trajnije i kvalitetnije usvojeno te kasnije i lakše dostupno u nastavku njihova školovanja.

2. Način izvođenja nastavne cjeline

2.1. Konstruktivistička nastava fizike

Dosadašnja metoda poučavanja učenika u školama značila je obično da nastavnik priča dok učenici, više ili manje, pažljivo slušaju. No, primjetilo se da ovakav pristup nastavi ima puno nedostataka. Tako, primjerice, na kasnijim ispitivanjima znanja učenici pokazuju veliko nerazumijevanje gradiva iako su predmet odslušali i položili.

Naravno, u psihologiji je već poznato da su ono što čovjek čuje i ono što zapamti dvije vrlo različite stvari.

Upravo zbog tih, i sličnih, razloga bilo je potrebno uvesti nov pristup nastavi.

Konstruktivizam je jedna ideja u tom novom pristupu. Naime, više se ne razmišlja o tome da se učenicima znanje diktira, već da oni ravnopravno (u kolikoj mjeri je to praktično moguće) sudjeluju u nastavnom procesu. Ustvari, možda je bolje reći u procesu učenja, jer to bi nastava i trebala označavati, učenje. Čak je nekorektno reći da se održava predavanje, već da se vodi nastava.

U konstruktivističkoj nastavi je, dakle, pristup bitno drugačiji. Uloga nastavnika je sad da učenicima pripremi podlogu u kojoj oni mogu samostalno razmišljati te iznositi ideje, sudjelujući u procesu zaključivanja. Već je vidljivo kako je ova ideja bitna upravo u nastavi fizike.

Fizika je vrlo težak predmet za učenike, ali i njihove nastavnike. Možda je nastavnicima još i teže jer na njima leži odgovornost za kvalitetu znanja koje će slušatelji usvojiti pa je potrebno uložiti puno truda i sati pripreme za kvalitetnu obradu nastavne jedinice.

U nekim zemljama fizika se u školama nudi na izbor, ili kao samostalan predmet ili u sklopu predmeta znanosti (najčešće zajedno s biologijom i kemijom). Primijećeno je da ovako ponuđenu fiziku učenici uglavnom izbjegavaju. Ako to mogu, naravno, dok je u sklopu znanosti uglavnom izbjegavaju nastavnici.

Ako je vjerovati tim podacima, možemo slobodno fiziku smatrati nepopularnom ili preteškom da bi izazvala veće zanimanje kod svih osim nekolicine zainteresiranih. Ovo predstavlja velik problem s obzirom na to koliku važnu ulogu fizika ima u svim područjima modernog svijeta. Poznato je, također, koliku važnu ulogu imaju i sami nastavnici u odabiru studija kod svojih učenika.

U tradicionalnoj nastavi, gdje se znanje učenicima 'diktira' od strane nastavnika, razina spoznaje i kvalitetnog razumijevanja i pamćenja gradiva kreće se u niskim postocima($\approx 20\%$) pa je očito potrebno napraviti neke promjene. Ove spoznaje su dobivene psihološkim istraživanjima pa vrijede općenito za odnos predavač-slušatelj, dok je u fizici, gdje je potrebno uložiti puno truda za razumijevanje gradiva, za očekivati da je postotak još niži.

Konstruktivistička teorija nam govori kako učenici moraju aktivno sudjelovati u nastavi, a nastavnik je tu kao voditelj koji usmjerava učenika na pravi put. Dakle, nastavnik je tu kako bi olakšao i skratio vrijeme razmišljanja o problemu, a nikako ne da služi kao sredstvo da se taj proces zaobiđe. Ako učenik aktivno ne svlada neke pojmove, neće ih nikada kvalitetno naučiti i zapamtiti. Poznato je čak da učenik za potrebe školskog gradiva prihvaća ono što čuje i kad dobije ocjenu, sve ili zaboravlja ili se vraća na vlastito, i često pogrešno, tumačenje.

Pri izvođenju nastave fizike vrlo je važno učenicima pružiti priliku i osigurati mogućnosti praktičnih pokusa. Mjerenja koja se izvode prilikom praktične nastave omogućuju učenicima da se aktivnije uključe u rješavanje problema te im omogućuju primjenu i produblјivanje već naučenog teoretskog znanja.

Ako postoje uvjeti za nju, od neprocjenjivog je značaja praktična nastava gdje se po prvi puta nešto 'stvara'. Ovo omogućuje jedan znanstveni pristup te često omogućuje interdisciplinarnost u primjeni znanja.

2.2. Primjena na gradivo elektrostatskog emitera

2.2.1. Uvod

Uzevši u obzir sve navedeno, izvođenje nastave s ovom tematikom trebalo bi pobuditi zanimanje učenika za fiziku. Naime, spomenuta je razina zanimanja za elektrostatski emiter velika pa to svakako treba iskoristiti.

Prilikom uvoda reći ćemo nešto o zvuku. Akustika nam nije primarno od interesa ovdje, ali je poželjno, može se slobodno reći i nužno, spomenuti neke važne dijelove.

Naravno, elektrostatiку kao i dijelove iz elektrodinamike i ostalog potrebnog gradiva također, iznijeti ne ulazeći previše u dubinu ili matematiziranje.

Nepotrebno je posebno isticati važnost pokusa u nastavi fizike jer je to odavno već poznato. Kao i pojam zornog pojašnjenja nekog problema pokus direktno pokazuje (ako je dobro odabran) odnos promatranih veličina i onoga što se mjeri.

Samo izvođenje sata trebalo bi podijeliti na nekoliko odvojenih cjelina kako bi učenik lakše usvojio nove pojmove. A s obzirom da se radi o novom pojmu (elektrostatski emiter), ali s poznatim prizvukom (emiter kao zvučnik), trebalo bi ostaviti malo vremena da se 'stvari slegnu'.

Odmah mora biti jasno da se tu radi o nekim drugačijim principima rad, nego kod običnih dobro poznatih zvučnika (dobro poznatih iz iskustva, ali i ovdje bez pravog znanja o načinu rada).

Učenik će ovdje imati pretkonceptije (vlastito mišljenje o tome kako funkcioniraju prirodni zakoni) pa pristup mora biti takav da olakša promjenu. Ništa ne smije biti učinjeno prebrzo ili s preskakanjem nekih dijelova.

Za očekivati je da se obrada ovog gradiva produži na više sati.

Trebalo bi već poznavati gradivo iz akustike te ga potkrijepiti zanimljivostima ili ih ponovno istaknuti. Pokazalo se korisnim uvesti stvarne vrijednosti snage postojećih audio sistema (npr. Hi-Fi linija od 200 W i sl.) te ih prokomentirati. Oni nisu bitno u nastavku ovog problema, ali učenik će lakše shvatiti o čemu se radi te se, vrlo vjerojatno, uključiti u raspravu. Ako se to uspješno odradi na neobavezan i opušten način, lakše je prijeći na objašnjenje pojmova energije, intenziteta i dr.

Kod intenziteta se lako dalje mogu praviti usporedbe, pa se učenik dodatno upozna s logaritamskim odnosima kod snage, energije i dr.

2.2.2. Izvođenje nastavnog sata

Sat započinjemo pitanjima o tome što je zvuk. Slijedi jedan manji dio o tome kako bi zvuk proizveli. Sad postavimo pitanja o tome kako učenici misle da se zvuk širi. Slijedi rasprava i o tome.

Ovdje se rasprava mora voditi u smjeru zaključka da je zvuk prenošenje energije i da zvučni val djeluje na okolinu. Ovo ne služi toliko samoj obradi elektrostatskog emitera, ali se akustika obrađuje u dovoljnoj mjeri tako da nam je potrebno razmatranje pojmova kao što je energija.

Ne ulazeći nikako u dubinu, raspravlja se o tome kako zapravo zvuk izgleda s aspekta longitudinalnog vala. Ne treba se ni ovdje previše 'razbacivati' stručnim pojmovima iz drugih grana fizike. Iako su ih učenici već prošli, nije sigurno da ih u potpunosti i

razumiju pa im ne treba skretati pozornost s glavne teme ili ih već na početku zaplašiti i demotivirati.

Ustvari, naglasak treba staviti na vizualni aspekt objašnjavanja s puno slika, animacija i sl.

Sad je pravi trenutak da se raspravi mogućnost nekog alternativnog načina pretvaranja signala u zvučni val (mehaničku energiju). Alternativnog utoliko što se s nekim učenicima i razredima može neobavezno raspraviti i o zvučniku kao uređaju pa naći drugačiji pristup iako bi preporuka ovdje bila da se krene odmah na elektrostatičnu s obzirom da je to glavna tema.

Malo je vjerojatno da će se netko dosjetiti baš ideje načina rada elektrostatskog emitera, ali pravilnim vođenjem sata netko od učenika bi trebao smisliti nešto slično. Treba naglasiti kako se ne treba puno vremena trošiti na raspravu o akustici jer je glavni fokus teme, kako smo već rekli, elektrostatika.

Kad se konačno dođe do uvođenja novog pojma otvara se teoretska rasprava o načinu rada i detaljnijoj analizi fizike iza svega. Način prezentacije gradiva ne mora biti unaprijed strogo definiran, s obzirom da su teme iz fizike potrebne za razumijevanje i praćenje sata već obrađene, i bit će drugačiji od razreda do razreda.

Npr. ako smo definirali problem i nastojimo ga riješiti, onda i pristupamo upravo tako. Imamo posla sa emiterom koji proizvodi zvuk. Stoga nam treba membrana koja se pomiče pod utjecajem neke pogonske sile. Učenicima mora biti jasno da tu pogonsku silu moramo u svakom trenutku kontrolirati i moći je 'proizvesti' dovoljno za neometan rad.

Na ovaj način elegantno dolazimo do gradiva elektrostatičke, međudjelovanja naboja, mehanike, elastične sile, napona, snage, energije, izmjeničnih struja i akustike. Još jednom je bitno upamtiti kako se neka od ovih poglavlja obrađuje vrlo malo ili ih se u potpunosti preskače.

