

# Sažetak za ZI iz Elektroakustike

By: **MatthewSHP**

**v1.0**

## 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

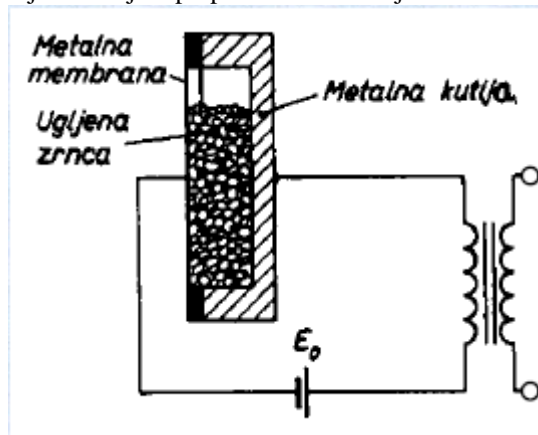
##### ELEKTROMOTORNA SILA RAZMJERNA ELONGACIJI

###### a) Ugljeni mikrofon

Promjena otpora  $\Delta R$ , 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  $\Delta R$  je

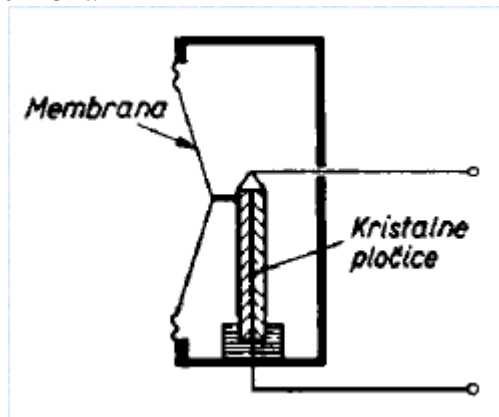
$$e = I_0 \cdot \Delta R = C \cdot x \cdot E_0 / R_0$$

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

###### b) Kristalni mikrofon

EMS  $e$  razmjerna je elongaciji membrane  $x$

$$e = C \cdot x$$



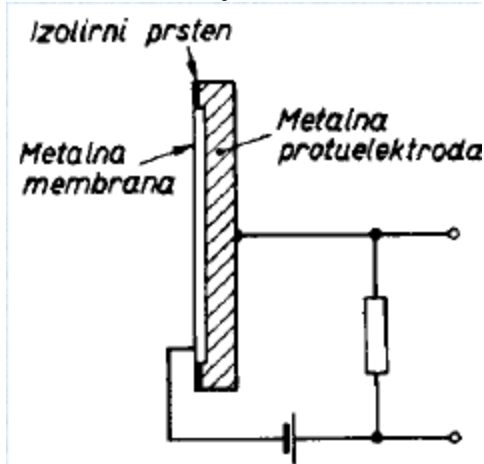
Zbog koeficijenta proporcionalnosti  $C$  i ovdje će EMS biti **neovisna** o frekvenciji.

