

Sažetak za ZI iz Elektroakustike

By: MatthewSHP

v1.1

10. PRETVARAČI

Uređaji koji pretvaraju zvučnu energiju u električnu i obratno nazivaju se **elektroakustičkim pretvaračima**. Oni su neophodni za početak i kraj elektroakustičkog lanca, tj. sustava koji prenosi ili reproducira zvuk. Na početku sustava je **mikrofon**, a na kraju **zvučnik** ili **slušalice**. Između njih je električki sustav, koji može biti vod, pojačalo, odašiljač, prijemnik, te razni uređaji za snimanje, reprodukciju i procesiranje električnog signala.

10.1. MIKROFONI

10.1.1. PODJELA MIKROFONA

10.1.1.1. Električka podjela

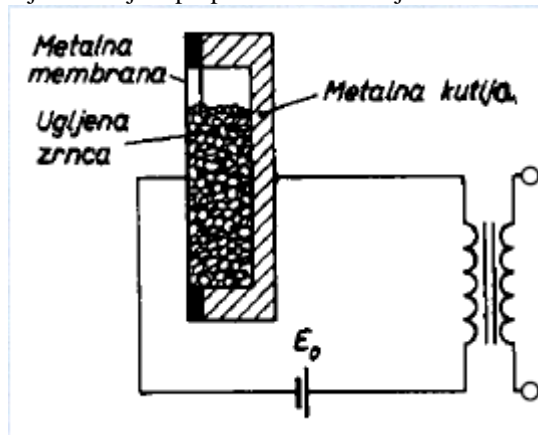
ELEKTROMOTORNA SILA RAZMJERNA ELONGACIJI

a) Ugljeni mikrofon

Promjena otpora ΔR , kad su elongacije membrane dovoljno malene, proporcionalna je elongaciji x :

$$\Delta R = C \cdot x$$

C je koeficijent proporcionalnosti koji *ne* ovisi o frekvenciji.



Trenutna vrijednost izmjenične komponente EMS koja nastaje zbog promjene otpora ΔR je

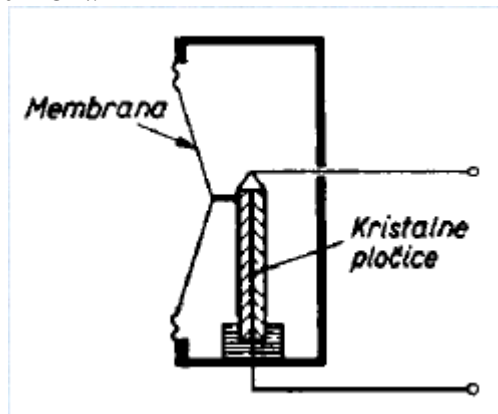
$$e = I_0 \cdot \Delta R = C \cdot x \cdot E_0 / R_0$$

pa odnos između EMS i elongacije **nije** ovisan o frekvenciji.

b) Kristalni mikrofon

EMS e razmjerna je elongaciji membrane x

$$e = C \cdot x$$



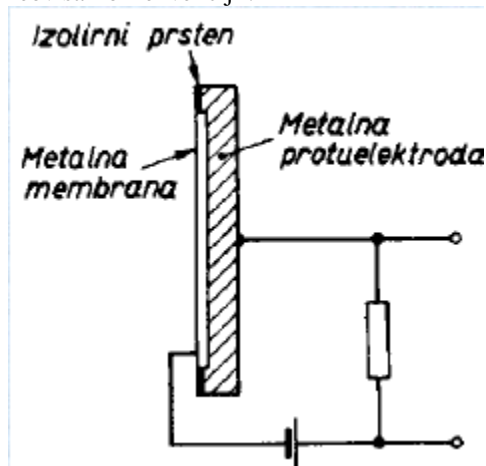
Zbog koeficijenta proporcionalnosti C i ovdje će EMS biti **neovisna** o frekvenciji.

c) *Kondenzatorski mikrofon*

Izmjenična EMS e razmjerna je elongaciji x membrane.

$$e = C \cdot x$$

Ako je odnos između zvučnog tlaka i pomaka membrane neovisan o frekvenciji, i odnos između zv. tlaka i EMS je neovisan o frekvenciji.



EMS RAZMJERNA TITRAJNOJ BRZINI

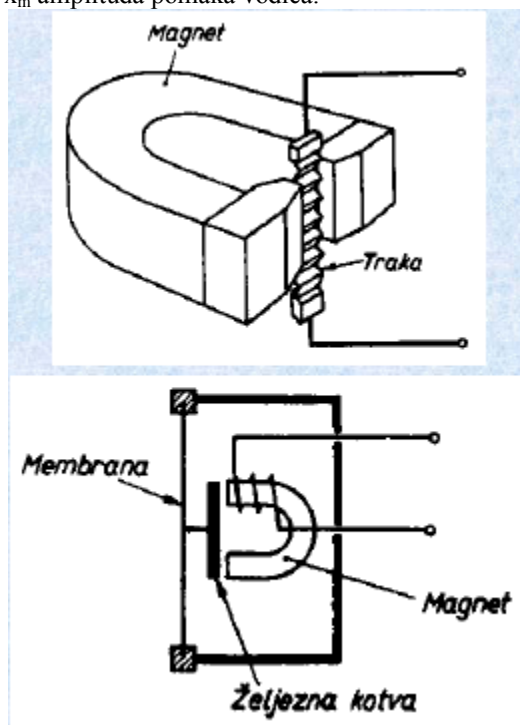
Elektrodinamički mikrofoni

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = -C \dot{x} = C x_m \sin \omega t$$

gdje je Φ magnetski tok u kojemu titra vodič,

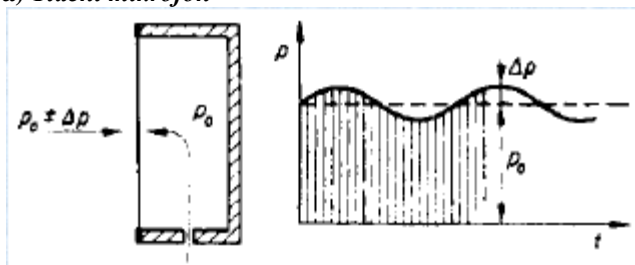
$\dot{x} = dx/dt$ diferencijalni kvocijent elongacije po vremenu, dakle titrajna brzina vodiča (odnosno membrane).

x_m amplituda pomaka vodiča.



10.1.1.2. Akustička podjela mikrofona

a) Tlačni mikrofon



Na membranu s vanjske strane djeluje sila ovisna o tlaku na jedinicu površine:

$$F = S p = S p_m \cos \omega t$$

gdje je S površina membrane, a p_m amplituda zvučnog tlaka.

Jednadžba gibanja membrane se može napisati kao:

$$m\ddot{x} + R\dot{x} + x(1/C_m) = S p_m \cos \omega t$$

s \ddot{x} je označeno d^2x/dt^2 što je ubrzanje membrane.

Uz konstantan zvučni tlak najveće amplitude pomaka nastupiti će na rezonantnoj frekvenciji sustava:

$$\omega_r/2\pi = f_r = 1/2\pi \sqrt{1/mC_m}$$

Pojavljaju se tri frekvencijska područja:

$\omega \gg \omega_r$, vanjska sila se troši na svladavanje inercije mase

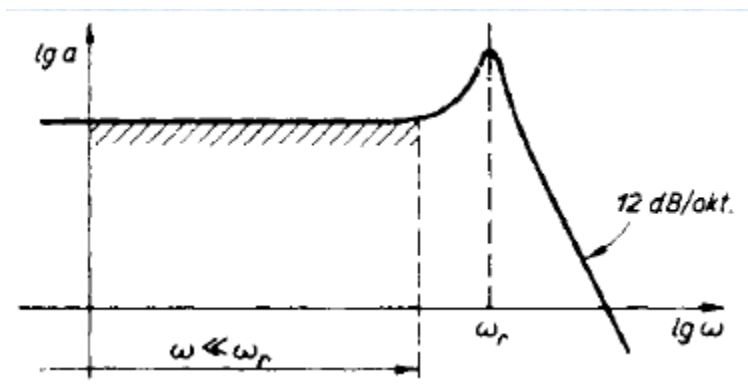
$$m\ddot{x} = S p_m \cos \omega t$$

$\omega \approx \omega_r$, vanjska sila se troši samo na svladavanje otpora trenja

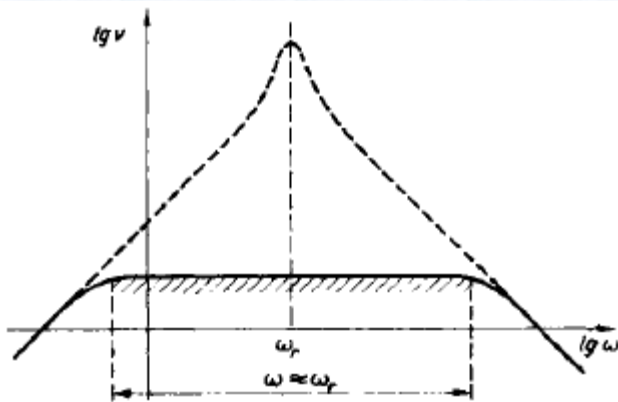
$$R\dot{x} = S p_m \cos \omega t$$

$\omega \ll \omega_r$, vanjska sila se troši na svladavanje elastične sile

$$x/C_m = S p_m \cos \omega t$$



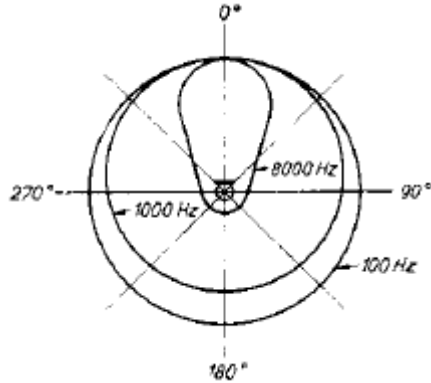
Kod ugljenih, kristalnih i kondenzatorskih mikrofona tlačnog tipa treba titrajni element tako konstruirati da rezonantna frekvencija bude iznad prijenosnog područja.



Kod elektrodinamičkih i elektromagnetskih mikrofona tlačnog tipa rezonantna frekvencija treba biti u sredini prijenosnog područja uz dovoljno prigušeni sustav.

Usmjerena karakteristika tlačnog mikrofona

Usmjerena karakteristika je kružnica, ali na višim frekvencijama, na kojima su dimenzije mikrofona reda veličine valne dužine, karakteristika se izobličuje.



b) Gradijentni mikrofoni

Kod gradijentnih mikrofona zvučni tlak djeluje s obje strane membrane.

Ako je d razlika između duljine putova zvučnih valova od izvora do prednje i stražnje strane membrane, može se fazna razlika φ (u radijanima) naći prema $d/\lambda = \varphi/2\pi$.

Ako je omjer

$$2\pi/\lambda = \omega/c = k,$$

dobije se da je

$$\varphi = k \cdot d$$

Na prednju stranu membrane djeluje tlak

$$p_1 = p_m \cos \omega t,$$

a na stražnju stranu tlak

$$p_2 = p_m \cos(\omega t - k \cdot d).$$

Na membranu djeluje sila

$$F = S(p_1 - p_2) = S p_m [\cos \omega t - \cos(\omega t - k \cdot d)]$$

Ta sila proporcionalna je promjeni tlaka po jedinici duljine, znači gradijentu tlaka, pa otuda i naziv tih mikrofona. Najveća razlika se dobiva na onoj frekvenciji na kojoj put zvučnog vala od prednje do stražnje strane membrane iznosi $\lambda/2$.

Uz dva puta višu frekvenciju nastaje dva puta veća razlika tlakova, odnosno *gradijent tlaka raste sa 6 dB/oktavi*.

Uz konstantnu titrajnu brzinu opada amplituda a sa 6 dB/oktavi

$$a = v/\omega$$

Sila je uz stalan tlak proporcionalna faktoru $k = \omega/c$, dakle frekvenciji.

Diferencijalna jednačina glasi:

$$mx + Rx + x/C_m = -C p_m \omega \sin \omega t$$

uz $d \ll \lambda$ i $C = S d/c$.