Napomena je da se ovdje, ako to nije bilo već prethodno obrađeno gradivo, ne uvodi i ne razrađuje elektronika jer je to samo po sebi vrlo zahtjevna cjelina za čije kvalitetno svladavanje treba uložiti puno vremena i truda. Ako bi se učenicima sve nametnulo odjednom vrlo je vjerojatno da bi to izazvalo samo pomutnju i manjak pažnje.

U ovom radu elektronika se tretira kao 'crna kutija', nešto čiju unutrašnjost ne trebamo poznavati da bi proučavali ostatak materije.

Dakle, uvođenjem pojmova elektrostatičke poseban naglasak dajemo pojmu električnog polja. To je ono što nam čini okosnicu rada emitera.

Električno polje će ovdje naoko postati alat kojim proučavamo nešto drugo, u ovom slučaju praktičnu izradu elektrostatskog emitera.

Dakle, kako se problem razrađuje, teme se same otvaraju. Na nastavniku je da procijeni koliko će dodatnog vremena potrošiti na što, ovisno o reakciji učenika.

Najvažniji bi dio rasprave u početku trebao biti međudjelovanje električnog polja s nabijenim česticama i tijelima, odnosno rasprava o pojavi sile. Nadalje, kako mi tu silu možemo iskoristiti i kako je najjednostavnije održati.

Sad se razmatra fizika kondenzatora jer se ovdje radi o kondenzatorskom emiteru. Ne treba ni u jednom trenutku odstupiti od ideje da je naglasak na električnom polju, a ne na strujnim krugovima ili akustici i dr.

Oko same izrade emitera treba dobro razmisliti opravdava li tema utrošak vremena. Ako nastavnik, odnosno, škola ima sredstava za izradu može se obraditi i taj aspekt. Ostaje problem što je nemoguće svima dati mogućnost da se bave praktičnim dijelom pa bi ovaj dio mogao ostati za, primjerice, naprednu nastavu fizike ili kao tema za natjecatelje.

S obzirom na važnost pokusa u nastavi fizike svakako bi trebalo imati jedan demonstracijski model koji će se učenicima pokazati da jasno vide o čemu se radi.

3. Zvuk

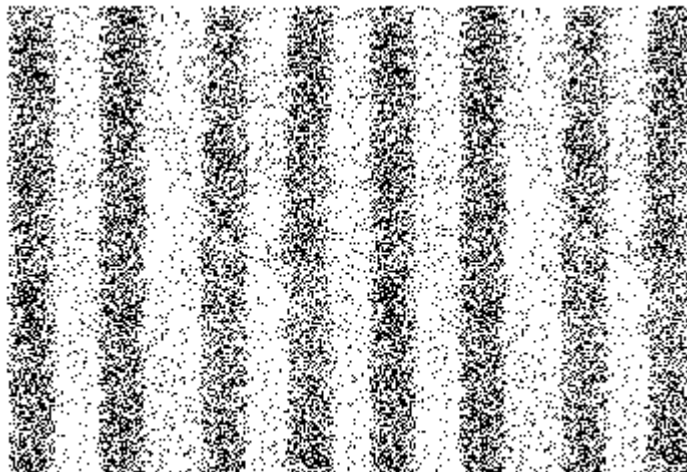
3.1. Nastanak i prijenos

Zvuk je osjetilni podražaj nastao poremećajem(mehaničkim djelovanjem) u okolini. Možemo slobodno reći da zvukom nazivamo sve što čujemo, odnosno zamijećujemo sluhom. Prema fizikalnoj definiciji to je titranje u plinovitim, tekućim i krutim elastičnim tvarima.

Zvuk je valna pojava pa se tako i prostire kroz prostor pomoću nekog sredstva(medija), u našem iskustvu je to najčešće zrak ili voda.

Dakle, za ovu pojavu vrijede svi zakoni valnog gibanja pa tako i gibanje zvuka zamišljamo kao val. I to longitudinalni val, jer se čestice medija gibaju u smjeru širenja zvuka.

Pojedine čestice vezane su međusobno elastičnim silama. Pomak jedne čestice, ili jednog dijela te sredine, prenijet će se preko elastičnih veza na okolne čestice, ili na okolne dijelove. Tako će se početni pomak postupno prenijeti na cijelu sredinu. Sl. 3.1. prikazuje način na koji možemo zamisliti gibanje čestica medija koji prenose zvuk.



3.1.smjer širenja zvuka

Prikazan je longitudinalni val i čestice zraka koje prenose poremećaj, a s obzirom da se radi o zvuku proizvedenom na uređaju, možemo ga zamisliti kako mehaničku promjenu tlaka koju uzrokuje nekakvo sredstvo sa stalnim periodom.

Također, između susjednih čestica zamišljamo djelovanje sila pomoću opruga. Naime elastične sile djeluju na čestice i vraćaju ih u prvobitni položaj. Tako nastaje val jer čestice titraju oko ravnotežnog položaja

Riječ zvuk ima dva značenja: subjektivno ili psihološko i objektivno ili fizikalno. U prvom smislu zvuk je vezan za slušni osjet, a u drugome je to energija koja se širi i onda kad nema uha koje bi je otkrilo. Tako, primjerice, u vakuumu nema širenja zvučnog vala jer nije prisutan medij koji bi to omogućio pa ne možemo govoriti ni o zvuku iako postoji nekakva pobuda(energija) koja bi u drugim uvjetima proizvela možda i vrlo glasan zvuk.

3.2. Priroda zvučnog vala

Tijelo koje titra proizvodi u okolnoj atmosferi zvučne valove. Takvo je upravo i titranje membrane kod emitera. Membranu na titranje prisiljava pogonski mehanizam. Svaki njezin titraj proizvede jedan zvučni val. Kako titranje traje kontinuirano, valovi koji slijede, jedan za drugim, šire se u prostor oko ploče.

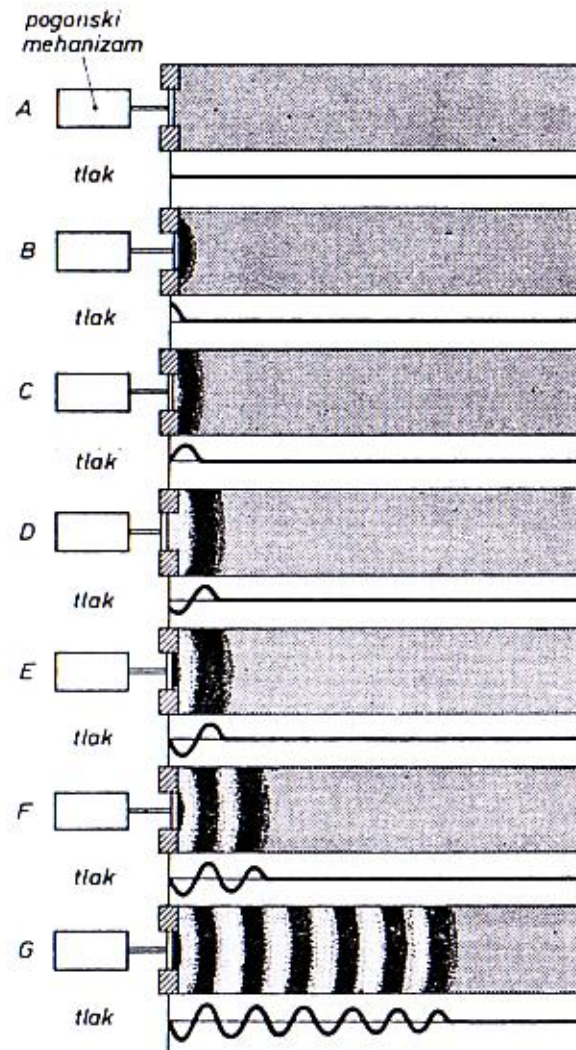
Iako je istaknuto širenje ispred ploče, valovi se zbog načina titranja membrane, u slabijem intenzitetu, šire i iza nje. Kod našeg promatranog elektrostatika širenje će biti izrazito istaknuto prema naprijed ispred ploče. Odatle još i naziv planarni emiter audio signala, no o tome nešto kasnije.

Na sl. 3.2. vidi se ponašanje zvučnog vala nastalog titranjem mehaničke membrane. U svakom trenutku vidljivo je nastajanje kratkotrajnog poremećaja tlaka okolnog zraka. Detalji ovdje nisu bitni, ali je iz slike vidljivo kako nastaje zgušnjavanje i razrijeđenje koje slijedi odmah iza.

Brzina zvuka u zraku približno iznosi 343 m/s(1234,8 km/h). Evo i nekoliko podataka za brzinu zvuka kroz ostala sredstva:

Kisik	317 m/s
Dušik	388 m/s
Helij	971 m/s

Vodik	1270 m/s
Petrolej	1330 m/s
Voda(slatka)	1440 m/s
Glicerin	1920 m/s



3.2. nastajanje zvuka pomoću mehaničke membrane

3.3. Frekvencija i valna duljina

Broj titraja u sekundi naziva se frekvencija i izražava u hercima (Hz). Čovječje uho čuje frekvencije od 16 Hz do 20 000 Hz. Frekvencije niže od donje granice nazivamo infrazvuk i ono se osjeti kao potresanje, dok se područje iznad 20 kHz naziva ultrazvuk.

Razmak između dvije susjedne točke najvećeg zgušnjenja, ili točaka najvećeg razrjeđenja medija kojim se prostire zvučni val, naziva se valnom duljinom. Odnos ove dvije veličine je povezan s brzinom:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

gdje su λ valna duljina, ν frekvencija, a c brzina širenja zvuka.

Frekvencija je, dakle, broj ponavljanja valnih duljina u jednoj sekundi.

U akustičkom je području odnos valnih duljina, zbog velikog raspona frekvencije, vrlo velik. Tako, npr. frekvenciji od 16 Hz pripada valna duljina zvuka nešto veća od 20 m, dok pri 20 kHz valna duljina iznosi nešto manje od 2 cm

3.4. Zvučni tlak, intenzitet i snaga

Širenjem zvuka kroz prostor, zvučni se tlak superponira atmosferskom, tako da u jednoj poluperiodi ukupni tlak naraste iznad vrijednosti atmosferskog, a u idućoj padne ispod. Slično kao i kod vrijednosti napona kod izmjenične struje i ovdje je vrijednost efektivnog tlaka umanjena za $\sqrt{2}$. Općenito vrijedi:

$$p = \frac{p_{\max}}{\sqrt{2}}$$

Zvučnim se valom, dakle, prenosi mehanička energija. Prenosi se brzinom zvuka.