###### 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

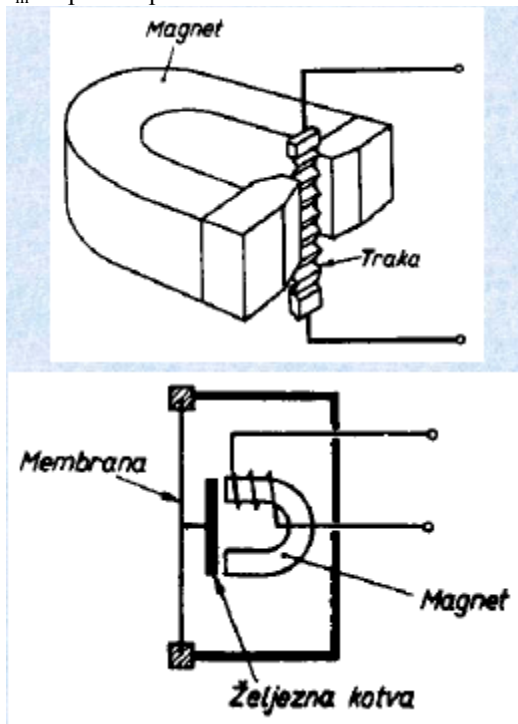
*Elektrodinamički mikrofoni*

$$e = -C \dot{x} = C x_m \sin \omega t$$

gdje je  $\Phi$  magnetski tok u kojemu titra vodič,

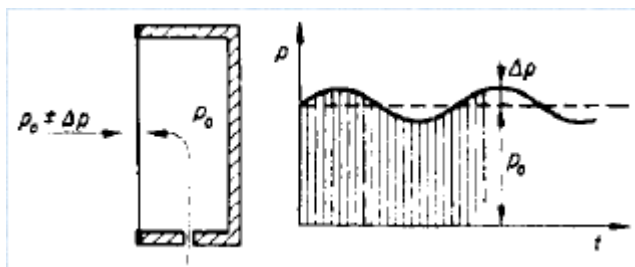
$x =$  — diferencijalni kvocijent elongacije po vremenu, dakle titrajna brzina vodiča (odnosno membrane).

$x_m$  amplituda pomaka vodiča.



#### 10.1.1.2. Akustička podjela mikrofona

a) *Tlačni mikrofoni*



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:

$$m\ddot{x} + R\dot{x} + kx = S p_m \cos \omega t$$

s  $x$  je označeno  $\ddot{x}$  što je ubrzanje membrane.

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

$$\omega = f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Pojavljaju se tri frekvencijska područja:

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

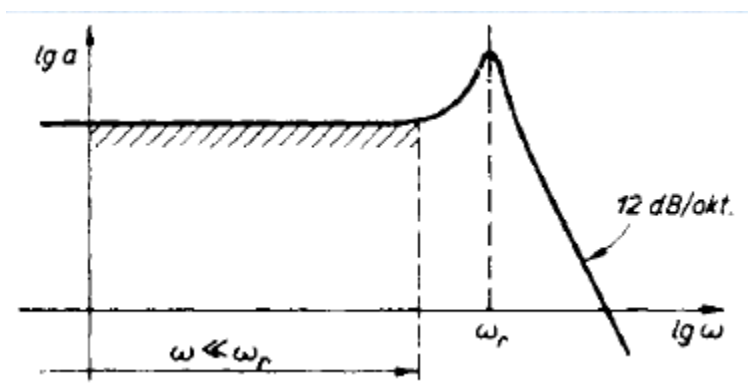
$$m\ddot{x} = S p_m \cos \omega t$$

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

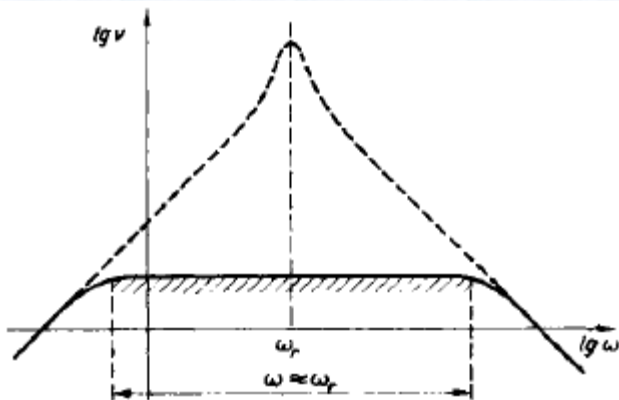
$$R\dot{x} = S p_m \cos \omega t$$

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

$$kx = S p_m \cos \omega t$$



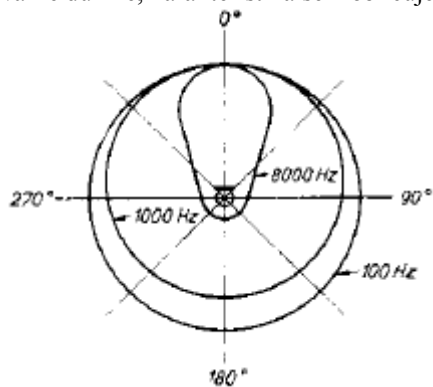
Kod ugljenih, kristalnih i kondenzatorskih mikrofona tlačnog tipa treba titrajni element tako konstruirati da rezonantna frekvencija bude iznad prijenosnog područja.