U tri frekventijska područja prevladavaju različite unutarnje sile:

- u području iznad rezonantne frekvencije $\omega \gg \omega_r$, ubrzanje membrane:

$$mx = -C p_m \omega \sin \omega t$$

- oko rezonantne frekvencije $\omega \approx \omega_r$, brzina membrane:

$$R_m x = -C p_m \omega \sin \omega t$$

- ispod rezonantne frekvencije, $\omega \ll \omega_r$, pomak membrane:

$$x/C_m = -C p_m \omega \sin \omega t$$

Za sinusoidalno titranje vrijedi $x = \int v dt$, a daljim integriranjem dobije se za ubrzanje izraz $a = v/\omega$.

Integriranjem prvih dviju jednačbi za frekventijska područja dobije se da u području

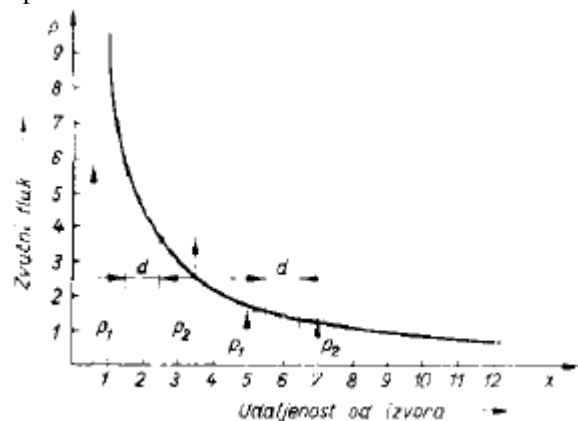
$$\omega \gg \omega_r \text{ vrijedi: } mx = -C p_m \omega \sin \omega t$$

$$\text{a u području } \omega \approx \omega_r: R_m x = -C p_m \omega \sin \omega t$$

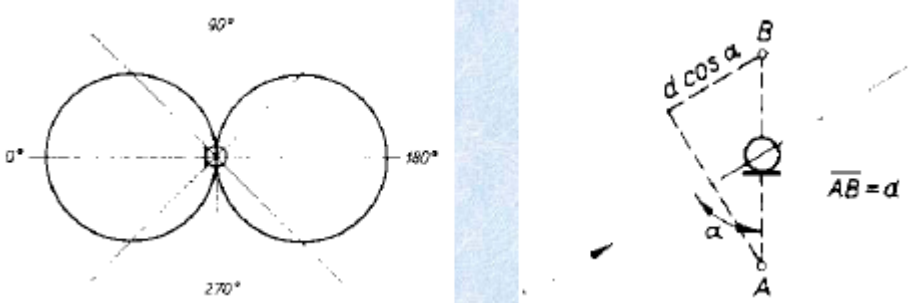
Iz prve se jednačbe vidi da je za gradijentne mikrofone u području $\omega \gg \omega_r$ brzina titranja $v = x$ neovisna o frekvenciji i proporcionalna zvučnom tlaku, a iz druge da je u području $\omega \approx \omega_r$ pomak x neovisan o frekvenciji i proporcionalan zvučnom tlaku.

Efekt blizine

U blizini izvora gradijent tlaka se dodatno povećava zbog opadanja amplitude tlaka ovisno o udaljenosti, po hiperboličkom zakonu.



Usmjerena karakteristika gradijentnog mikrofona

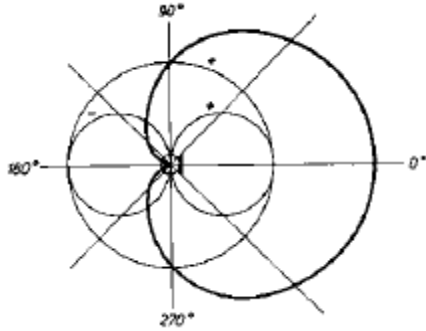


Kombinacija tlačnog i gradijentnog mikrofona

Spajanjem tlačnog i gradijentnog mikrofona u seriju dobiva se mikrofonska kombinacija koja ima usmjernu karakteristiku u obliku bubrega ili kardioide.

Pretpostavi li se da oba mikrofona u aksijalnom smjeru imaju jednaku osjetljivost, tj. da su im izlazni naponi $e_1=e_2$, uz upad zvučnog vala pod kutom α bit će ukupni izlazni napon:

$$e=e_1+e_2 \cos \alpha = e_1(1+\cos \alpha).$$



10.1.2. Osnovna svojstva

Osjetljivost

To je odnos EMS mikrofona prema zvučnom tlaku slobodnog zvučnog polja na mjestu mikrofona

$$s = e/p$$

Daje se u mV/Pa ili u dB, ako se uspoređuje sa standardnim mikrofonom [$s=20 \log (e/p)$].

Referentni zvučni tlak je 1 Pa.

Efikasnost

To je odnos električke snage *prilagođenog* mikrofona prema snazi zamišljenog mikrofona koji bi uz zv. tlak od 1 Pa dao snagu od 1 mW.

Prilagođeni mikrofoni je onaj čiji je opteretni otpor jednak unutarnjem otporu.

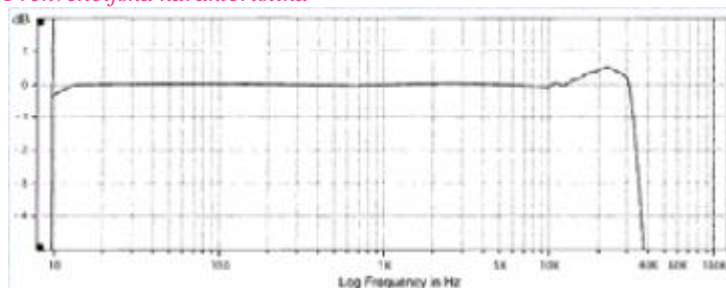
Snaga na opteretnom otporu je

$$P = e^2/4R_i = (e/p)^2 p^2/4R_i$$

pa je efikasnost n u dB

$$n = 20 \log - 10 \log R_i + 24$$

Frekvencijska karakteristika



Usmjerna karakteristika

Najčešće su karakteristike u polarnom dijagramu:

- kružna (omnidirekionalna)
- osmičasta (bidirekcionalna)
- bubrežasta ili kardiodna (unidirekcionalna)

Harmoničko izobličenje

U praksi su pomaci membrane vrlo mali, pa npr. Kod dinamičkog tlačnog mikrofona s titrajnom zavojnicom uz zvučni tlak od 10 Pa amplituda membrane je oko 10 μm. Zato nelinearnost nema velikog utjecaja, osim kod ugljenih mikrofona.

Tranzijentna izobličenja

Neki tipovi mikrofona imaju zbog svojih konstrukcija vrlo mala tranzijentna izobličenja. To su najčešće kondenzatorski mikrofoni i tračni mikrofoni, kojih je impulsni odziv izvrstan.

Smetnje

Osjetljivost mikrofona je, između ostalog, određena i *naponom šuma*. On može biti sastavljen od više komponenata:

- termalno (Brownovo) gibanje molekula zraka
- termalno gibanje atoma u mehaničkom titrajnom sustavu (u kojem je akustički otpor kao izvor napona šuma)
- termalno gibanje elektrona u vodiču
- naponi šuma u elementima predpojačala
- mehanička potresanja
- utjecaj vjetra i zračnih strujanja
- indukcija i radio-smog

Impedancija

To je unutarnja impedancija mikrofona kao izvora izmjenične EMS i odnosi se na 1 kHz ako nije drukčije označeno. Neki dinamički mikrofoni redovito imaju transformator, pa je to onda impedancija titrajnog sustava prenesena na sekundar transformatora.

Obično se dijele na niskoomske (10 – 600 Ω) i visookoomske (25 – 80 kΩ, a kondenzatorski i kristalni i mnogo više). U ovisnosti o impedanciji odabiru se dužine priključnih vodova i ulazne impedancije pretpojačala.

Korisnost

Kreće se najčešće između 0,1 i 1%.

Kod ugljenog mikrofona odnos između akustičke i dobivene električke snage ne daje stupanj djelovanja.

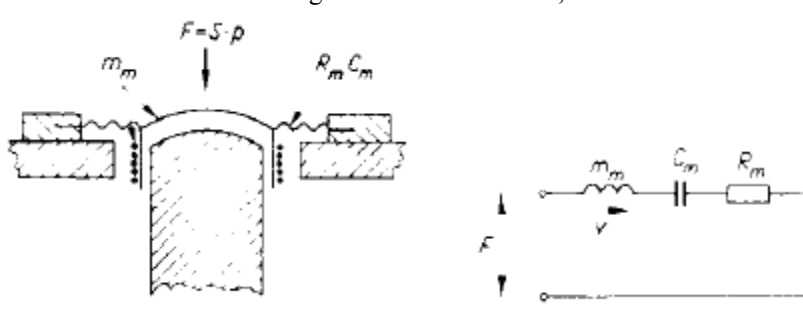
Ugljeni mikrofon upravlja strujom iz baterije pa dobivena snaga može biti desetak puta veća od primljene. Stoga ugljeni mikrofon može dati i više od 1000 puta veću snagu nego druge vrste mikrofona.

10.1.3. Tlačni dinamički mikrofoni

Inducira se EMS: $e = B l v$

uz B = magnetska gustoća u rasporu, l = dužina žice te v = titrajna brzina

Budući da su B i l kod određenog mikrofona konstantni, EMS izravno ovisi o v .

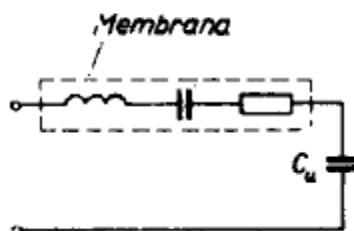
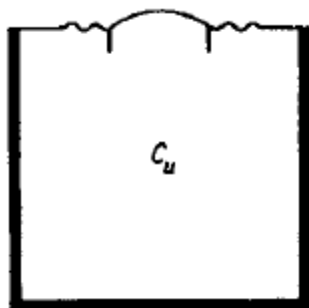


Mehanička se impedancija sastoji od mehaničkog otpora R_m , mehaničke reaktancije mase membrane ωm_m i mehaničke reaktancije $1/\omega C_m$ sadržane u elastičnom učvršćenju membrane. Analogno izrazu za struju dobiva se $v = F / (R_m + j(\omega m_m - 1/(\omega C_m)))$

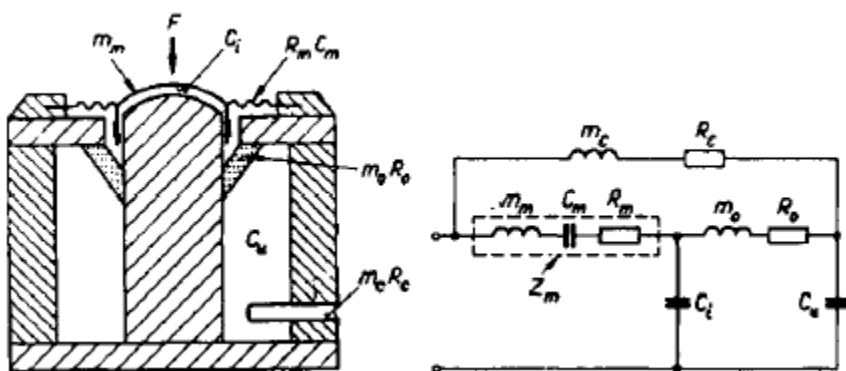
Oblik frekvencijske karakteristike titrajne brzine ovisi o faktoru dobrote Q titrajnog sustava.

Da bi se uz konstantan zvučni tlak na membrani dobila i konstantna EMS, titrajna brzina v mora biti konstantna, neovisna o frekvenciji. To se postiže uz dovoljno velik prigušni mehanički otpor R_m odnosno uz mali Q .

Tada je v u širokom pojasu frekvencija praktički konstantna.