Količina enerije koja u jednoj sekundi prođe kroz 1 m² okomito, na smjer širenja, postavljene plohe naziva se intenzitetom ili jakošću, I .

Zvučna snaga P je energija koja u jednoj sekundi prostruji kroz plohu veličine S postavljenu okomito na smjer širenja zvuka.

Za zrak vrijedi:

$$I = \frac{p^2}{410} = 2,44 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 (W / m^2) ; P = 2,44 \cdot 10^{-3} \cdot S \cdot p^2 (W)$$

gdje je p tlak u Paskalima.

Iznosi snaga nekih emitera zvučnih signala:

Normalan razgovor	$7 \cdot 10^{-6} \text{ W}$
Vršna snaga ljudskog glasa	$2 \cdot 10^{-3} \text{ W}$
Violina	10^{-3} W
Klavir	$2 \cdot 10^{-1} \text{ W}$
Orgulje	1 - 10 W
Bubanj	10 W
Veliki zvučnik	10^2 W

Vidljiva je malena snaga ljudskog glasa. Kad bi svi posjetitelji nekog koncerta od oko 50 000 ljudi zapjevali u isto vrijeme u sav glas, proizvedena zvučna snaga iznosila bi oko 100 W! Usporedivo s jednom žaruljom!

3.5. Decibeli

U akustici su omjeri zvučnih snaga i omjeri zvučnih intenziteta vrlo veliki. Jedva čujno područje odgovara intenzitetu od 10^{-13} W/m^2 dok bol nastaje pri intenzitetu od 10^{-13} W/m^2 . Jasno se vidi da je odnos intenziteta $10^{13}:1$ pa je praktično tako velike omjere izražavati logaritamskom mjerom.

Logaritam odnosa između dviju zvučnih snaga izražava se u belima(B), ali je iz praktičnih razloga jednostavnije upotrebljavati manju jedinicu, decibele(dB). Decibel je, dakle, deset puta manja vrijednost od bela. Općenito vrijedi za decibele:

$$n = 10 \log \frac{I_1}{I_2} (dB)$$

gdje su I_1 i I_2 zvučni intenziteti, a n broj decibela koji nam govori njihov odnos.

Dani su primjeri za neke odnose snaga i decibela:

Odnos snaga	Decibeli
1	0
2	3,0
3	4,8
4	6,0
5	7,0
6	7,8
7	8,5
8	9,0
9	9,5
10	10
100	20
1 000	30
10 000	40

100 000	50
1 000 000	60

Prednost je, dakle, u tome što se upotrebom decibela radi s manjim brojevima. Ustvari, neke važne osobine sluha su vezane uz logaritamski odnos, npr. ako pogledamo samo raspon intenziteta koje uho čuje uočljivo je, već na prvi pogled, kako je to precizan 'instrument'.

Zvuk intenziteta $I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$ uzima se kao *prag čujnosti* ljudskog uha pa se može definirati pojam *razine zvuka* kao deseterostruki logaritam omjera intenziteta:

$$n = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ (dB)}$$

Navedene su neke vrijednosti razine zvuka:

Izvor	Razina zvuka / dB	Intenzitet / W m^{-2}
Zrakoplov na 30 m	140	100
Prag boli	120	1
Rock koncert	110	≈ 1
Sirena na 30 m	100	$1 \cdot 10^{-2}$
Unutrašnjost auta pri 100 km/h	75	$3 \cdot 10^{-5}$
Ulica	70	$1 \cdot 10^{-5}$
Razgovor	65	$3 \cdot 10^{-6}$
Radio	40	$1 \cdot 10^{-8}$
Šapat	20	$1 \cdot 10^{-10}$
Šuštanje lišća	10	$1 \cdot 10^{-11}$
Prag čujnosti	0	$1 \cdot 10^{-12}$

Ako bi htjeli izračunati omjer snaga između dva zvučna izvora, koristimo se navedenim izrazom.

Primjer 1!

Zad: Koliki je omjer zvučnih snaga dvaju izvora ako je razina zvuka prvog 100 dB, a razina zvuka drugog izvora 120 dB?

Rj: zapisujemo izraze;

$$100 = 10 \log \frac{I_1}{I_0},$$

$$120 = 10 \log \frac{I_2}{I_0}.$$

Računamo:

$$120 - 100 = 10 \log \frac{I_2}{I_0} - 10 \log \frac{I_1}{I_0}$$

i koristeći pravilo logaritmiranja $\left(\log \frac{a}{b} = \log a - \log b \right)$ dobivamo

$$20 = 10 \log \frac{\frac{I_2}{I_0}}{\frac{I_1}{I_0}}, \text{ tj. } 2 = \log \frac{I_2}{I_1}$$

$$10^2 = 10^{\log \frac{I_2}{I_1}}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = 10^2 = 100.$$

Slijedi da je omjer snaga jednak 100!

Dakle, za svakih deset decibela, snaga se poveća deset puta. Za svakih dvadeset decibela snaga se poveća sto puta, za trideset se poveća tisuću puta itd. Na ovakav način se brzo može provjeriti neka karakteristika ili usporediti snage(u našem slučaju, emitera).

Primjer 2!

Zad: za koliko se promjeni razina zvuka ako snagu izvora koji emitira signale povećamo dva puta?

Rj: zapisujemo izraze;

$$n_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0},$$

$$n_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0}.$$

$$I_2 = 2I_1$$

Računamo:

$$n_2 - n_1 = 10 \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right)$$

$$n_2 - n_1 = 10 \log \left(\frac{2I_1}{I_1} \right) = 10 \log 2$$

$$n_2 - n_1 \approx 3dB$$

Vidimo da je razlika 3 dB. Dakle, za svako udvostručavanje snage iz emitera slijedi 3 dB veća razina zvuka. Drugim riječima, za svaka 3 dB veću razinu zvuka snagu moramo povećati dva puta.

4. Elektrostatski emiter

4.1. Osnove elektrostatika

Vidjeli smo, u poglavljima koja se bave uvodom u akustiku, neke pojedinosti o zvuku. S obzirom da se ovdje počinjemo baviti emisijom te našim posebnim načinom dobivanja zvuka, uvodimo i pojam elektrostatskog emitera.



4.1. elektrostatik

Emiter zvuka jest ustvari zvučnik, ali ovdje i dalje u tekstu ipak govorimo o emiteru kako bi izbjegli probleme i pojedinosti vezane uz aspekt promatranja s audio tehničkog gledišta. Posebnosti elektrostatika su vezane uz način njegova rada te kako se postiže sama emisija zvučnih signala. Već na prvi pogled jasno je vidljivo kako principi rada ovog emitera nisu isti kao kod klasičnih zvučnika (također emitera audio signala).

Na slici 4.1. prikazan je jedan tip elektrostatskog emitera jednog tržišnog proizvođača.

Na prvi pogled vidi se razlika sa svome dosad poznatim. Nepoznata struktura elemenata i njihov raspored i sl.

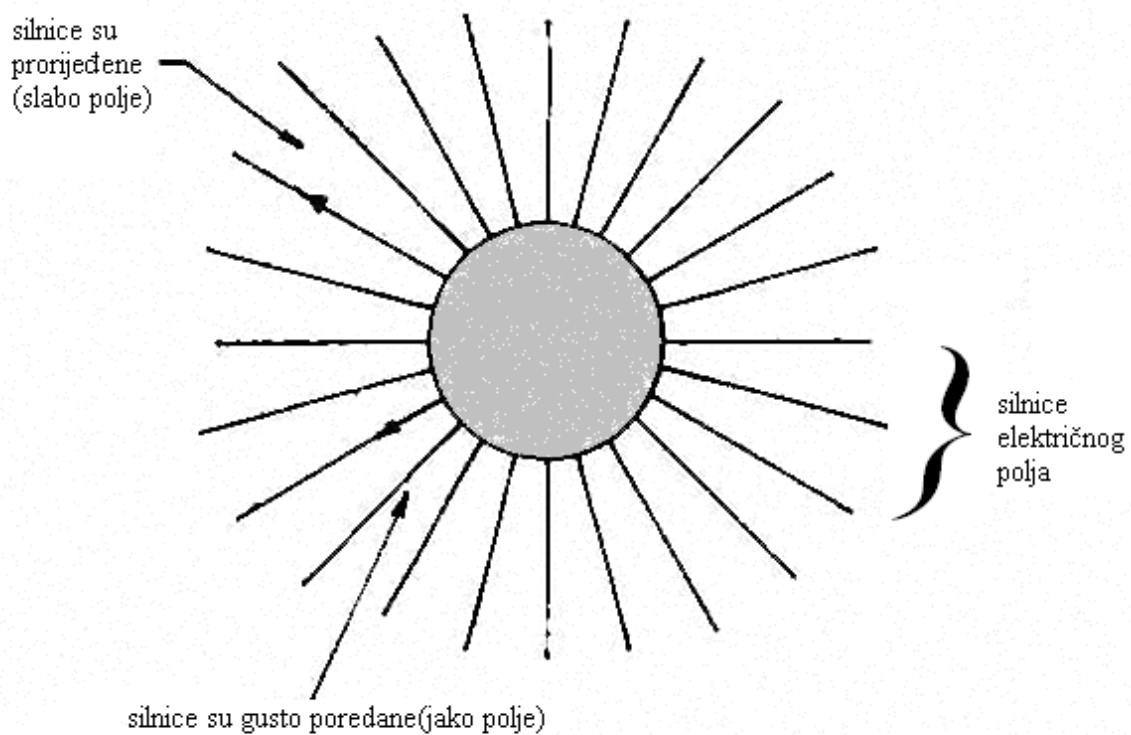
Pa idemo sami izgraditi potrebnu teoriju potrebnu za jednostavnu verziju emitera, koja nam opet može reći jesmo li bili u pravu kad smo sve potrebno razmatrali. Ako pravilno postupimo, moći ćemo direktno vidjeti kako se praktično mogu iskoristiti naša znanja elektrostatike.