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

#### **Usmjerna karakteristika tlačnog mikrofona**

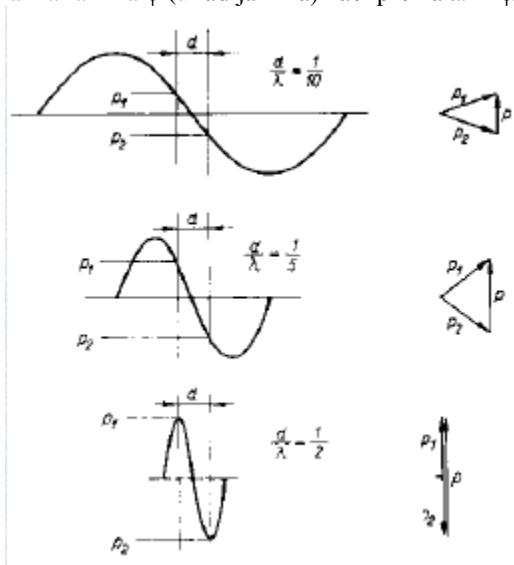
Usmjerna karakteristika je kružnica, ali na višim frekvencijama, na kojima su dimenzije mikrofona reda veličine valne dužine, karakteristika se izobličuje.



#### **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  $\phi$  (u radijanima) naći prema  $d/\lambda = \phi/2\pi$ .



Gradijent zvučnog tlaka u ovisnosti o frekvenciji.

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

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

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 jednačba glasi:

$$m\ddot{x} + R\dot{x} + x = -Cp_m \cos \omega t$$

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

U tri frekventijska područja prevladavaju različite unutarnje sile:

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

$$m\ddot{x} = -Cp_m \cos \omega t$$

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

$$R\dot{x} = -Cp_m \cos \omega t$$

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

$$x = -Cp_m \cos \omega t$$

Za sinusoidalno titranje vrijedi  $\dot{x} = \int v \, dt$ , a daljim integriranjem

dobije se za ubrzanje izraz  $a = v/\omega$ .

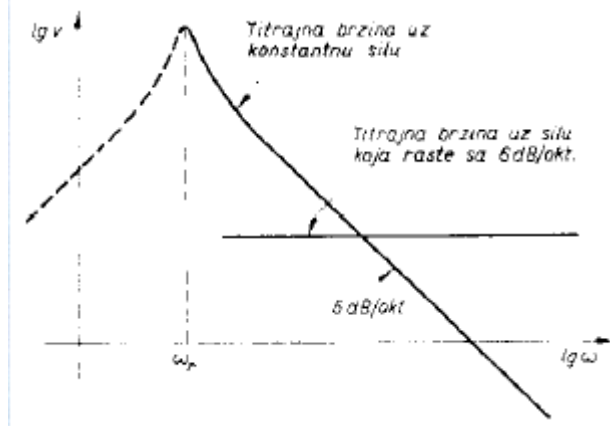
Integriranjem prvih dviju jednačbi za frekventijska područja dobije se da u području

$$\omega \gg \omega_r \text{ vrijedi: } m\ddot{x} = -Cp_m \cos \omega t$$

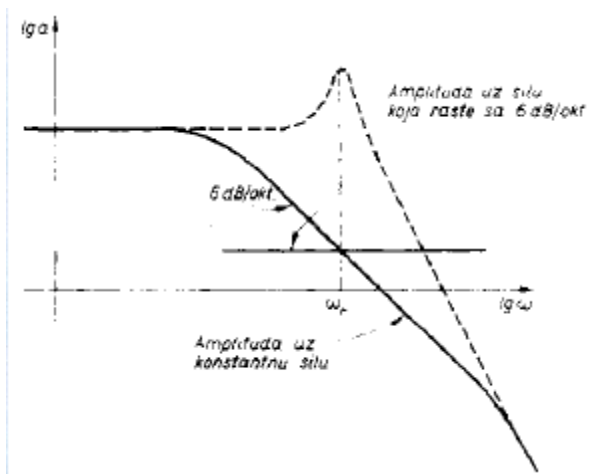
$$\text{a u području } \omega \approx \omega_r: R\dot{x} = -Cp_m \cos \omega t$$

Iz prve se jednačbe vidi da je za gradijentne mikrofone u području  $\omega \gg \omega_r$  brzina titranja  $v = \dot{x}$  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.