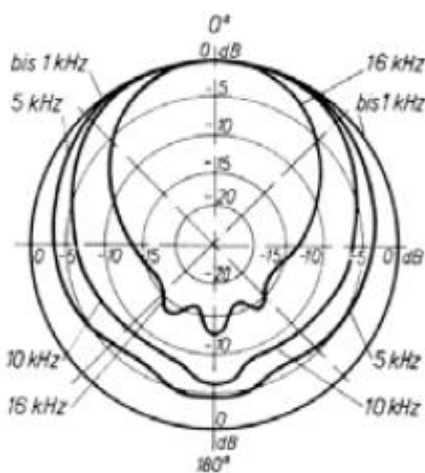
U titrajni sustav dinamičkog mikrofona uključen je i volume zraka zatvoren iza membrane.



Presjek dinamičkog mikrofona i njegova nadomjesna shema.

Rezonantna frekvencija takvog sustava je

$$f_r = 1/\pi \sqrt{(C_m C_u)/((m_m + m_c)(C_m + C_u))}$$



Usmjerna karakteristika tlačnog mikrofona

Membrana

Membrana je najčešće kupolastog oblika s odgovarajućim (koncentričnim) naborima na rubu kako bi bilo omogućeno stapno gibanje.

Zavojnica

je obično CuL, promjera <0,05 mm, motana u obliku cilindra. Otpora je oko 10Ω, induktiviteta nekoliko desetaka μH.

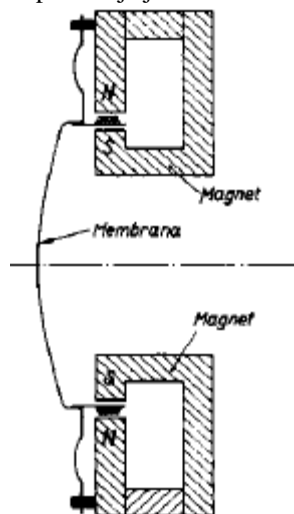
10. 1. 4. *Gradijentni dinamički mikrofon s titrajnom zavojnicom*

Magnetski se sustav sastoji od tri magneta-sektora postavljena pod 120° .

Membrana je papirnata s $f_{\text{rez}} < 100$ Hz.

Takav mikrofon je predviđen za govor (do iznad 5 kHz), a relativno je velike osjetljivosti (oko 10 mV/Pa).

Impedancija je oko 500Ω .



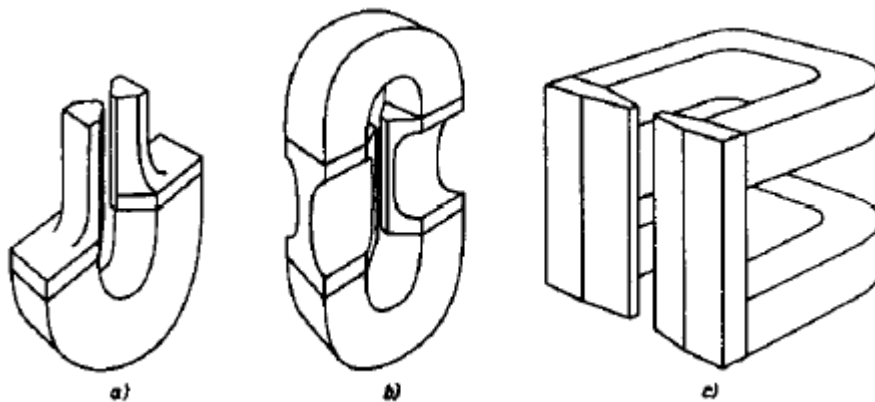
10.1.5. *Dinamički mikrofon s trakom*

a) *Gradijentni mikrofon*

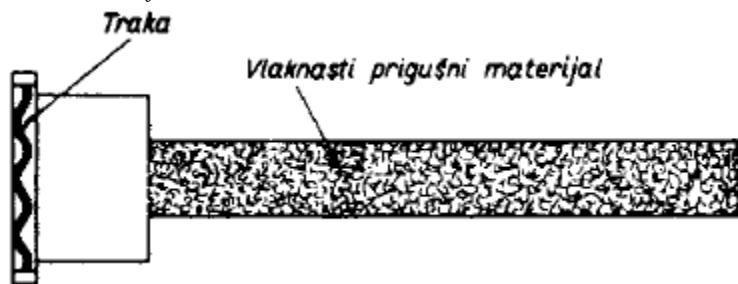
Gradijent tlaka raste s porastom frekvencije, ali samo do izjednačenja $\lambda/4$ s razlikom puta između prednje i stražnje strane trake.

Pri izjednačenju $\lambda/2$ s razlikom puta teorijski bi izlazni napon pao na nulu.

Nekoliko je načina konstrukcije magnetskih sustava.



b) *Tlačni mikrofon*



10.1.5. Kristalni mikrofon

Piezoelektrične materije se dijele

a) kristale i b) keramike.

To su: a) turmalin, kvarc, Seignetteova (Rochelleova) sol, itd.,

b) barijev titanat

Bimorf, osnovni element pretvarača.

Piezoelektrički mikrofoni se dijele na:

a) *mikrofone s membranom*

b) *Mikrofon sa zvučnom ćelijom*

Tlačni mikrofon se dobije spajanjem dva bimorfa na odgovarajući okvir.

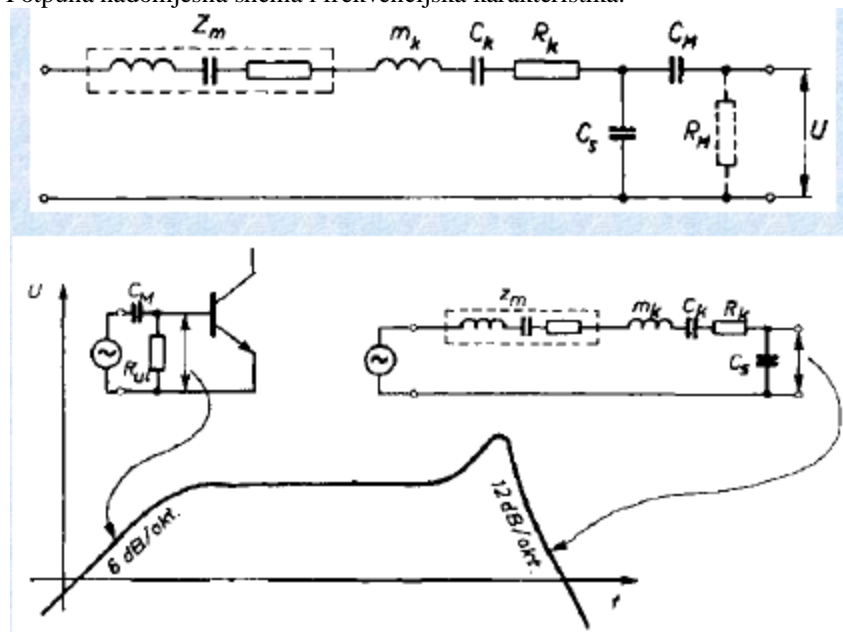
Više kristalnih ćelija se može spojiti paralelno, serijski ili kombinirano u svrhu povećanja osjetljivosti.

Kod zvučne ćelije f_{rez} određuje efektivna masa m_k , elastičnost kristala C_k , elastičnost zatvorenog zračnog prostora C_s te mehanički otpor R_k .

Uz dodatak membrane pojavljuje se i masa membrane m_m , elastičnost oboda membrane C_m i mehanički otpor membrane R_m .

Tada je elastičnost zračnog prostora C_s dana volumenom zraka koji je zatvoren između membrane i kućišta mikrofona.

Potpuna nadomjesna shema i frekvencijska karakteristika:



Piezoelektrička keramika postaje piezoelektrička tek nakon što je barijev titanat bio podvrgnut tretmanu s istosmjernim električkim poljem od 40 do 60 kV/cm na nekoliko sati.

Opća svojstva piezoelektričkih mikrofona

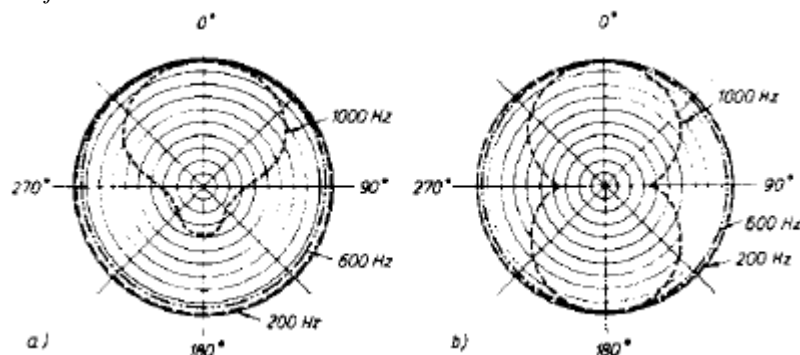
Osjetljivost

Mikrofoni sa zvučnom ćelijom (dakle bez membrane), imaju osjetljivost od oko 10mV/Pa.

S membranom se osjetljivost povisuje za desetak dB.

Mikrofoni s barijevim titanatom imaju znatno manju osjetljivost, tek nekoliko desetaka $\mu\text{V}/\text{Pa}$.

Usmjerna karakteristika



Harmoničko izobličenje

Kod kristalnih mikrofona su harmonička izobličenja do razine zvučnog tlaka od 120 – 130 dB manja od 1%.

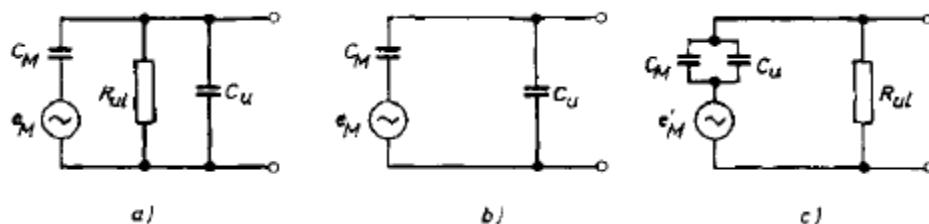
Šum

Vlastiti šum (termički) potječe od istosmjernog otpora kristala.

Taj otpor je shuntiran kapacitetom kristalnog elementa, pa u području frekvencija u kojem je kapacitivni otpor manji od radnog otpora (uključivši i opteretni otpor) karakteristika spectra šuma opada sa 6 dB/okt.

Utjecaj kabela

Kapacitet kabela i ulazni kapacitet pojačala spojeni su paralelno opteretnom otporu.



Utjecaj temperature i vlage

Na temperaturama iznad 55°C gube se piezoelektrička svojstva, te se naknadnim ohlađivanjem ne vraćaju.

40°C smatra se graničnom temperaturom nakon koje se naknadnim hlađenjem i grijanjem do radne temperature mogu vratiti piezoelektrička svojstva.

10.1.6. Kondenzatorski mikrofon

Osjetljivost

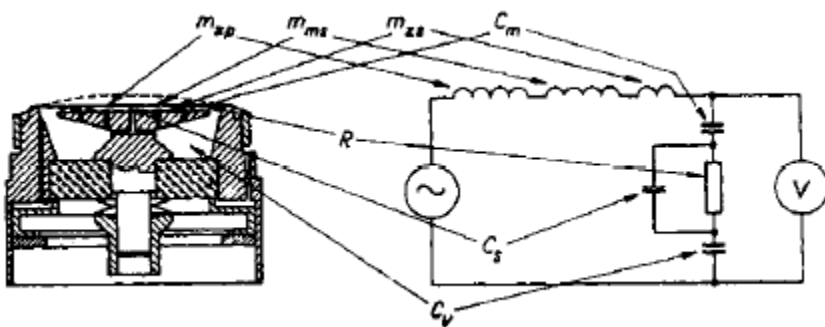
Membrana je metalna ili metalizirana folija, debljine 10 - 15 μm , napeta ispred čvrste metalne protuelektrode na udaljenosti oko

10 - 20 μm .

Ako je opteretni otpor tako velik da je struja nabijanja konstantna, tj. neovisna o frekvenciji, izlazni napon u je proporcionalan polarizacijskom naponu E_0 (obično 100 – 200 V) i relativnoj promjeni kapaciteta $\Delta C/(C_m + C_p)$, gdje je ΔC promjena kapaciteta zbog pomaka membrane, C_m je kapacitet mikrofona, a C_p štetni kapacitet dovoda.

$$u = E_0 \Delta C / (C_m + C_p)$$

Smanjenjem krutosti osjetljivost se povećava na prosječnih 30 do 50 mV/Pa.