Vratimo se malo u povijest i vrijeme kad je sve počelo. Naime, već je početkom dvadesetog stoljeća primijećeno da neki kondenzatori ‘pjevuju’. Radilo se o titranju stranica loše izvedenih kondenzatora sa staklenim pločama koji su pod djelovanjem velikih električnih polja jednostavno počeli titrati u ritmu električnih signala koji su na njih dovedeni. Može se tako reći da je elektrostatski emiter zapravo kondenzatorski emiter. Naime, iskorištavanjem svojstava kondenzatora, pogoni se ovakav mehanizam.

Dakle, radi se o specijalnoj izvedbi kondenzatora iako mora biti rečeno da je osnovno načelo rada elektrostatskih zvučnika upravo privlačenje i odbijanje među električnim nabojima. A privlačenje i odbijanje naboja zajedno s pojmom kondenzatora govore nam da se ovdje radi i o električnom polju.

4.2. Električni naboj i električno polje

U prirodi postoji elementaran naboj kojeg nose nabijene subatomske čestice. Naboj definiramo kao negativan i pozitivan i prepoznamo činjenicu da je u prirodi prisutan jedinični naboj(najmanji i nedjeljivi iznos naboja), a imaju ga protoni i elektroni. Svaka količina naboja višekratnik je ovog broja. Elementarni naboj iznosi $\pm 1,609 \cdot 10^{-19} \text{C}$ (Coulomba).



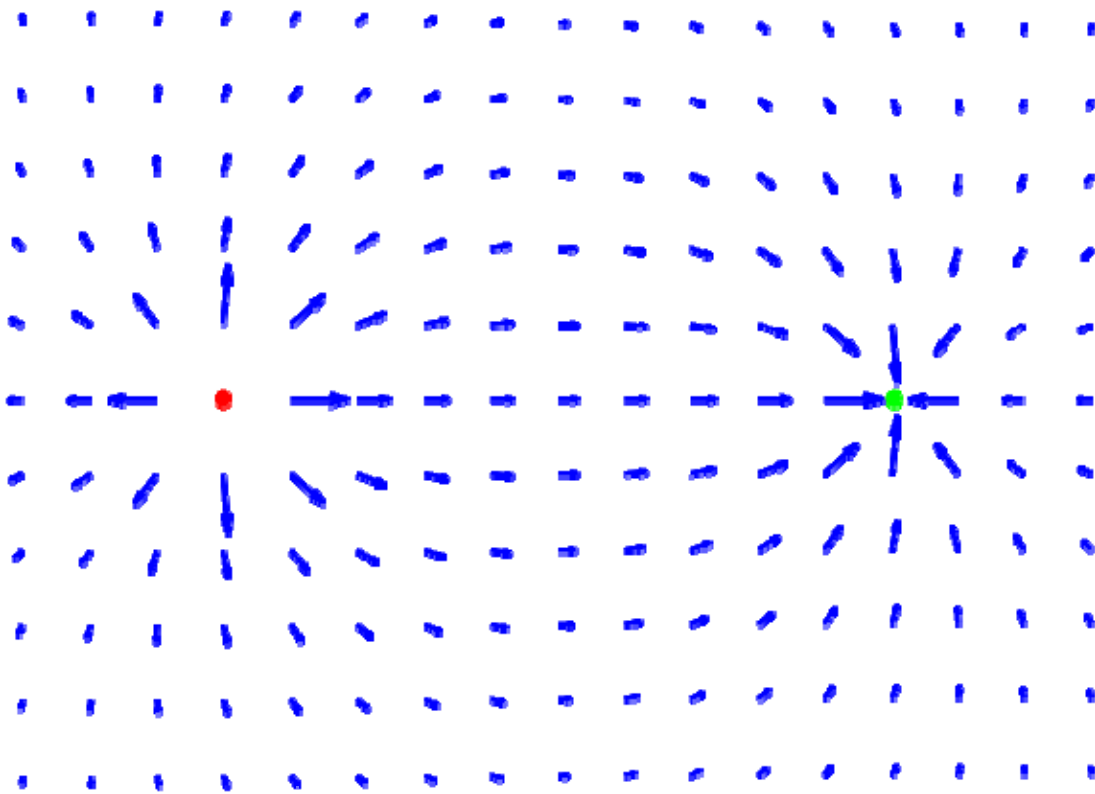
4.2. silnice električnog polja kod protona

Na sl 4.2. vidimo silnice koje izlaze iz naboja. Silnice su radijalno usmjerene prema van i blizu naboja su gušće i kako se udaljavamo od izvora one se prorjeđuju.

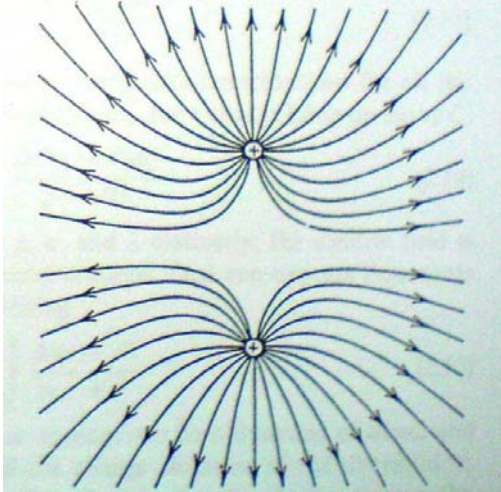
Vidimo da je ovdje prikazan proton jer je dogovoreno pravilo da silnice iz protona (pozitivnog naboja) 'izviru' dok u negativni naboj(elektron) 'poniru'. Silnice koje iz naboja ili nabijenog tijela izviru ili u njega poniru stvaraju oko sebe pravilnu 'mrežu' koje nazivamo poljem. Sl. 4.3. prikazuje dvije čestice u prostoru.

Ovdje se radi o električnom polju. Električno polje je prostor u kojem na druga nabijena tijela djeluje sila. Sila može biti privlačna ili odbojna, a ovisi o vrsti naboja. Istovjetni naboji se odbijaju dok se suprotni privlače.

Vidimo, dakle, da se na dva naboja može gledati kao na dva različita izvora električnog polja koja djeluju na drugi naboj. Ako u prostor, primjerice, stavimo jedan proton i jedan elektron, oni će međusobno jedan na drugoga djelovati nekom silom. Tako će polje elektrona djelovati na proton dok će polje protona djelovati na elektron. Sl. 4.4. prikazuje jedan takav slučaj; dva para: (a)proton-proton i (b)proton-elektron.



4.3. prikaz međudjelovanja dvije suprotno nabijene čestice



4.4.(b) el. polje proton-proton

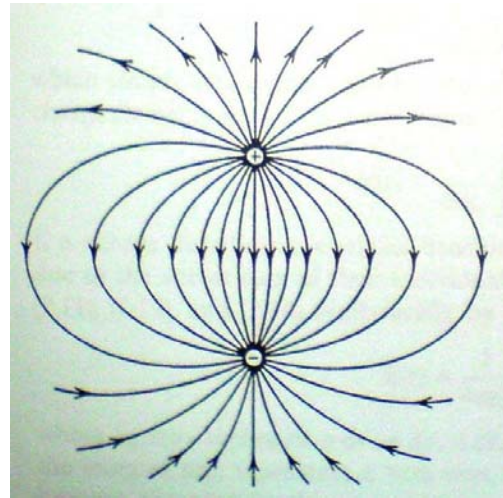
Stranice su nabijene suprotnim nabojeima pa je jasno da iz jedne silnice izvire dok u drugu poniru.

Kod prikaza silnica polja unutar kondenzatora upotrijebljena je skica idealiziranog stanja. U stvarnosti se silnice prostiru i izvan kondenzatora, ali nama to ovdje za razmatranje nije toliko bitno. Ono na što moramo obratiti pažnju jest postojanje polja i njegovo djelovanje na obje stranice

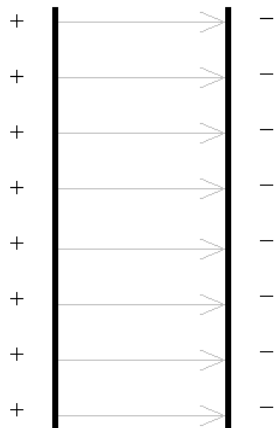
No, sve ovo je teoretski prikaz na atomskom nivou. Imamo li još negdje slučaj postojanja i djelovanja električnog polja?! Pa, znamo za jedan takav slučaj.

Razmotrimo kondenzator i što se u njemu događa.

Dvije metalne plohe na koje smo doveli naboje. Znamo da naboje stvaraju oko sebe polje pa ga moraju stvarati i u ovim uvjetima. Kako izgleda ovakvo električno polje?! Slika 4.5. prikazuje kondenzator i polje između stranica.



4.4.(b) el. polje proton-elektron



4.5. električno polje u kondenzatoru

Dakle, polje djeluje na naboje koji se nalaze na obje strane kondenzatora. Naravno, ako se unutar polja nađe nabijena čestica i na nju će djelovati polje pa će tako biti privučena ili odbijena od jedne od stranica ovisno o svom naboju. Ali mi razmatramo djelovanje polja na same stranice.

Izraz koji opisuje električno polje oko naboja:

$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

gdje je Q ukupni naboj a r udaljenost od središta nabijenog tijela. Doseg električnog polja i sile je beskonačan i, kao što se lako vidi iz navedenih izraza, opada s kvadratom udaljenosti.

Nadalje, u elektrostatici je odnos naboja, polja određen izrazom:

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \Rightarrow F = q \cdot E$$

Dakle, na nabijenu česticu djeluje sila ako se ona nalazi unutar električnog polja. Sila, slično gravitacijskoj, opada s kvadratom udaljenosti što konkretno u našem slučaju znači da smanjivanjem udaljenosti među nabijenim tijelima možemo dobiti veliku silu međudjelovanja iako polje nije pretjerano veliko. Ovo saznanje je bitno kod rada i izrade elektrostatika.

Primjer!

Zad: za koliko se smanji jačina električnog polja ako se od izvora silnica pomaknemo na dvostruko veću udaljenost?