Kao gradijentni mikrofoni mogu se za područje  $\omega \gg \omega_r$  upotrijebiti mikrofoni kojima je EMS proporcionalna brzini titranja  $v$  (elektromagnetski, elektrodinamički) s time da im rezonantno područje leži ispod radnog područja.

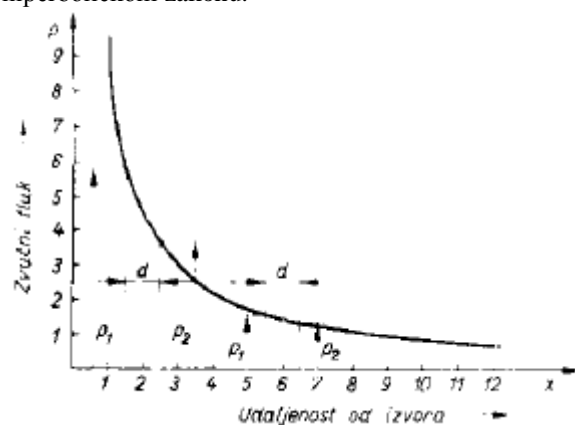


Za područje oko rezonancije mogu se primijeniti kao gradijentni mikrofoni samo mikrofoni kojima je EMS proporcionalna pomaku (ugljeni, kristalni, kondenzatorski).



### Efekt blizine

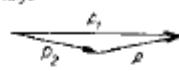
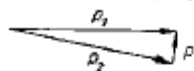
U blizini izvora gradijent tlaka se dodatno povećava zbog opadanja amplitude tlaka ovisno o udaljenosti, po hiperboličkom zakonu.



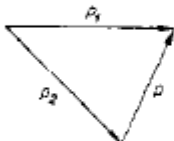
Ravan val

Kuglasti val

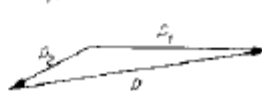
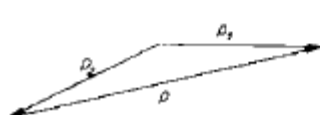
a) Niske frekvencije