Frekvencijska karakteristika

m_{zp} i m_{zs} su mase zraka koje ispred i iza membrane titraju zajedno s membranom, m_{ms} je masa membrane, C_m je elastičnost membrane, R je akustički otpor između membrane i protuelektrode, C_s je elastičnost sloja zraka ispod membrane, C_v je elastičnost zraka u zatvorenom volumenu.

Budući da se prigušni otpor mijenja s razmakom elektroda, oblik frekvencijske karakteristike oko rezonantne frekvencije ovisiti će i o visini polarizacijskog napona. Što je on veći, i prigušenje će biti veće.

Prigušenje ovisi i o atmosferskom tlaku. Uz niži atmosferski tlak gustoća zračnog jastuka je manja pa je i prigušenje manje.

Krutost postaje manja pa se povećava osjetljivost.

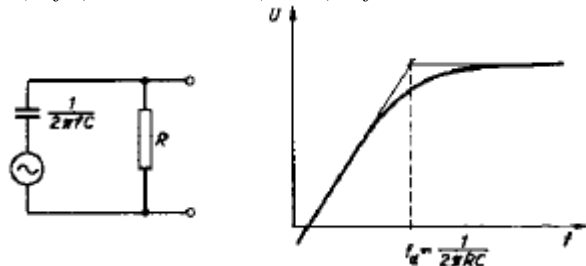
Time osjetljivost kondenzatorskih mikrofona u izvjesnoj mjeri ovisi o nadmorskoj visini na kojoj se upotrebljavaju i o promjenljivim atmosferskim utjecajima.

Donja i gornja granična frekvencija

Kapacitet mikrofona, kao unutarnja impedancija izvora, čini s opterećenim otporom visokopropusni filter.

Granična frekvencija se dobiva izjednačenjem obaju otpora:

$$1/(2\pi fC) = R \text{ odnosno } 1/(2\pi RC) = f$$



Ako je npr. kapacitet mikrofona 100 pF, a donja granična frekvencija treba biti 30 Hz, R mora biti više od 50 M Ω . Gornja granična frekvencija određena je mehaničkom rezonancijom.

Harmoničko izobličenje

Amplitude membrane su ekstremno male. Uz zvučni tlak od 0,1 Pa membrana se pomiče tek za nekoliko angstrema (10^{-10} m), što odgovara razmaku između atoma.

Do izobličenja može doći zbog toga što je:

- napon na kondenzatoru je obrnuto proporcionalan kapacitetu
- promjena kapaciteta nije proporcionalna zvučnom tlaku (zbog zračnog jastuka iza membrane)

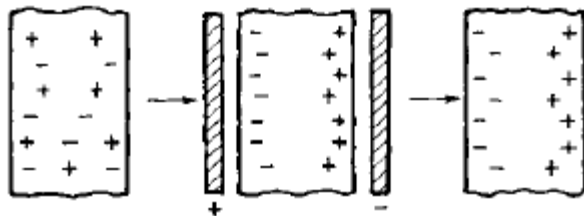
Harmonička izobličenja nastaju samo kod vrlo velikih zvučnih tlakova (>135 dB) i na vrlo niskim frekvencijama.

10.1.7. Elektretski mikrofon

Elektretski mikrofon je zapravo kondenzatorski mikrofon s nekim poboljšanim svojstvima.

Polariziranje (usmjeravanje dipola) postiže se primjenom električnog polja (oko 104 V/cm) pri povišenoj temperaturi.

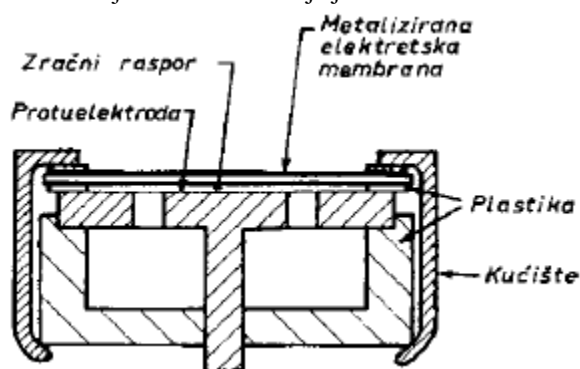
Nakon određenog vremena dielektrik se hladi pod djelovanjem polja, te ostaje polariziran (elektret=**elektricitet**-magnet).



Formiranje unutarnjeg prostornog naboja

Konstrukcije elektretskih mikrofona

Jedna od najčešćih konstrukcija je na slici



Mikrofon s nategnutom membranom od metalizirane elektretske folije.

Priključak elektretskog mikrofona na pretpojačalo

Elektretski mikrofoni imaju kapacitet između 20 i 200 pF, minijturni ispod 1 pF. Ulazna impedancija pretpojačala treba biti između 1 MΩ i 5000 MΩ.

Pretpojačala su često implementirana u elektretsku kapsulu.

Opća svojstva

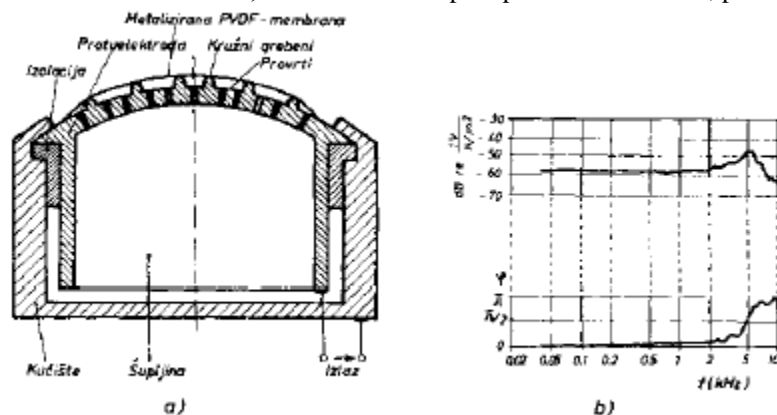
- Elektretski mikrofon ima sva dobra svojstva kondenzatorskog mikrofona.
- Ima linearan frekvencijski odziv u širokim granicama, vrlo malo izobličenje i neosjetljivost na strana polja.
- Ima dobar tranzijentni odziv, te nisku osjetljivost na vibracije.
- Nije mu potreban poseban izvor polarizacijskog napona.
- Zbog jednostavne i prikladne konstrukcije upotrebljava se u najrazličitijim uređajima.
- Postoje infrazvučni elektreti s donjom graničnom frekvencijom od 0,001 Hz.
- Dinamičko područje je veliko, oko 125 dB.

10.1.8. Piezopolimerni mikrofoni

Kod polimera *polivinildenfluorida* (PVDF) otkriven (1969.) je jaki piezoelektrički efekt. PVDF postaje piezoelektričan kad se provede postupak polarizacije, sličan postupku kod elektreta. Primjena se temelji na transversalnom piezoelektričkom efektu.

Konstrukcija

Jedna od češćih izvedbi, mikrofona s kruto poduprtom membranom, prikazana je na sl.



Izobličenja PVDF mikrofona su manja nego kod elektretskih, pa su relativno neosjetljivi na velike zvučne tlakove. Osjetljivost se proteže od $100 \mu\text{V}/\text{Pa}$ uz $f_g=1 \text{ kHz}$ do $1 \mu\text{V}/\text{Pa}$ uz $f_g=5 \text{ MHz}$. S porastom temperature iznad 700°C opada.

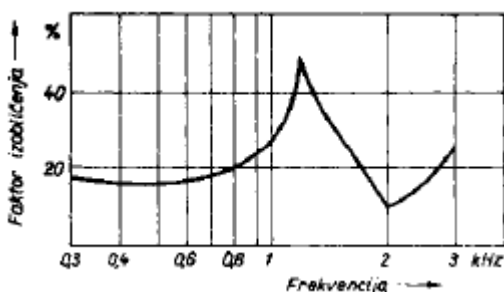
Omjer S/Š je nešto lošiji (za oko 20 dB) nego kod elektreta, a prosječne vrijednosti su oko 65 dB.

Tranzijentni odziv je izvrstan zbog male mase titrajnog sustava.

10.1.9. Ugljeni mikrofoni

Harmoničko izobličenje je relativno veliko, a kod velikih glasnoća može doseći i 100%.

- Pojavljuje se i zbog nelinearne ovisnosti otpora zrnaca o pomaku membrane.
- Na niskim frekvencijama i velikim amplitudama membrana se odmakne od zrnaca i djelomično titra bez njih.
- Efekt “zapečenosti” zrnaca
- Blizu praga osjetljivosti (oko 0,001 do 0,01 Pa) zbog mnogo malih međuprostora između zrnaca izlazni napon je nerazmjerno malen.

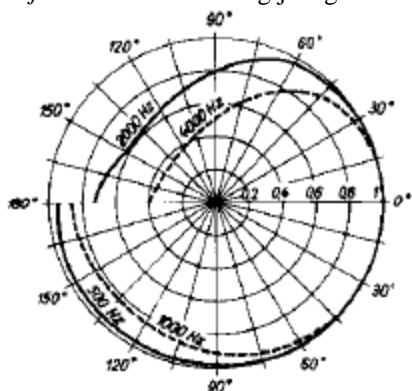


Frekvencijske karakteristike

Pobudne karakteristike ugljenog mikrofona na različitim frekvencijama

Na različitim zv. Tlakovima ugljeni mikrofoni imaju različitu osjetljivost na istoj frekvenciji.

Usmjerne karakteristike ugljenog mikroфона



Do oko 1 kHz usmjerna karakteristika je praktički kružna.

Šum raste s povećanjem mikrofonske struje, i ako ona prijeđe neku vrijednost (obično 100 – 200 mA) šum naglo raste i pretvara se u “kuhanje”.

Tada se na kontaktnim mjestima javljaju užarene točke.

Uz zv. tlak od oko 0,1 Pa omjer šuma prema signalu je oko 1:60 (36 dB).

Osjetljivost ugljenog mikroфона iznosi oko 100 mV/Pa, pa uz glasan govor iz neposredne blizine može izlazni napon biti oko 0,5 V. S povećanjem struje mirovanja osjetljivost raste.

Potrebno je napraviti prilagođenje otpora mikroфона otporu potrošača.

Mikrofony s krupnijim zrcima su nestabilni i imaju veće izobličenje i šum, ali su osjetljiviji i niskoga su otpora (50 Ω).

Napon baterije je 4 V.

Mikrofony sa sitnim zrcima imaju i do 50000 kontaktnih mjesta, manje izobličenje i manju osjetljivost, ali viši otpor (200 do 500 Ω).

Napon baterije je 60 V.

10.1.10. Posebne vrste mikroфона

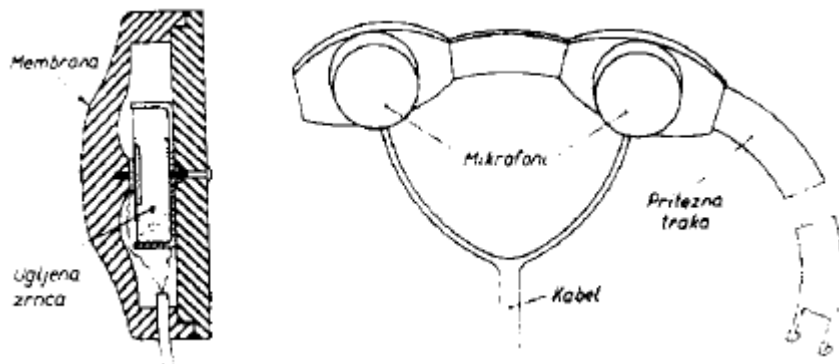
Laringofon

U prostorima s velikom bukom, gdje je govorno sporazumijevanje nemoguće, upotrebljavaju se mikrofony koji koriste titranje grlene jabučice.

Membrana, relativno velike mase i krutosti, prislanja se na grlo, te se govorna energija prenosi direktno na membranu.

Konstrukcijom mikroфона treba postići izdizanje frekvencijske karakteristike prema višim frekvencijama.