Rj: zapisujemo izraze:

$$r_1 = 2r_0$$

$$E_0 = k \frac{q}{r_0^2}, \quad E_1 = k \frac{q}{r_1^2}$$

Računamo:

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{k \frac{q}{r_1^2}}{k \frac{q}{r_0^2}} = \frac{r_0^2}{r_1^2} \Rightarrow \frac{E_1}{E_0} = \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2$$

$$\frac{E_1}{E_0} = \left(\frac{r_0}{2r_0} \right)^2 = \frac{1}{4}$$

Dakle,

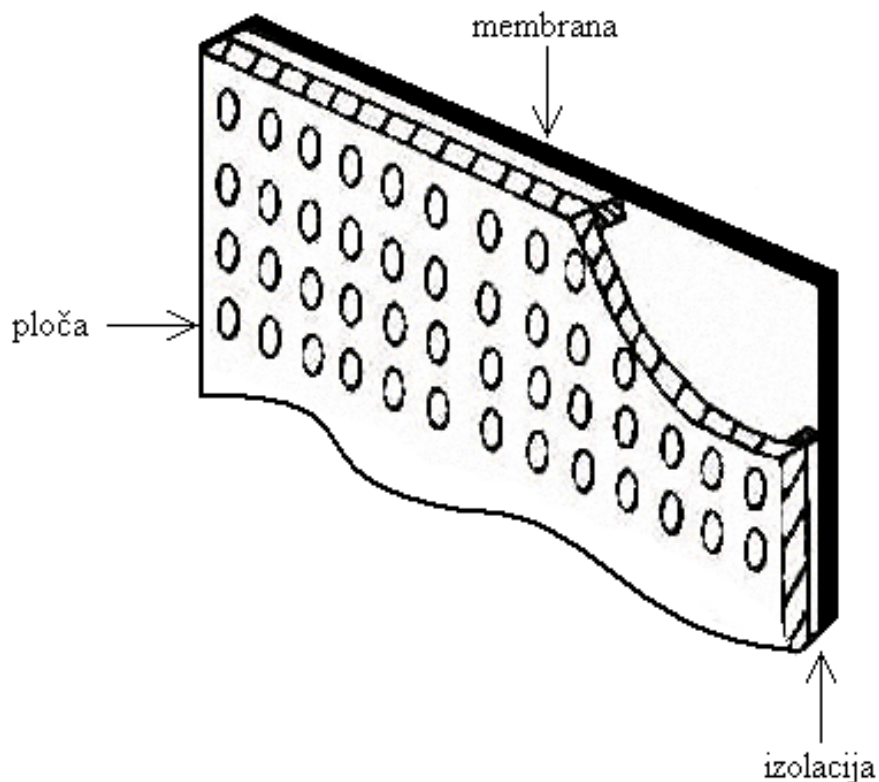
$$E_0 = 4E_1$$

Drugim riječima, ako se pomaknemo na dvostruko veću udaljenost sila će se smanjiti četiri puta, na trostrukoj udaljenosti iznos je devet puta manji, dok na četiri puta većoj udaljenosti iznosi 1/16 početne vrijednosti.

4.3. Izvedba membrane

Vidjeli smo da se stabilno električno polje stvara oko naboja i da postojeće polje djeluje silom na druge naboje. Ako želimo gibanje membrane koja stvara zvuk, onda vidimo da ju je moguće pogoniti tako da ju nabijemo nekom količinom naboja i takvu stavimo unutar djelovanja električnog polja

Sl. 4.6. prikazuje jednostavnu jednostranu izvedbu elektrostatika gdje je jasno vidljivo kako je membrana postavljena i kako može slobodno titrati.



4.6. shema elektrostatika s jednom pločom

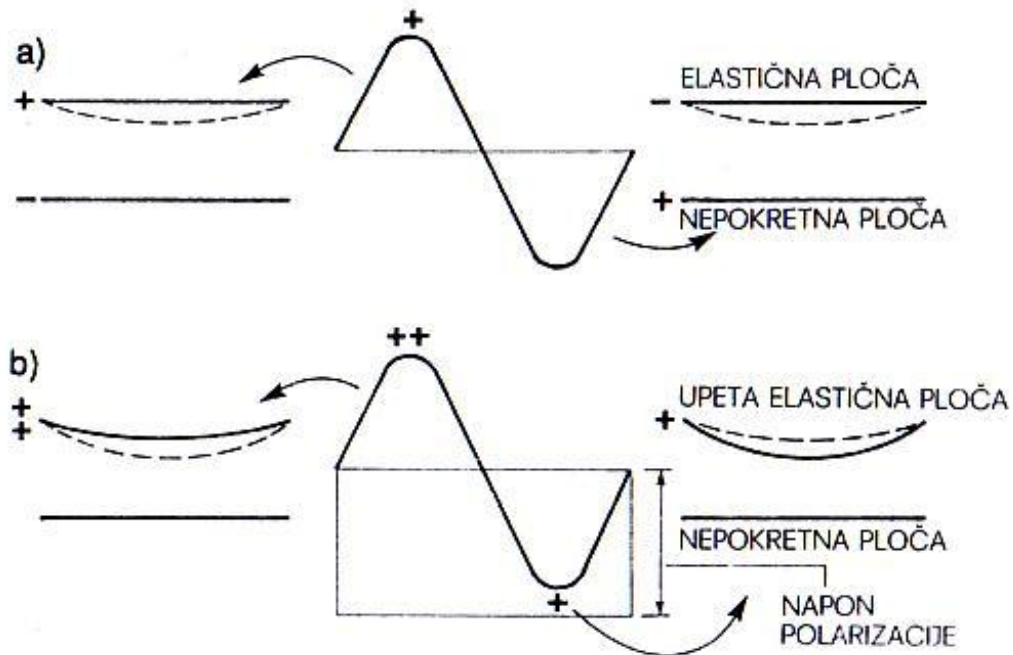
Ovakav tip elektrostatika sastoji se od nepomične ploče i membrane te zajedno čineći kondenzator, koriste električno polje za pogon membrane. Sad imamo ideju i proveli smo teoriju u djelo. Električno polje je prisutno, i membrana bi trebala titrati te proizvoditi zvuk.

Ako emiter uključimo u strujni krug što će se zapravo dogoditi? Sl. 4.7. pokazuje kako funkcionira ovakav sklop i daje nam naslutiti odgovor.

Vidljivo je da ako imamo elastičnu membranu koja istodobno služi kao stranica kondenzatora, ona bi se pri svakom povećanju potencijala približavala nepomičnoj ploči. To, dakako, ne bi proizvodilo titranje koje nam treba pa se mora naći neko drugo rješenje. Naime, kako bi postigli da nam membrana titra u ritmu signala?!

Odgovor je jednostavan. Obje ploče nabijemo tzv. polarizacijskim naponom. Iz prikaza na sl.4.7. se jasno vidi da ako postoji nekakav potencijal između ploča, signal koji dolazi mijenja trenutnu vrijednost omogućavajući membrani da titra u oba smjera.

Nabijanjem ploča membrana se u početku 'napne' i približi nepomičnoj ploči, dok daljnje promjene signala omogućuju titranje, a time i proizvodnju zvuka.



4.7. titranje membrane sa i bez polarizacijskog napona

Pokazali smo, proučavajući teoriju, kako je moguće konstruirati uređaj koji će za svoj rad koristiti električno polje, odnosno svojstva naboja i nabijenih tijela.

No, kako je naše područje od interesa emiter zvučnih signala, pogledajmo može li se tehnički izvesti ono do čega smo došli, a to je jednostrani elektrostatik.

4.4. Jednostrani elektrostatski emiter

Došli smo do dijela kad treba pogledati još jedan segment ukupne teorije rada elektrostatika, a to je mehanika gibanja membrane.

Naime, treba provjeriti je li ovakav tip uređaja moguć za kontinuiran i siguran rad. To se lako provjeri ako se pogleda u gibanje membrane pod uvjetima koje smo unaprijed odredili kao optimalne. Ustvari, razmotrit ćemo ponašanje emitera u još manje zahtjevnim uvjetima.

Pogledajmo što se događa s membranom ako nju koristimo kao drugu ploču kondenzatora. Naravno, već smo ustanovili da je potrebno imati polarizacijski napon kako bi membrana mogla titrati u oba smjera, a ne stalno biti privučena prema statoru sa svakom promjenom potencijala. Sl.4.6. prikazuje shemu jednostranog emitera.

Uzmimo da nam je dostupan napon gradske mreže, koji usput rečeno nije dovoljan za pogonjenje ovog sklopa što će biti rečeno u praktičnom dijelu izrade.

Dakle, razlika potencijala od 220 V na kondenzatoru stvara polje koje računamo pomoću izraza:

$$U = E \cdot d$$

gdje su U , E i d napon, električno polje i razmak između ploča kondenzatora. Neka je razmak između statora i membrane 1 mm, onda iz gornjeg izraza slijedi da je električno polje jednako:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{220V}{1mm}$$
$$E = 2,2 \cdot 10^5 V/m$$

Ako znamo da je kapacitet dan izrazom:

$$C = \frac{Q}{U}$$

Odnosno:

$$C = \frac{1}{4\pi k} \frac{S}{d} = \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

gdje su $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, a ϵ_0 dielektričnost vakuuma iznosa $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}$.

Ako je panel veličine $15cm \times 20cm$ onda slijedi da je ukupni naboj prisutan na membrani:

$$Q = C \cdot U = \epsilon_0 \frac{S}{d} U, \text{ što uvrštavanjem navedenih vrijednosti daje naboj}$$

$$Q = 5,8 \cdot 10^{-8} C$$

Time se dobiva sila kojom električno polje djeluje na membranu:

$$F = Q \cdot E$$

$$F = 5,8 \cdot 10^{-8} C \cdot 2,2 \cdot 10^5 V/m$$

$$F = 0,01276N$$

Iako nam se ova sila čini jako malenom, pogledajmo kolikom bi to silom djelovalo na membranu i time na okvir emitera.

Upotrijebimo Hookeov zakon kako bi vidjeli kolika nam je potrebna konstanta elastičnosti da bi držala u ravnoteži ovu silu na membranu. Naime, od membrane očekujemo titranje pa nam je potrebna povratan elastična sila koja će održavati sistem u pokretu.