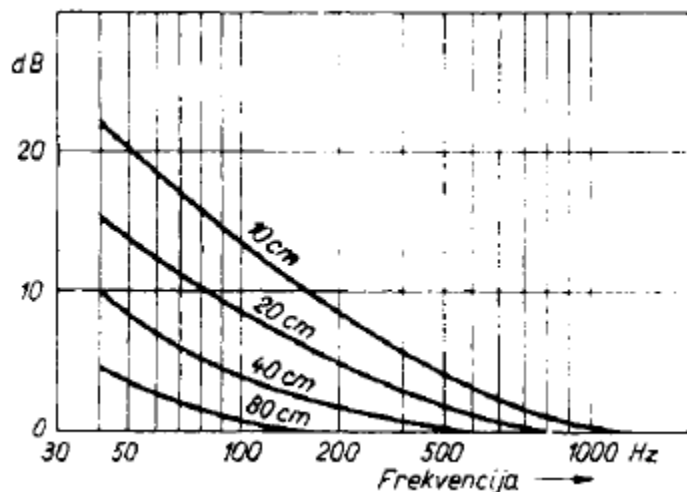


b) Srednje frekvencije



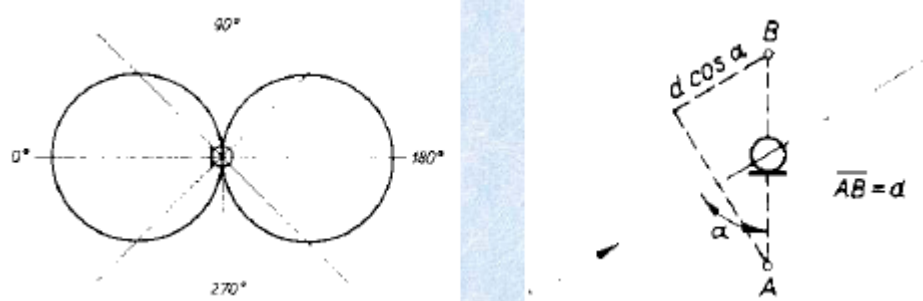
c) Visoke frekvencije





Frekvencijska karakteristika gradijentnog mikrofona mijenja se u ovisnosti o udaljenosti od točkastog izvora zvuka.

### Usmjerena karakteristika gradijentnog mikrofona



### Kombinacija tlačnog i gradijentnog mikrofona

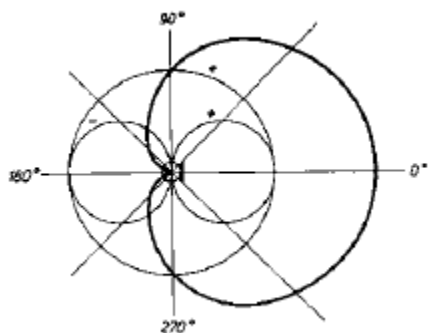
Spajanjem tlačnog i gradijentnog mikrofona u seriju dobiva se mikrofonska kombinacija koja ima usmjerenu karakteristiku u

obliku bubrega ili kardioide.

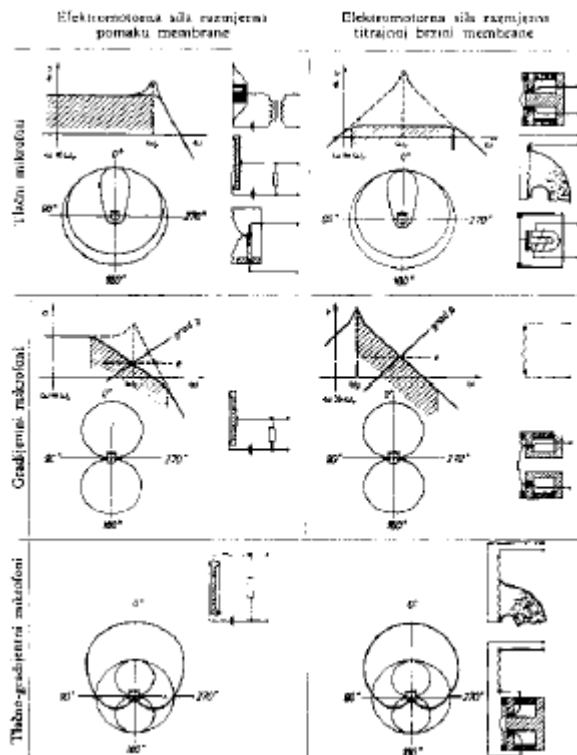
Pretpostavi li se da oba mikrofona u aksijalnom smjeru imaju jednaku osjetljivost, tj. da su im izlazni naponi  $e_1 = e_2$ , uz upad

zvučnog vala pod kutom  $\alpha$  bit će ukupni izlazni napon:

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







Tabelarni prikaz smještaja rezonantnih frekvencija mikrofona

### 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 1Pa dao snagu od 1 mW.

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

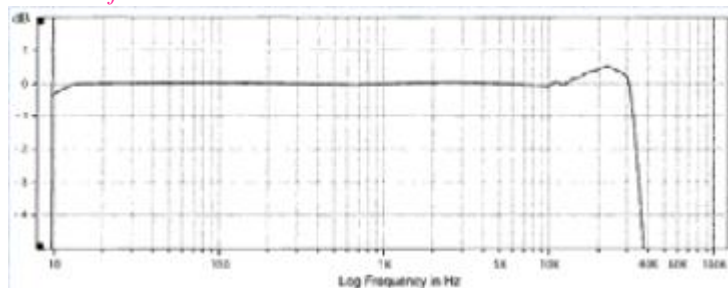
Snaga na opteretnom otporu je

$$P = \frac{U^2}{R} = \left( \frac{e}{R} \right)^2 R$$

pa je efikasnost  $n$  u dB

$$n = 20 \log \frac{P}{P_0} = 20 \log \frac{e^2}{R} + 24$$

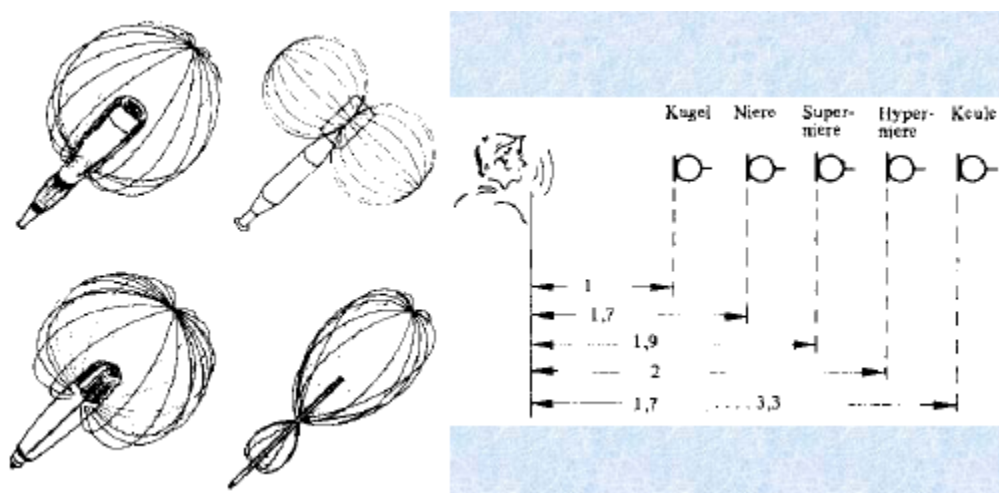
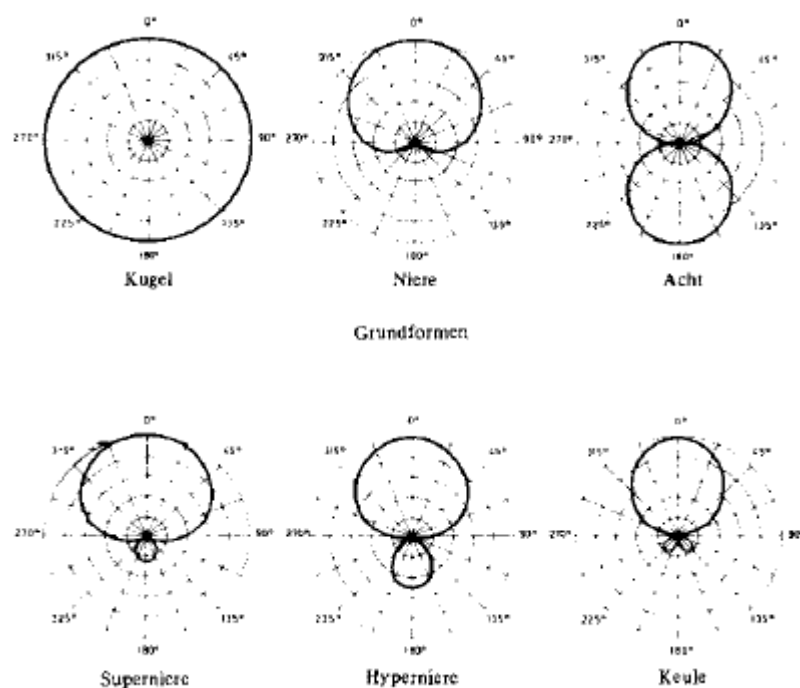
#### Frekvencijska karakteristika



#### Usmjerna karakteristika

Najčešće su karakteristike u polarnom dijagramu:

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



Pseudo-trodimenzijska usmjerna karakteristika i odnosi pojačanja usmjerenih mikrofona prema neusmjerenom u istim uvjetima.