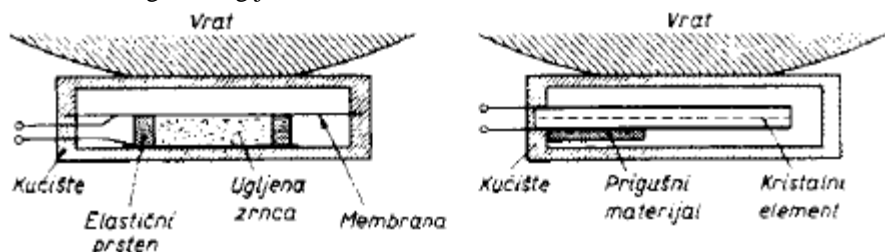
Zbog što bolje iskoristivosti zvučne energije često se upotrebljavaju po dva mikroфона.



Za manje zahtjeve prijenosa upotrebljava se ugljeni mikrofon.

Rezonantna frekvencija mu je oko 2 kHz. Može dati relativno veliku električku snagu, oko 0,2 mW.

S takvim mikrofonom postiže se slogovna razumljivost u tihim uvjetima od 77%, a uz buku od 123 fona 68%. Mikrofonu mogu biti ugljeni ili kristalni.

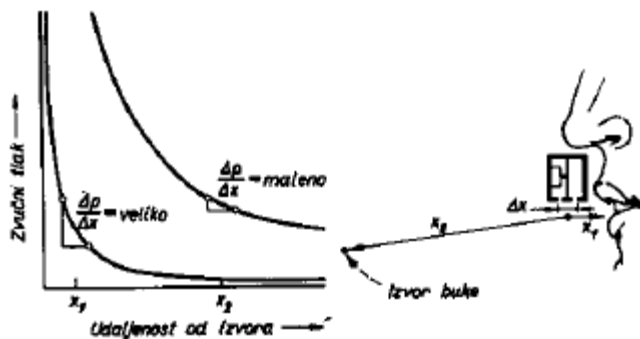


Još bolja razumljivost postiže se kristalnim glenim mikrofonom.

Izborom odgovarajućeg električkog prigušenja postiže se jednolik pojas prenošenja frekvencija između 100 Hz i 3 kHz.

Diferencijalni mikrofoni

Kod ovog mikrofona iskorištava se razlika u gradijentu zvučnog tlaka između blizog i udaljenog izvora.



Ostali

- Usni mikrofoni – za komentatore i sl.
- Usmjereni mikrofoni (jednocijevni, mnogocijevni, fazni, s parabolničnim ogledalom, s rogom i akustičkom lećom)
- Ostalih posebnih namjena

Efekt češljastog filtra (comb-filter, Kamm-Filter)

Ako dva bliska izvora zvuka (ili izvor i pripadna bliska refleksija), koji emitiraju isti signal, djeluju na mikrofoni, ili dva razmaknuta mikrofona snimaju isti izvor zvuka, koji im nije simetričan s obzirom na os između mikrofona (a signal oba mikrofona se dovodi u isti kanal), doći će do *poništanja* signala na odgovarajućim frekvencijama.

Te frekvencije ovise o međusobnom kašnjenju signala na membranu.

Prvo poništavanje biti će pri kašnjenju od $1/(2t)$ [Hz], te se dalje ponavlja periodički.

Na nekim frekvencijama taj fazni zakret iznositi će pola valne duljine $\varphi = k \cdot \lambda / 2$ (za $k=1,3,5,\dots$), kada će doći do protufaznosti signala i njihovog poništavanja.

Pretpostavimo li da je $d_1=1,5$ m

$d_2=4$ m,

frekvencije na kojima će doći do poništavanja valova bit će: (za $k=1,3,5,7,9$)

$f_1=68,8\text{Hz}$, $f_3=206,4\text{Hz}$, $f_5=344\text{Hz}$, $f_7=481,6\text{Hz}$, $f_9=619,2\text{Hz}$, $f_{11}=756\text{Hz}$, $f_{13}=894\text{Hz}\dots$

10.2. ZVUČNICI

Zvučnik je elektromehanički pretvarač koji električnu energiju pomoću nekog, najčešće mehaničkog, sustava (npr. membranom) pretvara u akustičku energiju.

Idealan zvučnik bi uz konstantnu privedenu električnu energiju proizvodio konstantan zvučni tlak u cijelom čujnom frekvencijskom području od 20 Hz do 20 kHz.

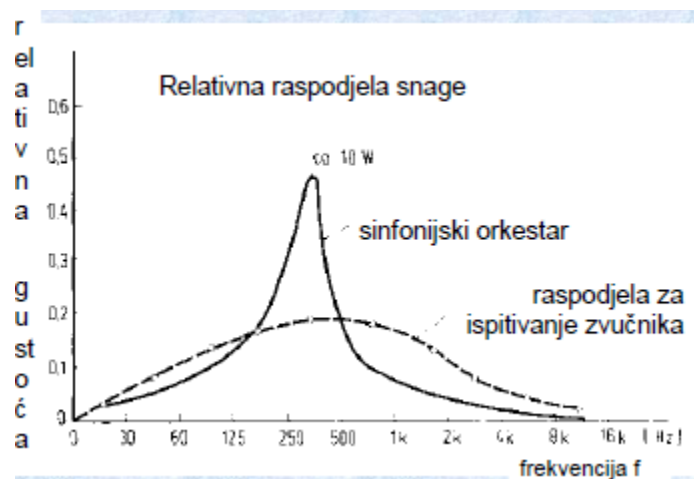
Takav bi bio idealan **širokopojasni** zvučnik, kakvog je teško ostvariti.

Električna energija se obično pretvara u mehaničku *elektrodinamičkim*, *elektromagnetskim* ili *elektrostatskim* principom.

Ostali principi (npr. *piezoelektrički* ili *ionofonski*) se relativno rijetko upotrebljavaju.

12.1. RELATIVNE RAZINE I SNAGE

Za razmatranje potrebne snage i razine zvučnog tlaka pri reprodukciji uzima se u obzir relativna raspodjela snage po frekvenciji sinfonijskog orkestra, odnosno iz nje izvedena ispitna raspodjela snage za zvučnike.



Relativna raspodjela snage sinfonijskog orkestra i preporučena raspodjela za ispitivanje zvučnika

Vršni faktor (crest-faktor)

Ovojnica govora i glazbe nije sinusoidna, pa se umjesto eff. vrijednosti sinusne promjene upotrebljava omjer vršne vrijednosti signala i njegove efektivne vrijednosti – *crest-faktor*.

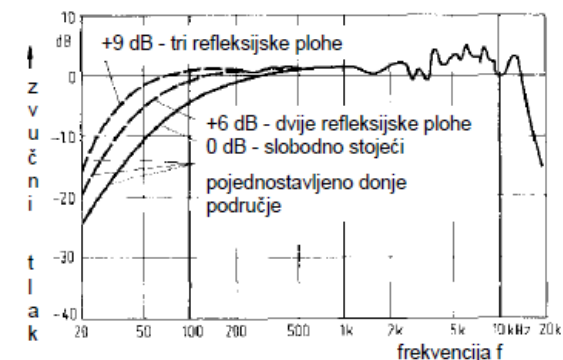
Kod sinusnog signala on iznosi $\sqrt{2}$, logaritamski je to 3 dB.

Kod reprodukcije govora i glazbe vršni faktor često dostiže 18 dB, pa mora i snaga zvučnika i pojačala imati odgovarajuće rezerve uz maksimalno dozvoljeno izobličenje.

10.2.2. Utjecaj prostorije

Zbog efekta “tlačne komore” treba paziti da je najveća valna duljina koja se može reproducirati $\lambda < 3 V$

Npr., u prostoriji od 64 m³ (4 m dužina stijene) donja granična frekvencija je 85 Hz.



Povećanje zv. tlaka u ovisnosti o poziciji zvučnika

10.2.3. Podjela zvučnika

10.2.3.1. Prema načinu pretvorbe energije

- zvučnik s membranom (elektro-mehaničko-akustička pretvorba)
- zvučnik bez membrane (elektro-akustička pretvorba)

10.2.3.2. Prema pobudi okolnog medija

- direktni emiter (titrajuća membrana emitira direktno u prostor)
- indirektni emiter (zvučnik s trubom)

10.2.3.3. Prema pogonskom elementu

- dinamički zvučnik (vodič se pokreće u magnetskom polju)
- elektromagnetski zvučnik (izmjenična struja mijenja jakost magnetskog polja koje utitrava željeznu pločicu s membranom)
- elektrostatski zvučnik (privlačenje i odbijanje elektrostatskih naboja)
- piezoelektrički zvučnik (obrnuti piezoelektrički efekt)
- magnetostriktivni zvučnik (obrnuti magnetostriktivni efekt)

10.2.3.4. Prema izvedbi

- komercijalni (opća uporaba)
- profesionalni (posebne kvalitete i namjene, po karakteristikama, pouzdanosti, itd.)

10.2.3.5. Prema prijenosnom pojasu

- širokopojasni
- pojasni

10.2.4. Osnovne karakteristike zvučnika su:

1. Nazivna snaga P_n zvučnika je najveća snaga kojom se zvučnik može opteretiti a da ne bude uništen. Zbog istosmjernog otpora zavojnicu dinamičkog zvučnika smije se opteretiti samo s 1/10 nazivne opteretivosti P_n . Zato se napon u na zavojnici treba ograničiti na

$$u =$$

Opteretivost zvučnika mjeri se ružičastim šumom.

2. Impedancija Z_n zvučnika je ovisna o frekvenciji i akustičkom opterećenju i daje se za frekvencije 400 Hz, 800 Hz ili 1 kHz (najčešće), jer su u tom području zvučni tlakovi najveći.

Važna je zbog ispravnog priključivanja zvučnika na pojačalo i obično iznosi između 4 i 16 Ω .

3. Frekvencijska karakteristika zvučnika pokazuje ovisnost zvučnog tlaka o frekvenciji uz konstantan napon na zvučniku. Za visokokvalitetne zvučnike dopušteno je odstupanje u cijelom deklariranom prijenosnom području od ± 2 dB.

4. Efikasnost zvučnika je umnožak zvučnog tlaka p na udaljenosti od 1 m u smjeru osi i električne snage izmjerene na zvučniku:

$$e = p^2 / Z_n, P = U^2 / Z_n.$$

5. Korisnost zvučnika η je omjer isijane akustičke snage P_a i električne snage P_e :

$$\eta = (P_a / P_e) 100\%$$

Ujedno je jednaka umnošku elektro-mehaničke korisnosti η_{em} i mehano-akustičke korisnosti η_{ma} . Korisnost se obično kreće između 0,2% i 0,8% .

6. Reprodukcijski zvučnika je kvocijent zvučnog tlaka ispred zvučnika i napona na priključnicama zvučnika:

$$r = p / U.$$

Izražava se u Pa/V.

7. Usmjerna karakteristika je na niskim frekvencijama polukuglasta oblika, a porastom frekvencije dolazi do sve većeg usnopljanja (usmjeravanja) u smjeru osi zvučnika.

8. Izobličenja zvučnika se mogu podijeliti na *linearna* i *nelinearna*.

Osim *harmoničkih*, pojavljuju se i *intermodulacijska* i *tranzijentna* izobličenja, do kojih dolazi uslijed prevelike tromosti titrajnog sustava.

Pojavljaju se i fazna izobličenja, koja nastaju i zbog toga jer akustička središta pojedinih zvučnih jedinica u sustavu (kutiji) nisu u istoj ravnini.

Loš fazni odziv zbog različitih pozicija akustičkih središta zvučnika.

9. Fazna karakteristika je ovisna o izvedbi skretnica u sustavu te ukupnom spoju zvučnika s pojačalom. Zapravo je najvažnije vrijeme kašnjenja pojedinih frekvencijskih grupa. Zahtijeva se da je fazna karakteristika linearna.

10.2.5. Impedancija isijavanja

Akustičku impedanciju isijavanja Z_a tvore akustički otpor isijavanja R_a i akustička masa isijavanja M_a

$$Z_a = R_a + j\omega M_a$$

Mehanička impedancija isijavanja Z_{ma} definirana je kao

$$Z_{ma} = Z_a S^2 \quad (S = r^2 \pi)$$

pa je tako definiran i mehanički otpor isijavanja R_{ma}

$$R_{ma} = R_a S^2$$

kao i mehanička masa isijavanja M_{ma}

$$M_{ma} = M_a S^2$$

pa vrijedi

$$Z_{ma} = R_{ma} + j\omega M_{ma} = \sqrt{(R_{ma}^2 + X_{ma}^2)}$$

Impedancija isijavanja je funkcija svojstava zraka, svojstava membrane i njezinog okruženja (ugradnje) kao i frekvencije.