Hookeov zakon kaže:

$$F = k \cdot x$$

gdje su k konstanta elastičnosti, a x pomak iz ravnotežnog položaja.

Za slučaj membrane kod jednostranog elektrostatika maksimalan pomak bi trebao biti takav da onemogući dodirivanje s nepomičnom pločom, statorom. Ako je razmak dviju ploča 1mm neka pomak bude 0,9 mm.

Dobivamo

$$k = \frac{0,01276N}{0,9mm} = 14,178 \frac{N}{m}$$

Naravno, ova sila bi djelovala okomito na površinu membrane, ali sila koja vraća u prvobitni položaj djeluje u smjeru membrane tako da se elastično rasteže. I tu primjenjujem isti princip, ali s obzirom da je pomak puno manji zbog malog kuta, konstanta elastičnosti membrane mora biti puno veća.

Kut pod kojim se membrana otklonila u odnosu na ravninu membrane prije titranja iznosi: $\alpha = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{x}{l/2}\right) = 0,6875^{\circ}$, gdje su x pomak membrane, a l duljina stranice.

Slijedi da je iznos konstante elastičnosti membrane:

$$K = \sin(\alpha) \cdot k$$

$$K = 1181,61 \frac{N}{m}$$

Dakle, da bi se to postiglo membranu bi trebalo nategnuti silom od

$$F = K \cdot \frac{l}{2} = 88,62N$$

To je kao da membranu opteretimo utegom od 9kg. Međutim, prave vrijednosti napona i električnih polja za pogon elektrostatika su puno veće pa bi ovakva izvedba značila znatno veće opterećenje na okviru emitera

Primjerice, postoje izvedbe s potencijalom od nekoliko kilovolta pa bi na takvim uređajima sila na okvir bila takva kao da ga opteretimo utegom od nekoliko stotina kilograma!

Vratimo se, nakratko, na potrebu polarizacijskim naponom. Na sl.4.7. je bilo pokazano kako bi pokretna membrana titrala sa svakom promjenom signala. Vidljivo je

da svakom promjenom signala i vrijednosti potencijala nepomična ploča privlači membranu. Dovođenjem polarizacijskog napona ovaj problem nestaje.

Polarizacijski napon je istosmjerni napon mnogo veći od trenutne promjene izazvane pobudnim signalom. Taj napon stvara stalnu silu privlačenjem ploča i takvo stanje se onda smatra mirnim. Dakle, membrana se privuče i napregne.

Pri radu emitera vrijednost polarizacijskog napona se mijenja u ritmu izmjeničnog pobudnog signala(napona) pa se elastična membrana giba u oba smjera od svog položaja u ravnotežnom stanju, sl.4.7.

No, ipak, pokazali smo da ovakav tip emitera ne odgovara ideji stabilnog uređaja kojeg je jednostavno konstruirati, a koji će pouzdano raditi.

Sila na membranu jednaka je:

$$F = k \frac{u^2}{d^2} S$$

i vidjeli smo koliko može iznositi.

Pokušajmo zato membranu staviti unutar kondenzatora. Time se dobije složeni kondenzator.

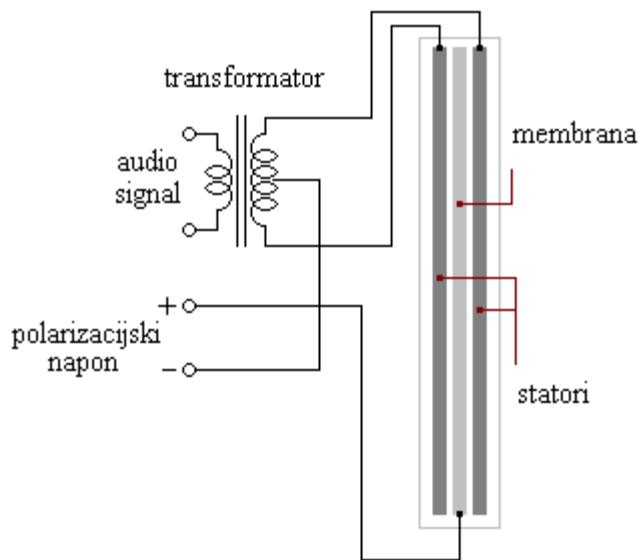
Na ovaj način bi trebali dobiti ujednačenje sila, odnosno koliko jedna stranica djeluje na membranu, sličnom silom će djelovati i druga pa bi rezultatna sila trebala biti malena.

To znači da membranu ne treba prethodno naprezati velikim silama koje ona ne bi podnijela.

Ovdje bi trebalo spomenuti i materijal membrane, s obzirom da govorimo o silama napreznja, ali o tome više u praktičnom dijelu.

Dakle, to je elektrostatski emiter s tri ploče, membrana je u sredini(pomična ploča), nepomične stranice(ploče) su rupičaste zbog prolaska zraka, i koristi polarizacijski napon na membrani tako da su na nepokretnim pločama jednaki i suprotni naponi u odnosu na membranu. Na slici 4.8. prikazana je shema jednog elektrostatskog emitera s tri ploče i polarizacijskim naponom.

Signal stiže preko transformatora i superponira (pribraja na amplitudu) se na postojeći polarizacijski napon, koji u praktičnoj izvedbi iznosi do nekoliko kilovolta.



4.8. shema elektrostatika

Ovo znači da se male promjene napona koriste za pogon membrane jer se napon mijenja i s jedne i druge strane.

Naime, signal koji stiže je, primjerice, sinusnog oblika i izmjeničnog napona pa na jednoj ploči dolazi do smanjenja vrijednosti naboja dok na drugoj ona raste.

No, ako je membrana smještena točno u sredinu između nepokretnih stranica, bez dovedenog signala, na nju će djelovati jednake i suprotne sile. Time je membrana u ravnoteži do

primjene pobudnog signala koji donosi, kako smo već rekli, promjenu količine naboja na stranicama(statorima).

4.5. Push-Pull princip rada

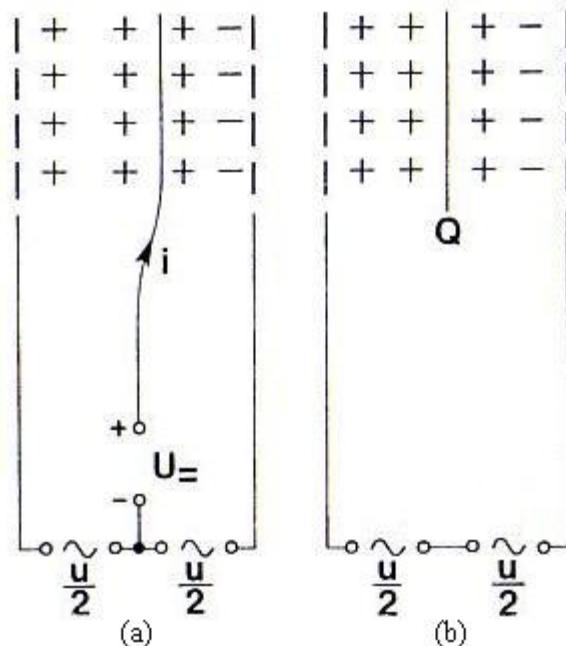
Kada se primijeni pobudni napon(dovedeni signal), jedna ploča postane pozitivna, a druga negativna, membrana se otkloni i privučena je prema negativnoj strani(na slici udesno). Ali istovremeno je i gurnuta udesno pod djelovanjem pozitivnog naboja na prvoj ploči.

Ovo je 'push-pull' princip rada, jer je s jedne strane membrana prisiljena gibati se odbijanjem dok je s druge strane privučena privlačnim djelovanjem suprotnog naboja.

Primjer ovakvog načina rada može se vidjeti na slici 4.9. gdje su prikazan neki tipovi elektrostatskih emitera.

Naime, postoji princip rada 'konstantnog napona' i 'konstantnog naboja'.

Za konceptualno shvaćanje nama nije bitno o kojem načinu je riječ, ali u praktičnoj primjeni postoje razlike.



4.9. elektrostatski zvučnik: (a) konstantnog napona te (b) konstantnog naboja

Princip rada konstantnog napona je prikazan na slici 4.9. (a) i radi se o dovođenju dodatnog naboja signalom, otklonu membrane i povećanju efektivnog kapaciteta. Naime, odnos naboja i kapaciteta je dan izrazom $Q = C \cdot U$.

Sila kod ovog tipa emitera je proporcionalna s:

$$F \propto \left(\frac{U + u/2}{d_2} \right)^2 - \left(\frac{U - u/2}{d_1} \right)^2$$

Emiter tipa konstantnog naboja radi nešto drugačije, sl. 4.9. (b).

Ako se polarizacijski napon isključi iz kruga, membrana će ostati nabijena i imat će konstantan naboj. Time se stvara sila razmjernu produktu intenziteta polja i naboja. Sila je stoga neovisna o položaju membrane između ploča. Još jedna prednost ovog tipa emitera jest smanjenje mogućnosti dodira stranica a time i kratkog spoja membrane i nepomičnih ploča.

Naime, kako se membrana približava jednoj od stranica, povećava se kapacitet, ali s obzirom da imamo konstantan naboj smanjuje se napon, ($U = Q \cdot C$) te se na ovaj način stvara suprotna sila koja ne dozvoljava prevelike ekskurzije (pomak iz ravnotežnog položaja) membrane. Sila koja nastaje proporcionalna je kao:

$$F \propto \frac{u \cdot Q}{d_1 + d_2}$$

Ukupni kapacitet sklopa dan je izrazom:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Ovo je kapacitet koji signal 'vidi' kretanjem kroz strujni krug.

4.6. Izmjenični napon kao signal

Rekli smo da na postojeći istosmjerni polarizacijski napon dovodi se izmjenični signal (napon) i to čini osnovu pogonske sile elastične membrane. Pa što je to izmjenični i istosmjerni napon?!

Elektrostatski emiter je, kako smo već vidjeli, kondenzator, kapaciteta oko 2 nF. Na stranice kondenzatora se istosmjernim naponom dovodi naboj koji se tamo 'smjesti' i ostaje statičan.

Izmjenični napon(dovedeni signal), koji je u našem slučaju puno manji od istosmjernog(polarizacijskog), mijenja trenutnu vrijednost dovedenog naboja na stranicama uzrokujući pogonsku silu na mehanizam elastične membrane i statičnih ploča.

Istosmjernan napon je struja naboja koja u jedinici vremena ima stalnu vrijednost i teče u smjeru većeg potencijala prema manjem

Izmjenični je napon struja naboja koja u jedinici vremena mijenja smjer. Broj promjena smjera u jednoj sekundi naziva se frekvencijom struje, i za gradsku mrežu iznosi 50 Hz. Izmjenična struja ima sinusni oblik. Iako je naš dovedeni signal kompleksna funkcija, može se rastaviti na više jednostavnih različitih sinusnih funkcija tzv. Fourierovom analizom.

S obzirom da je izmjenična struja opisana sinusnom ili kosinusnom funkcijom čija je prosječna vrijednost kroz puno perioda jednaka $\frac{1}{2}$, a snaga proporcionalan kvadratu vrijednosti napona, efektivna vrijednost napona je umanjena za faktor $\sqrt{\frac{1}{2}}$. To znači da, ako je vrijednost napona gradske mreže 220 V, govorimo o vršnoj vrijednosti napona od 311 V. Amplituda je na 311 V, dok je potrošena energija u nekom vremenu jednaka kao da imamo istosmjerni napon vrijednosti 220 V.

Izmjenični napon, naš signal, se dakle superponira(pribraja) postojećem konstantnom naponu(signalu sa stalnom amplitudom) i time stvara silu unutar električnog polja.

4.7. Posebnosti elektrostatika

Elektrostatik ima specifične karakteristike zbog kojih je zvuk i način na koji ga emitira u prostor nešto drugačiji nego kod dinamičkih zvučnika.

Po kvaliteti u visokom ton-frekvencijskom području elektrostatici nadilaze dinamičke zvučnike i rado su viđena pojava u domovima zaljubljenika u audio tehniku i glazbu.

S obzirom na konstrukciju moguće je zvučnike napraviti na vrlo zanimljiv način, sl. 4.10. (a), (b).

Danas sve više tvrtki proizvodi elektrostatske emitere, a i cjenovno su sve pristupačniji prosječnom korisniku.

Naime zbog specifičnih dijelova skupi su za izraditi i pogoniti, dok se slobodno može reći(što se vidjelo iz teorije, a što će posebno doći do izražaja kod izrade) da su u isto vrijeme i jednostavni.

S obzirom da se ovdje radi o membrani koja titra u oba smjera, jednako tako je posebnost i postavljanje emitera u prostoru.

Na stražnjoj strani se mora ostaviti dovoljno mjesta od prepreke, primjerice zida, da membrana može nesmetano titrati. Nadalje, zvuk se širi vrlo pravilno prema pločama tako da je moguće postići prostornu usmjerenost (planarni emiter).

Uz sve navedeno, elektrostatski emiteri i dalje ostaju skupi i rijetki uređaji koji se većini ipak ne isplati kao ulaganje. Emiteri zbog svoje konstrukcije zahtijevaju skup tehnološki proces koji nije savršen. Primjerice, na membranu se nânosi vodljivih materijala(u obliku sitnih čestica koje se deponiraju na površinu) relativno lako i brzo gube. Time emiteri gube na kvaliteti.

Naime, čestice se kroz rad polako 'skidaju' s membrane pod utjecajem jakih električnih polja. Zbog toga ih je potrebno redovito održavati. Dakle, emiteri kojima cijena već u samom početku diktira da će biti rijetka pojava, povrh svega zahtijevaju i redovito servisiranje.

Ima još niz posebnosti na koje možemo gledati kao prednosti ili nedostatke, ali jedno je sigurno, s elektrostatskim emiterima ćemo se sve češće susretati i bit će sve značajnija pojava.



4.10.(a)



4.10.(b)

5. Izrada elektrostatika

5.1. Uvod

U svijetu danas postoji velik broj zaljubljenika u audio tehniku koji se bave izradom elektrostatika. Iako nama nije primarni interes izrada komada audio opreme, elektrostatik to upravo jest tako da se relativno lako može doći do potrebnih informacija o tome kako kvalitetno, a jeftino, napraviti upotrebljiv emiter.

Ovdje nećemo nepotrebno teoretizirati o mogućnostima izrade koji bi premašili naš cilj. A to je metodičko sredstvo koje plastično demonstrira rad električnog polja, nikako ne komercijalan proizvod. Također, treba voditi računa i o troškovima, jer se radi o učeničkom praktičnom radu ili demonstracijskom sredstvu za koje škole ne bi trebale nepotrebno izdvajati velika sredstva.

5.2. Materijali

Rekli smo, dakle, da se ovdje radi o proučavanju teorije, ponajprije električnog polja pa nije potrebno, ili poželjno, ići u prevelike investicije.

Krenimo redom. Što nam je potrebno za izradu emitera?

Stator

Treba nam okvir koji će sve skupa držati na okupu i čijim će stranicama teći struja stvarajući električno polje unutar. Gradimo, dakle, stranice velikog kondenzatora koje moraju imati rupičastu strukturu kako bi zrak nesmetano mogao prolaziti i stvarati zvuk. Potrebni su nam statori elektrostata.

Statori su metalni (vodiči struje), presvučeni izolatorskim materijalom, kako se ne bi uspostavio spoj sa strujnim krugom kojim teče struja visokog napon(!). Statori su plastificirani i naručeni su iz tvornice.

U slučaju nemogućnosti nabave ovakvim putem, mogu se i ručno napraviti od npr. dvije aluminijske ploče na kojima se bušilicom izbuše rupe te se poslije se premažu izolatorom ili se plastificiraju.

Sl. 5.1.(a) prikazuje jedan od statora:



5.1. stator elektrostatskog emitera(a)

Stator je na radnom stolu pripremljen za ugradnju membrane. Vidljiva je plastifikacija koja služi kao izolator(crna presvlaka).

Statori su spojeni u električni krug preko žica koje se spajaju na okvir.

Žica vodiča je spojena na stator direktno na metalni dio tako što je sastrugana izolacija na malo površini te žica tamo zalemljena, sl. 5.1.(b).



(b)

Membrana

Između statora potrebno je postaviti elastičnu membranu. Ovo treba biti izvedeno tako da između statora i same membrane ostane slobodnog prostora za titranje.

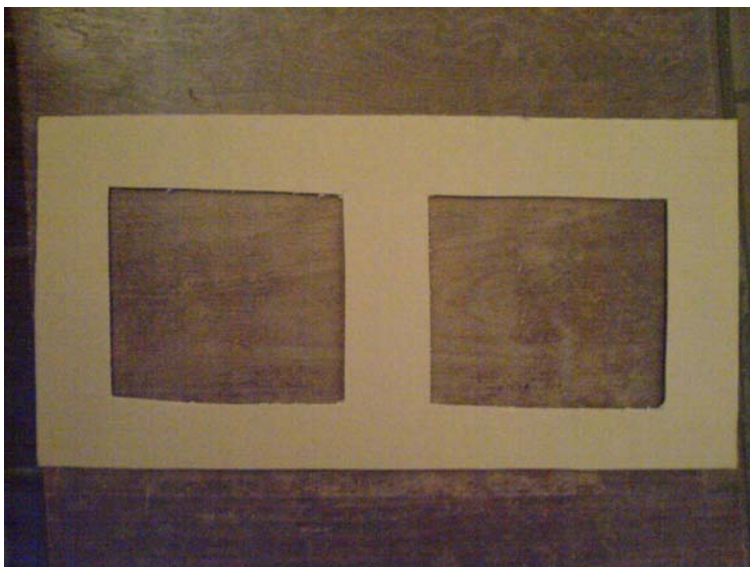
Naime, membrana mora biti na određenoj udaljenosti od statora da se ne bi dogodio izboj naboja. Zrak oko membrane služi kao izolator iako on to nije (nije idealni izolator).

Specifična vrijednost pri kojoj u zraku dolazi do električnog izboja jest oko 2kV na 1mm. To nam govori da ako je razlika potencijala veća ili jednaka 2kV na udaljenosti od 1mm ili manje, dolazi do električnog pražnjenja, odnosno uspostavljanja toka električne struje. Mi to vidimo kao iskrenje i čuje se zvuk udaranja membrane o stator. Iako je stator izoliran plastifikacijom, ona nije savršena.

Zbog toga postavljamo materijal, također izolator, koji će stvoriti dovoljnu udaljenost membrane od statora. Koristimo karton izrezan u oblik koji omogućuje neometan protok zraka.

U našem slučaju to je upravo oblik koji ćemo upotrijebiti kod oblikovanja pokretne, elastične membrane.

Na slici 5.2. vidi se komad kartona koji služi upravo toj svrsi. Karton je debljine oko 1,5 mm s malim odstupanjima i nepravilnostima, ali se i kao takav pokazao sasvim upotrebljiv kao podloga za membranu. U stvari,



5.2. okvir za membranu

upotrebjeni se kartonski

okvir se pokazao prilično kvalitetnim odabirom za ovu svrhu. Sam materijal lako je dostupan, jeftin i dostatno čvrst. Slijedi izraditi membranu koja će biti upotrebljiva za emiter.

Kod odabira materijala traži se da to bude elastičan, izdržljiv materijal koji će imati neku površinsku vodljivost ali jednako tako i velik otpor zbog što dužeg zadržavanja naboja na sebi. Kako je već poznato koji materijali otprilike odgovaraju ovoj zadaći odabrana je prijanjajuća folija za umatanje hrane. Sl. 5.3. prikazuje koja vrsta je korištena pri izradi membrane.



5.3. vrsta folije korištene pri izradi

Nadalje, s ovim je materijalom lako raditi pokuse, zbog gore navedenih razloga. Folija je lagano ljepljiva, male je mase i rastezljiva, dakle već je sama po sebi ima elastična svojstva.

S obzirom da je ovaj materijal izolator potrebno je na njega nanijeti vodljivi sloj nekog drugog materijala. Idealno, ali i po 'receptu', je raspršiti tanki sloj čestica grafita koji se može dodatno razrijediti.