Za klipnu membranu radiusa r je

$$R_{ma} = 2\pi r^3 \rho_0$$

$$M_{ma} = 2\pi r^2 \rho_0 c$$

Impedancija isijavanja jedne strane okruglog, ravnog stapa, smještenog u *beskonačnoj ploči* je

$$Z_{ma} = R_{ma} + j\omega M_{ma} = 2\pi r^2 \rho_0 c ((\omega r/c)^2 + (j\omega r/c)^2) / (1 + (\omega r/c)^2)$$

Za membranu koja je u odnosu na isijanu valnu duljinu mala, porastom frekvencije povećava se realni dio impedancije isijavanja R_{ma} .

Tada vrijedi:

$$R_{ma} = (2\pi \rho_0 / c) r^4 \omega^2$$

10.2.6. Snaga isijavanja

Klipna membrana isijava u *poluprostor* snagu P_{ak}

$$P_{ak} = \frac{1}{2} Z_{ma} v^2 = \frac{1}{2} Z_{ma} a^2 \omega^2$$

gdje je v titrajna brzina membrane, a je amplituda membrane.

Uvrštenjem dobije se

$$P_{ak} = (\pi \rho_0 / c) r^4 \omega^4 a^2$$

odnosno uz konstante

$$P_{ak} = (a^2 r^4 f^4) / (24 \cdot 10^{10})$$

10.2.7. Dinamički zvučnik

Protječe li zavojnicom struja tonske frekvencije, pomiče se membrana u ritmu signala naprijed - natrag pod utjecajem aksijalne sile

$$F = B \cdot I \cdot l$$

gdje je B magnetska indukcija u zračnom rasporu magneta, l je duljina vodiča, a i je struja kroz zavojnicu.

Budući da su B i l za određeni tip zvučnika nepromijenljive veličine, sila F ovisi samo o jakosti struje i .

10.2.7.1. Električki sustav dinamičkog zvučnika

Sastoji se od titrajne zavojnice priključene na pojačalo kao izvor signala. Zavojnica je u magnetskom polju stalnog magneta.

$$Z_{EZ} = R_{EZ} + j\omega L_{EZ}$$

Protjecanjem izmjenične struje zavojnica se giba u magnetskom polju, pa se u njoj inducira protu-EMS.

Ona se suprotstavlja struji koja teče kroz titrajnu zavojnicu pa nastaje efekt kao da je porasla njezina impedancija.

Time nastaje dinamička impedancija Z_{ED} :

$$Z_{ED} = e/i = R_{ED} + jX_{ED} = B^2 l^2 / Z_M$$

10.2.7.2. Mehaničko-akustički sustav dinamičkog zvučnika

Sustav s jednim stupnjem slobode, pa je diferencijalna jednadžba II reda:

$$M_m(d^2x/dt^2) + R_m(dx/dt) + x/C_m = 0$$

• Pri $\omega \ll \omega_r$: inercija mase je malena i bitan utjecaj ima elastičnost ovjesa. Nadomjesni elektr. krug ima kapacitivni karakter, a brzina kretanja se smanjuje s padom frekvencije ($v = F\omega C_{MM}$). (C_{MM} je mehanička elastičnost mehaničkog sustava = C_m).

• Pri $\omega \approx \omega_r$: sila inercije (masa) jednaka je sili uskladištenoj u ovjesu (elastičnosti), pa se za gibanje mora svladati samo trenje. Brzina kretanja doseže maksimum.

$$f_r = 1/(2\pi\sqrt{M_{MM}C_{MM}}) \quad Q_{MS} = \omega_r M_{MM}C_{MM} = \omega_r M_{MM}/R_{MM}$$

Q_{MS} je mehanički faktor dobrote pri rezonanciji, R_{MM} je mehanički otpor mehaničkog sustava.

• Pri $\omega \gg \omega_r$: mehaničkog sustava, efekt inercije se povećava, impedancija ovješnja se smanjuje, pa nadomjesni elektr. krug ima induktivni karakter. S povećanjem frekvencije brzina sustava se smanjuje ($v = F/\omega M_{MM}$).

10.2.7.3. Prigušenje

Pri projektiranju zvučnika treba voditi računa o:

- postizanju što više prijelomne frekvencije membrane
- homogenosti magnetskog polja u rasporu
- linearnosti ovjesnih elemenata
- određivanju rezonantne frekvencije mehaničkog titrajnog sustava
- postizanju što ravnije frekvencijske karakteristike
- povećanje korisnosti na niskim i visokim frekvencijama
- dimenzioniranju titrajne zavojnice

Većina tih zahtjeva ovisi o *prigušenju* zvučnika.

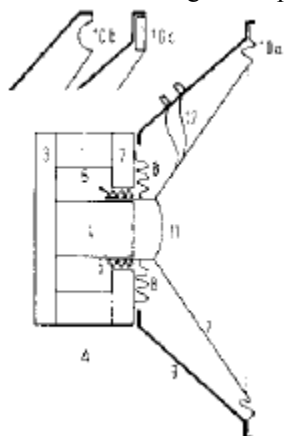
Faktor dobrote Q pokazuje prigušenje na rezonantnoj frekvenciji, o čemu ovisi frekvencijska karakteristika oko donje granične frekvencije.

Električko prigušenje proizlazi iz generatorskog djelovanja titrajne zavojnice stvaranjem protu-EMS.

Unutrašnjost zvučničke kutije se može djelomice ili potpuno ispuniti prigušnim materijalom.

10.2.7.4. Izvedba dinamičkog zvučnika

Najčešći dinamički zvučnik je konusnog tipa, prema sl. Na magnetskoj ploči (3) smješten je magnet (1) i polovi (2, 4), koji stvaraju raspor unutar kojeg se pomiče zavojnica. Nosač zavojnice (5) je pričvršćen na membranu (7), koju drže donji centrator (8) i gornji elastični rub (10). Membrana je ovješena u košari (9), koja je donjim dijelom pričvršćena na magnetsku ploču.



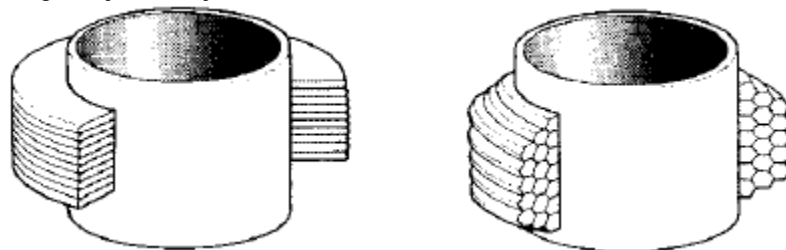
Materijali su tipa raznih ferita, te čeličnih legura s dodacima Ba, Al, Ni, Co itd.

Titrajna zavojnica (6) mora zadovoljiti sljedeće uvjete:

- dužina vodiča mora biti što veća, jer o njoj ovisi sila F
- omski otpor zavojnice mora biti što manji zbog gubitaka, pa zavojnicu treba izraditi iz što deblje žice
- zavojnica mora biti što lakša jer je sastavni dio titrajnog sustava
- stijenke zavojnice moraju biti što tanje jer je inače zračni raspor preširok.

Osnovni je zahtjev da uvijek bude isti broj zavoja u konstantnom magnetskom polju ($B \cdot l = konst.$).

Za velike snage koristi se četverokutna ili šesterokutna žica ("hexa-coil"), koja ima mnogo veću ispunu prostora i mnogo bolje hlađenje.



10.2.7.5. Dinamički zvučnici raznih namjena

Širokopojasni zvučnici

Prema DIN-normama mora prijenosno područje biti između 90 – 11200 Hz, s najvećim odstupanjima do 10 dB.

Najviši zahtjevi su 40 – 20000 Hz, do 4 dB odstupanja.

Niskotonski zvučnici

- Jedan od najvažnijih zahtjeva je emitiranje zvučnog tlaka I iznad 120 dB na niskim frekvencijama.
- Rezonantna frekvencija mora biti postavljena ispod prijenosnog područja, dakle ispod 20 Hz.
- Zvučnik mora biti velik radi povećanja efikasnosti.
- Za postizanje što veće efikasnosti i što boljeg impulsnog odziva membrana treba biti što lakša. Tada mora, za postizanje niske rezonantne frekvencije, biti ovjes što mekši.
- Efikasnost i prigušenje ovise o magnetskom toku u rasporu, što zahtijeva magnet s više od 1,5 T.
- Zbog dimenzija membrane, zavojnice velikog promjera I velikog magneta mora i košara biti vrlo robustna i čvrsta.
- U ovisnosti o tipu zvučničke kutije u koju će takav zvučnik biti ugrađen, i primjeni, odabrati će se masa membrane i tip ovjesa.

- Za ugradnju u zvučni zid, bas-refleks kutiju ili veliku ventiliranu kutiju odabrati će se relativno kruti ovjes i lagana membrana.
- Za ugradnju u zatvorenu, kompresionu kutiju, ili neke tipove akustičkog labirinta, odabrat će se elastičniji ovjes s većom masom membrane.
- Za nastajanje velike zvučne snage potreban je veliki pomak membrane na niskim frekvencijama.

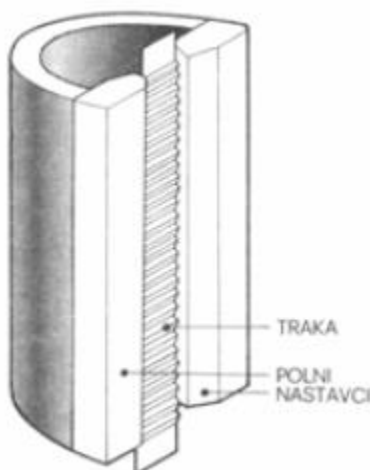
Srednjetonski zvučnici

- Osobito su važni zbog frekvencijskog područja koje trebaju prenositi (barem 250 Hz do 6 kHz, često 125 Hz do 10 kHz).
- Zbog najveće osjetljivosti uha u tom području nema tolerancije na nelinearnu frekvencijsku i faznu karakteristiku, izobličenja i loš tranzijentni odziv.
- Zbog relativno malih pomaka membrane nelinearni efekti su najčešće mali.
- Kvalitetni zvučnici s kalotom imaju po dva centratora
- Magnet (barem 1 – 1,4 T) treba biti malih dimenzija kako bi reflektirajuća površina iza membrane bila minimalna.
- Kalotne membrane se izrađuju od krutih materijala s velikim omjerom čvrstoća/težina. Konusne membrane se mogu pri velikim snagama trajno izobličiti, pa se najčešće upotrebljava polipropilen.

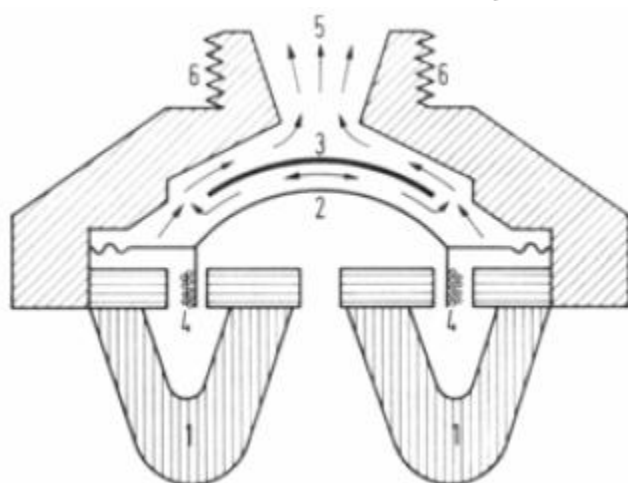
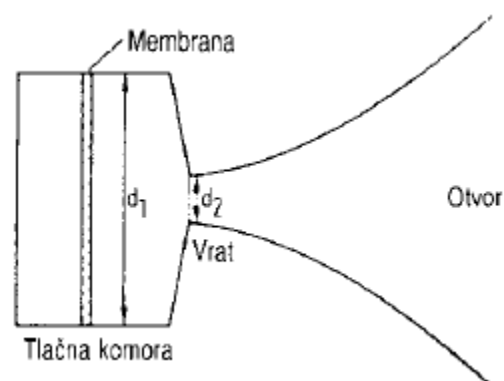
Visokotonski zvučnici

- Prijenosno područje je npr. 3 – 18 kHz ili 8 - 23 kHz ili sl.
 - Najčešće se upotrebljavaju kalotne membrane. Materijali su na bazi papira i impregnirane tkanine, ali i metalne folije (Al, Ti).
 - Rezonantna frekvencija je najčešće smještena između 600 Hz i 2 kHz.
 - U svrhu prigušenja često se upotrebljavaju rezonatorski otvori u stijenki stražnje šupljine iza kalote ili u magnetskoj strukturi.
- Stražnja strana je potpuno zatvorena.
- Zavojnica je hlađena i prigušena viskoznošću feromagnetskog fluida.
 - Zbog male korisnosti upotrebljavaju se veliki magneti. Uz uporabu prilagodnih truba korisnost se povećava do 1 – 2 %.