Grafit se nabavi u prodaji i dodatno se prepravi. U našem slučaju, dodatno je razrijeđen izopropilom.

Smjesa se razrjeđuje do željenog omjera (npr. 50:50) pa se nanosi raspršivanjem po foliji. Ukoliko netko želi tražiti optimalnu količinu grafita na foliji može ponavljati pokuse dok ne dođe do željenog rezultata.

Slijedi, dakle, nanošenje grafita na prianjajuću foliju praveći time elastičnu membranu. Sl. 5.4. prikazuje bočicu grafitu u spreju korištenu pri izradi.

Folija se postavi na ravnu površinu nakon čega se nanese sloj grafita. Cijeli se postupak nanošenja grafita ponavlja i s druge strane folije. Tada se pripremljena folija, nakon sušenja postavlja na okvir gdje ju je potrebno učvrstiti. U tu svrhu moguće je upotrijebiti obično ljepilo, ljepljivu traku i sl. Nakon toga se folija postavlja na kartonski okvir. U ovom trenutku potrebno



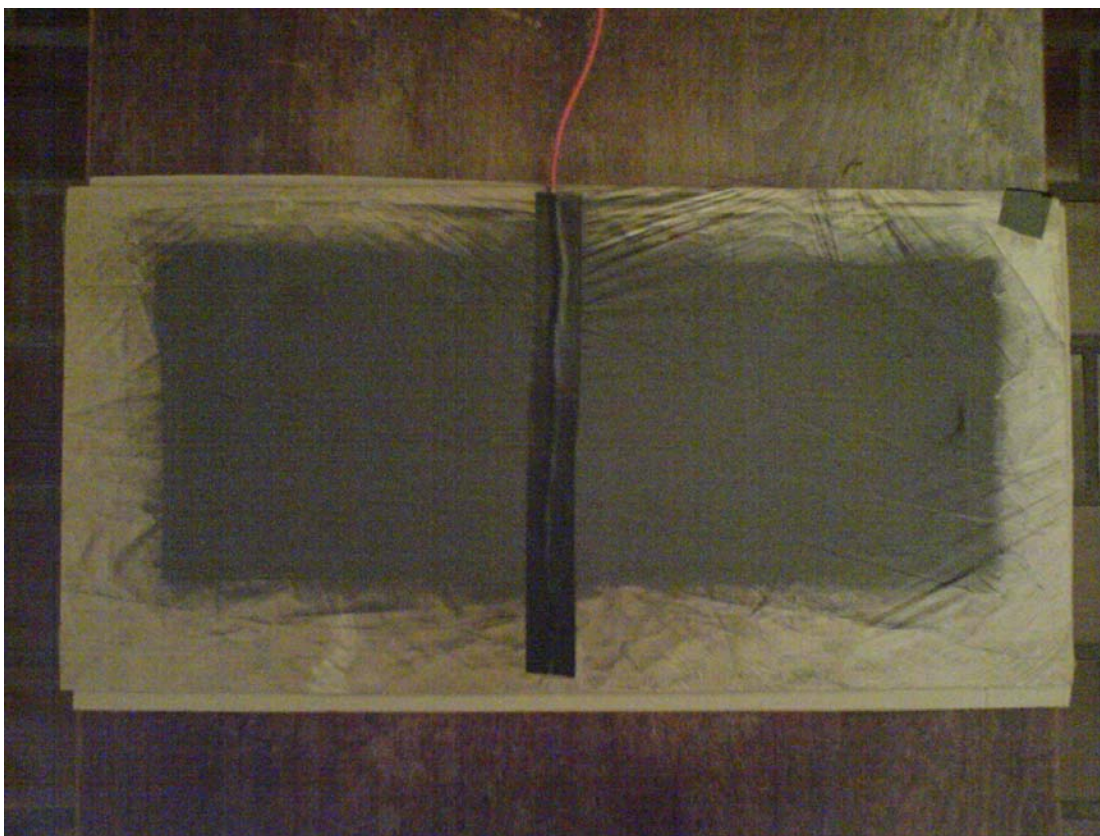
5.4. grafit u spreju

je prethodno nategnuti foliju kako bi dobili željena svojstva elastičnosti i površinske napetosti.

Jednom nategnuta i učvršćena folija postaje elastična membrana, sposobna reproducirati audio signal, odnosno proizvesti zvuk.

5.3. Sastavljanje

Sad je potrebno dovesti žice koje dovode polarizacijski napon i signal i to na obje strane membrane. Na sl.5.5. se vidi gotova membrana koju je sad moguće postaviti između statora.



5.5. membrana sa spojenim žicama

Dakle, membrana se postavlja na stator gdje se ispod i iznad postavljaju kartonski okviri. Završena membrana naziva se panel i postavljanjem više ovakvih panela postiže se veća snaga emitiranog zvuka.

Sl. 5.6. prikazuje postavljenu membranu na jedan od statora. Na ovo dolazi još jedan kartonski okvir na koji pa nakon toga drugi stator. Dva statora se moraju učvrstiti, a u našem slučaju je poslužila i najobičnija ljepljiva traka.

Naime, ako treba napraviti brze popravke ili nešto izmijeniti, lako se sve skupa rastavi i ponovno sastavi.



5.6. stator s membranom

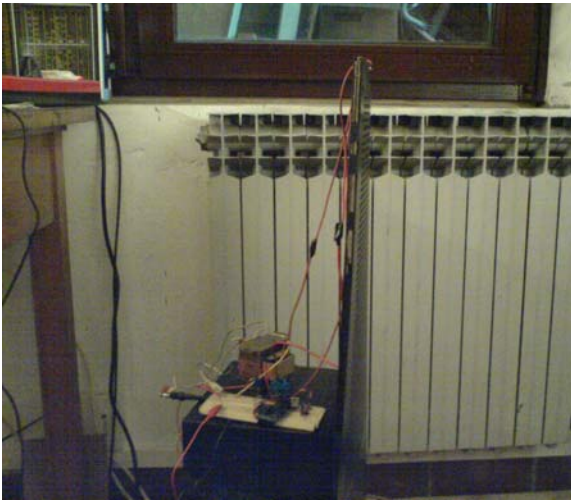
Sad kada je sve gotovo potrebno je nekako elektrostatik učvrstiti da bi samostalno stajao na mjestu. Bilo kakva kutija može poslužiti.

Pri postavljanju u radni položaj treba voditi računa kako membrana titra s obje strane pa se emitera mora postaviti tako da mu 'stražnja' strana nije prigušena. Iz tog razloga preporuka je odmaknuti ga najmanje 1m od zida.

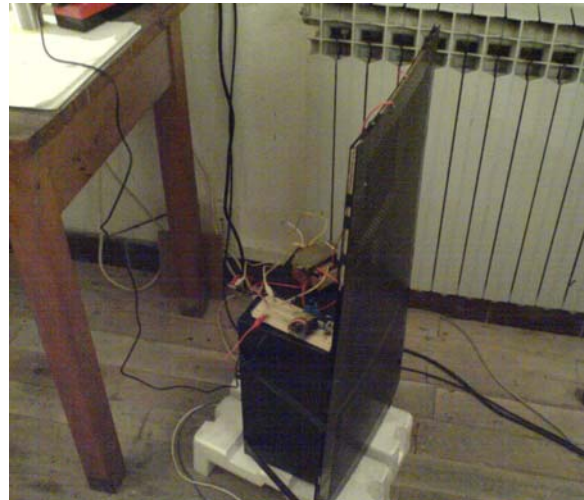
Ovako sastavljen uređaj može se nazvati elektrostatskim emiterom audio signala.

Spomenimo još da je emiter testiran pomoću specijaliziranog računalnog programa za audio opremu te da je postignut zadovoljavajući učinak s obzirom na jednostavnost konstrukcije. Elektrostati emitira na gotovo svim čujnim frekvencijama, od 100 do 19 000 Hz, s napomenom da ispod 1000 Hz emitira prigušeno zbog akustičkih svojstava membrane.

Na slikama 5.7.-5.10. prikazan je kompletiran elektrostati u prostoriji u kojoj je izrađen.



5.7.



5.8.



5.9.



5.10.

5.7.-5.10. prikazan je izrađeni i testirani elektrostatski emiter, iz različitih kuteva

6. Zaključak

Pokazali smo kako je jednostavno izraditi uređaj koji može bitno doprinijeti razumijevanju pojmova elektrostatike, posebno električnog polja. Investicija nije velika niti u financijskom niti u vremenskom smislu, a metodičke koristi su dovoljne da opravdaju pothvat.

Iako nije namijenjeno svima, ovom tematikom se mogu baviti mnogi.

Treba naglasiti da bavljenje elektrostatskim emiterom audio signala otvara jedno veliko područje koje može biti više ili manje zahtjevno, ovisno o osobnom zanimanju za temu.

Naime, tema je interdisciplinarna i ukoliko bi se htjela dubinski obraditi zahtijeva vrlo široko znanje i to na visokom nivou.

Naravno, stvar je osobnog odabira koliko se duboko želi ulaziti u problematiku. Ovaj rad je koncipiran na metodici srednjoškolske fizike pa je kao takav i napravljen, ali je tema pogodna i za, primjerice, dodiplomski studij fizike u sklopu nekog od praktikuma.

Za kraj bi još trebalo istaknuti kako je veliko zadovoljstvo izraditi 'egzotičan' uređaj koji ispravno radi i pokazuje upravo ono što se od njega i očekivalo.

Literatura

- Charles Kittel-Walter D. Knight-Malvin A. Ruderman, Udžbenik fizike sveučilišta u Berkeleyu-Mehanika, Tehnička knjiga, Zagreb, 1982.
- Edward M. Purcell, Udžbenik fizike sveučilišta u Berkeleyu-Elektricitet i magnetizam, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988.
- Munir H. Nayfeh-Morton K. Brussel, Electricity and magnetism, John Wiley & sons
- Ivan Jelenčić, Zvučnici, Školska knjiga, Zagreb, 1991.
- Tihomil Jelaković, Zvuk·Sluh·Arhitektonska akustika, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- Nada Brković, Fizika 3, LUK d.o.o. Zagreb, 1998.

- www.wikipedia.org
- www.quadesl.org
- www.kingsaudio.com.hk
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>