10.2.7.6. Zvučnik s trakom (ribbon tweeter)



Dužina trake je oko 50 do 60 mm, širina 6 – 10 mm, gustoća magnetskog toka u rasporu 8 mm oko $B = 0,5 \text{ T}$.

10.2.7.7. Zvučnik s tlačnom komorom

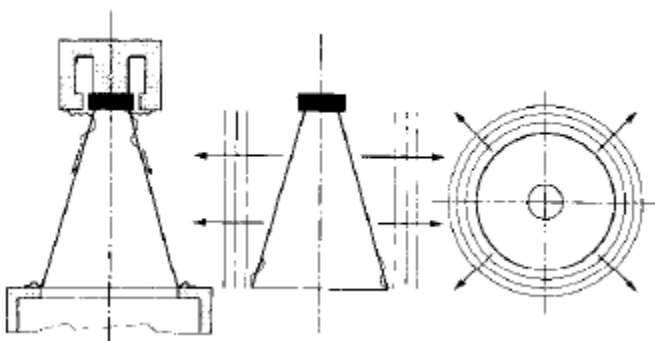
Presjek zvučnika s tlačnom komorom (bez roga):

1) magnet, 2) membrana, 3) ploča sa izjednačenjem vremena kašnjenja, 4) titrajna zavojnica 5) izlazni otvor 6) navoj

10.2.7.8. Walsh-ov zvučnik (Ohm Acoustics, model F)

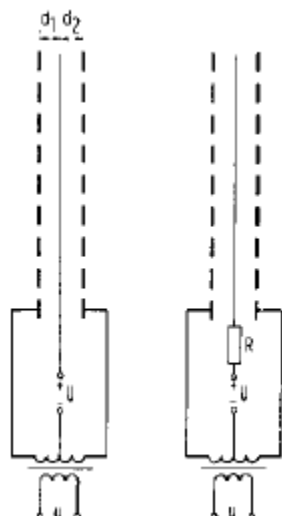
Širokopojasni, neusmjereni zvučnik.

Vertikalni konus (pod kutem od oko 250), na kojem je elektromagnetski pretvarač, postavljen je na prigušnoj kutiji.



10.2.7.9. Elektrostatski zvučnik

("Prozor u koncertnu dvoranu")



d_1 i d_2 su razmaci elektroda i membrane, u je tonfrekvencijski napon

Membrana je na izvoru polarizacijskog napona U , pa na nju djeluje sila F :

$$F \approx (U + u/2)^2/d_1^2 - (U + u/2)^2/d_2^2$$

Promjenom razmaka elektroda od membrane mijenja se i kapacitet C i time (uz konstantni U , 800 – 6000V) i električki naboj Q na pomičnoj membrani ($Q=C$).

Tada je sila F

$$F \approx uQ(d_1 + d_2)$$

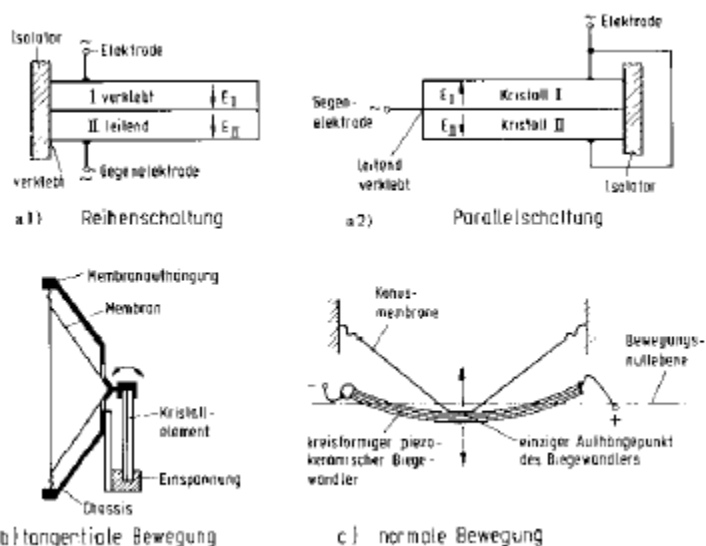
Budući da je $(d_1 + d_2) = \text{konst.}$, odnos između napona u i sile F je linearan.

10.2.7.10. Piezoelektrički zvučnici

S obzirom na način pobude koriste se dva titrajna sustava:

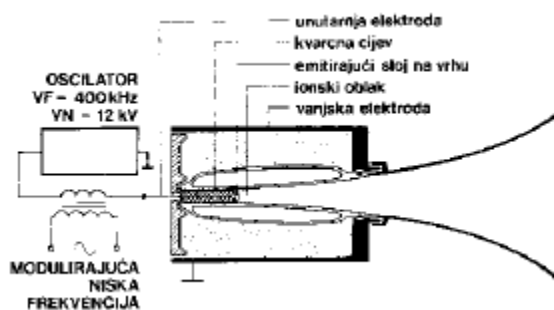
- smjer električke pobude je okomit na smjer mehaničkih titraja. Upotrebljava se kod dugih, uskih štapova.
- smjer električke pobude je isti kao i smjer mehaničkih titraja.

Upotrebljava se kada je debljina elementa malena prema poprečnom rastezanju.



Načini lijepljenja keramičkih pločica i načini ovjesa membrane na pretvarački element.

10.2.7.11. Ionski zvučnici



10.2.8. UGRADNJA ZVUČNIKA

Korisnost zvučnika ovisi o otporu isijavanja $Z_r = \rho_0 c = 410 \text{ N s/m}^3$ ako je promjer membrane *velik* u odnosu na valnu duljinu. Zato niskotonjski zvučnici trebaju imati što veće membrane.

Ugradnjom malog zvučnika u eksponencijalnu trubu mogu se postići slični akustički odnosi kao i kod velike membrane.

Naime, velike amplitude membrane male površine pretvaraju se u male amplitude čestica zraka, ali na velikoj površini.

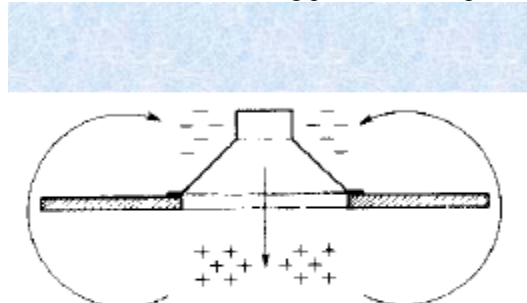
Membrana, *malena* u odnosu na valnu duljinu, isijava svojom prednjom i stražnjom stranom po jedno kuglasto zvučno polje.

Ta dva polja međusobno su protufazna i poništavaju se zbog akustičkog kratkog spoja. Odvajanje prednje i stražnje strane odgovarajućim zvukovodom sprječava akustički kratki spoj.

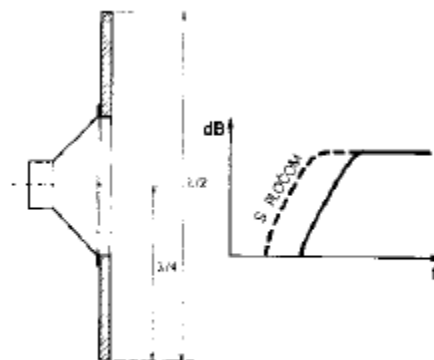
Zvukovod (npr. kutija) treba katkad povećati premalo prigušenje membrane.

10.2.8.1. Ravna ploča

Akustički kratki spoj nastaje kada je vanjska dužina puta između prednje i stražnje strane manja od $\lambda/2$. Tada nastaje interferentni minimum zbog protufaznosti, pa zvučni tlak pada sa 6 dB/okt.



Slika 6.1. Akustički kratki spoj



Slika 6.2. Minimalna veličina ploče zvučnika s prikazom poboljšanja reprodukcije basova

Ozvučne ploče (kvadratne ploče s otvorom za zvučnik blizu sredine) sprječavaju akustički kratki spoj uspješno do granične frekvencije f_g .

Granična frekvencija iznosi $f_g = (c/4)d$,

gdje je d najmanji razmak između rubova zvučnika i ploče.

10.2.8.2. Eksploencijalna truba

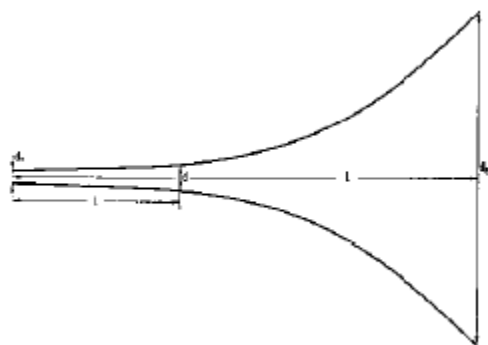
Najbolji se rezultati postižu eksploencijalnom trubom koja je konstruirana tako da se za jednake priraste duljine površina presjeka povećava za isti postotak:

$$d = d_0 e^{ml}$$

gdje je d promjer u bilo kojoj točki trube, d_0 je promjer vrata roga, l je razmak između d i d_0 , a m je konstanta određena graničnom frekvencijom roga.

Granična frekvencija iznosi

$$f_g = m \cdot c / 4\pi$$



Presjek eksploencijalnog roga

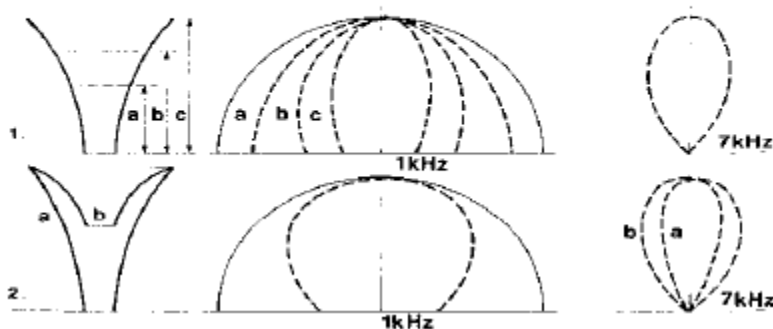
Krajnji promjer roga de dan je izrazom

$$d_e = 2c/\omega_g$$

Duljina roga ovisi o početnom i krajnjem promjeru:

$$L = (d_e/2) \ln(d_e/d_0)$$

Truba	l_1 (m)	d_0 (m)	f_g (Hz)	Kut pokrivanja
A	0.75	0.4	200	95
B	1.00	0.53	150	85
C	1.35	0.66	120	75
D	1.95	0.86	85	65

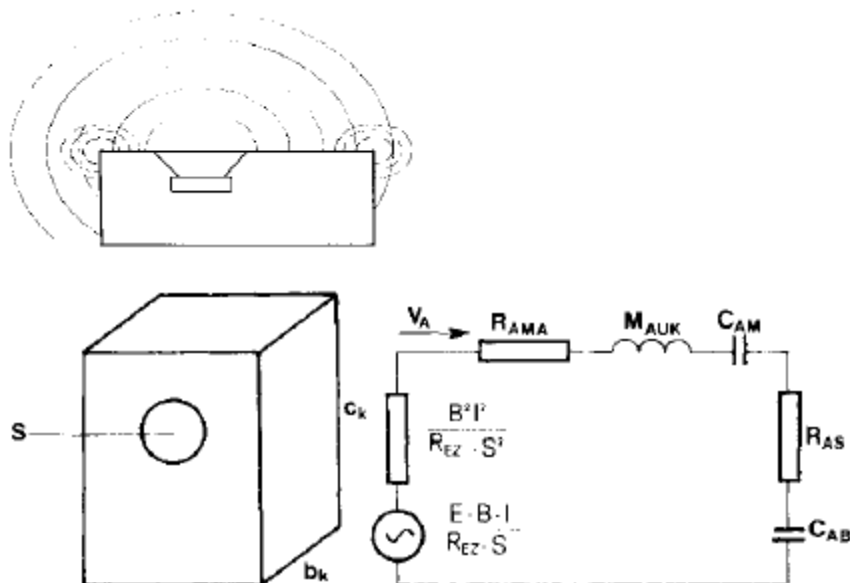


Usmjerna karakteristika

Truba, predviđena za prijenos i nižih frekvencija od 30 Hz u zatvorenoj prostoriji, a građena preklopljeno, poznata je pod imenom **Klipschorn**.

10.2.8.3. Zatvorene kutije

Često se upotrebljavaju, jer su obje strane membrane međusobno odvojene, pa nema akustičkog kratkog spoja.



Akustički analogni krug zvučnika u zatvorenoj kutiji

R_{AMA} akustički otpor mehaničkog sustava

M_{AUK} ukupna akustička masa

C_{AM} akustička elastičnost mehaničkog sustava

R_{AS} akustički otpor isijavanja stražnje strane membrane

C_{AB} akustička elastičnost zračnog jastuka u kutiji

Rezonantna frekvencija, ekvivalentni volumen i Q



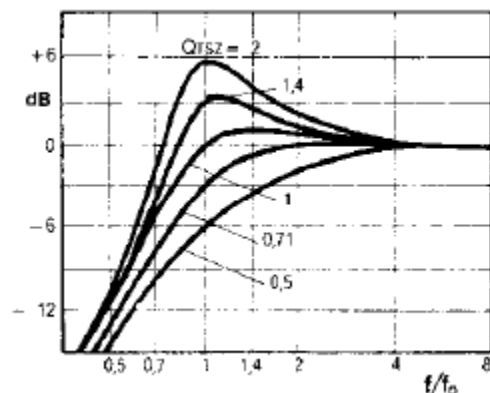
Rezonantna frekvencija je

$$f_r = 2\pi \sqrt{M_{Auk} C_{Auk}}$$

Na osnovi podataka o ekvivalentnom- i netto-volumenu može se izračunati povišenje rezonantne frekvencije pri ugradnji u kutiju (uz $V_{ek} = \rho_0 c^2 C_{MM} S^2$, V_n je netto-volumen).

$$f_r/f_0 = 0.93 \sqrt{(1 + V_{ek}/V_n)}$$

U ovisnosti o dobroti sustava Q mijenjati će se i frekvencijska karakteristika na niskim frekvencijama, a i tranzijentni odziv zvučnika.



U zatvorenoj kutiji nastaju tri grupe rezonantnih frekvencija koje su određene međusobnim razmakom paralelnih stijenki kutije

$$f_r = c/2 \sqrt{(n_1^2/a^2 + n_2^2/b^2 + n_3^2/c^2)}$$

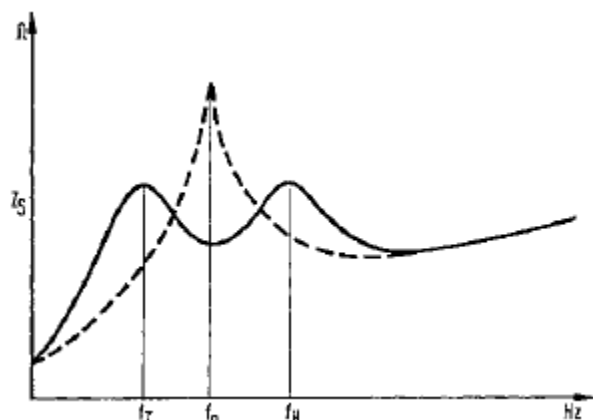
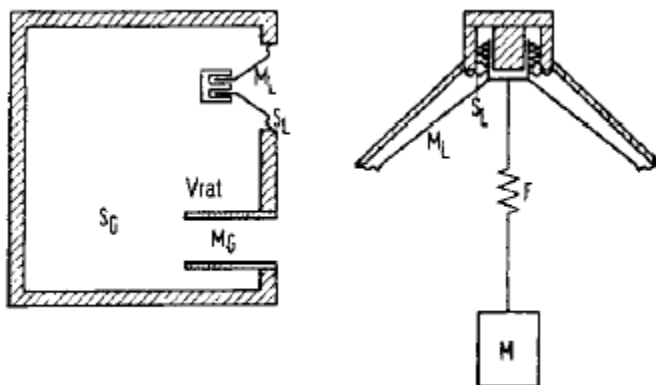
Kompresiona kutija

je posebna izvedba zatvorenih zvučnih kutija.

U kompresionim kutijama krutost membrane praktički ovisi o zračnom jastuku

[*air (acoustic) suspension, akustički ovjes*].

10.2.8.4. Bas-refleks kutije



Krutost opruge F koja je ovješena na membranu odgovara krutosti zraka u kutiji, a masa M masi zraka u cijevi. Pri višim frekvencijama (brzo pomicanje membrane) opruga sama apsorbira cijelu energiju, i masa M ne sudjeluje u titranju.

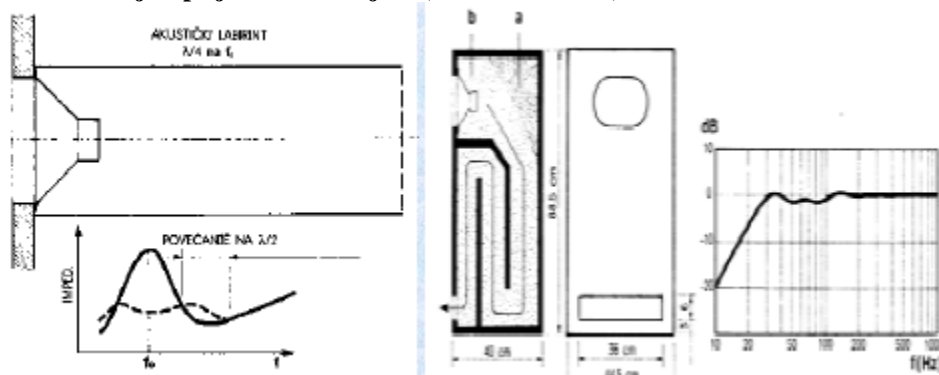
Snižanjem frekvencije počinje titrati i masa zaostajući pri tome iza titraja membrane za neki fazni kut. Pri nekoj određenoj frekvenciji, koja odgovara f_H , fazni zakret između oba pomaka je točno 180° . Daljnjim usporavanjem titrajne zavojnice smanjuje se fazni zaokret i kod f_0 iznosi 90° . Membrana isijava relativno malo zvučne energije, dok većinu energije isijava tunel. Napokon, kod donje rezonantne frekvencije f_T oba su pomicanja u fazi. Zvučna energija se emitira i iz membrane i iz tunela.

Na rezonantnoj frekvenciji kutije f_0 isijavanje iz cijevi je fazno pomaknuto za 90° prema isijavanju membrane.

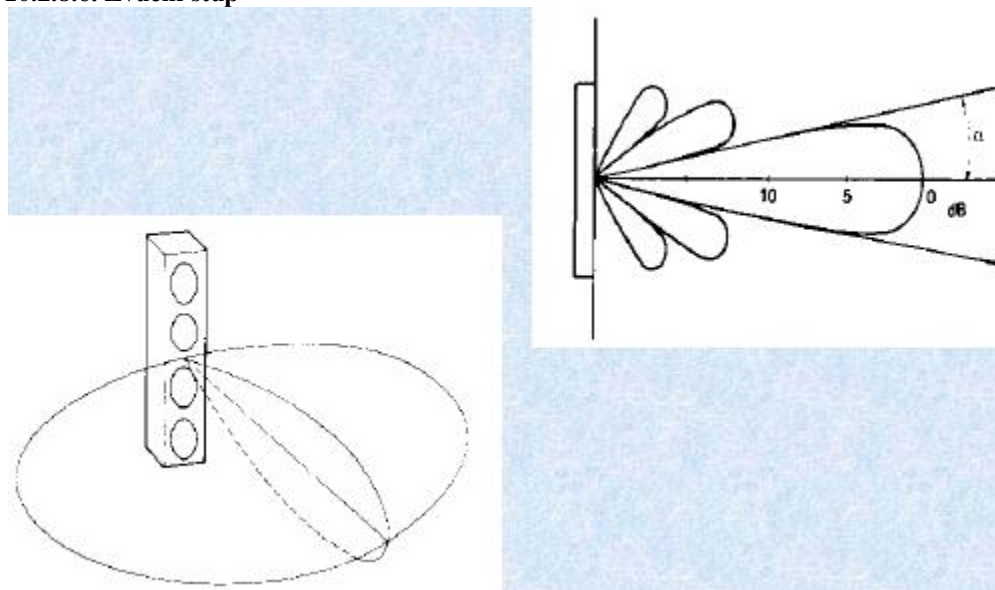
$$f_0 = 1/2\pi \sqrt{1/(S_G M_G)} = c/2\pi \sqrt{(\pi r_0^2)/(V l_0)}$$

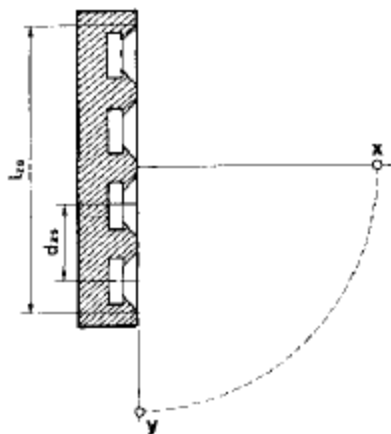
gdje su V = volumen kutije, l_0 je dužina cijevi, a r_0 promjer cijevi.

10.2.8.5. Kutija s prijenosnom linijom (transmission line)



10.2.8.6. Zvučni stup





Zvučni tlak u pojedinim točkama prostora ovisi o frekvenciji i razmaku između zvučnika d_{zs} . Pri npr. stupu s četiri zvučnika uz $d_{zs} = \lambda/4$ zvučni tlak je nula jer se poništavaju tlakovi 1. i 3. te 2. i 4. zvučnika. Duljina stupa l_{zs} se često uzima 4λ za najnižu frekvenciju.

10.2.10 SLUŠALICE

Zaštićuju slušatelja od buke okoline i okolinu od buke reprodukcije.

Frekvencijska karakteristika, izobličenja i slušna perspektiva su često mnogo bolja od zvučničke reprodukcije.

Nedostaje osjećaj zvuka na tijelu.

Većina slušalica su elektrodinamičke, a postoji i nekoliko elektrostatskih i piezopolimernih (PVDF) izvedbi.

Najviša kakvoća u pogledu tranzijentnog odziva, malih izobličenja te izvrsne frekvencijske karakteristike postiže se elektrostatskim slušalicama.

Slušalice mogu biti zatvorene (cirkumauralne), koje u potpunosti zatvaraju slušnu školjku, tj. naliježu na kožu lubanje.

Postoje i zatvorene supraauralne slušalice, koje svojim mekim rubom naliježu na samu školjku, ali i otvorene supraauralne, tj. one naliježu na školjku, ali je zvučno prigušenje između prednje i stražnje strane slušalice malo.

U neke svrhe se upotrebljavaju i slušalice smještene u samom zvukovodu.

Kod zatvorenih slušalica nastaje tlačna komora u sustavu membrana - zvukovod - bubnjić.

Kod supraauralnih slušalica ta komora je u prosjeku zapremine oko 6 cm^3 , a kod cirkumauralnih je, već prema izvedbi, zapremina i nešto veća.