#### 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 10µm. 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 ( $10 - 600 \Omega$ ) i visookoomske ( $25 - 80 \text{ k}\Omega$ , 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 mikrofoni upravljaju strujom iz baterije pa dobivena snaga može biti desetak puta veća od primljene. Stoga ugljeni

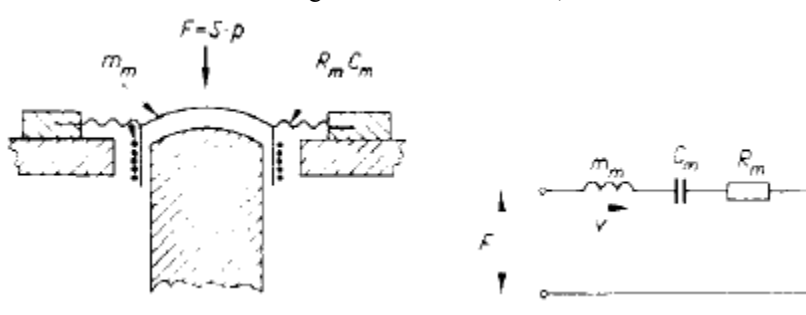
mikrofon može dati i više od 1000 puta veću snagu nego druge vrste mikrofona.

### 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  $v$ .



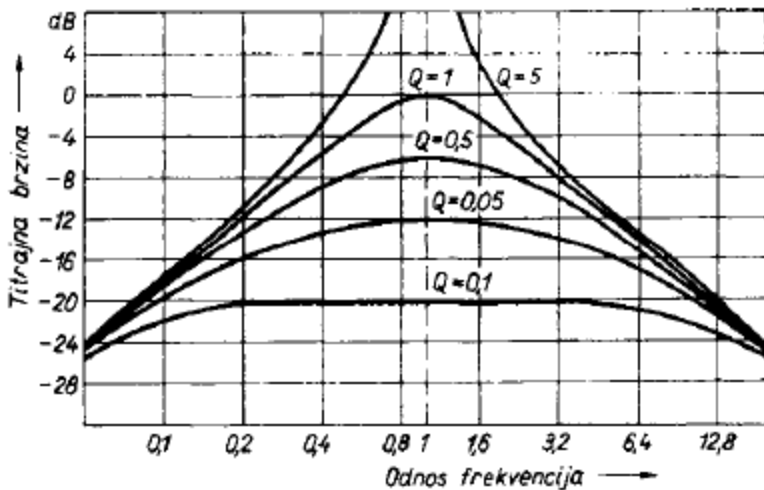
Mehanička se impedancija sastoji od mehaničkog otpora  $R_m$ , mehaničke reaktancije mase membrane  $\omega m_m$  i mehaničke reaktancije  $1/\omega C_m$  sadržane u elastičnom učvršćenju membrane. Analogno izrazu za struju dobiva se

$$v = \frac{e}{\omega m_m + \frac{1}{\omega C_m} + R_m} \quad \text{mm je ustvari } m_m$$

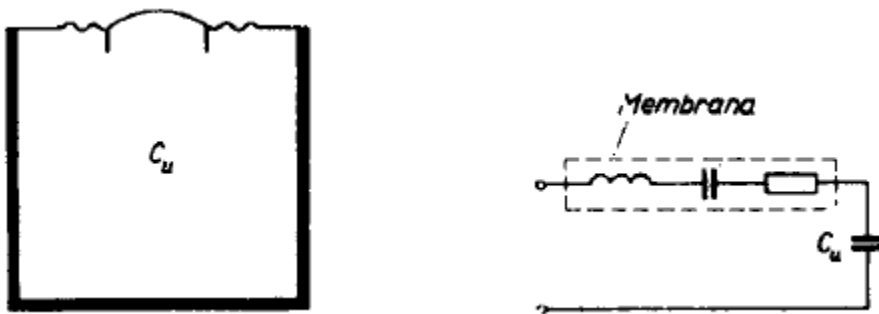
Oblik frekvencijske karakteristike titrajne brzine ovisi o faktoru dobrote  $Q$  titrajnog sustava.

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  $Q$ .

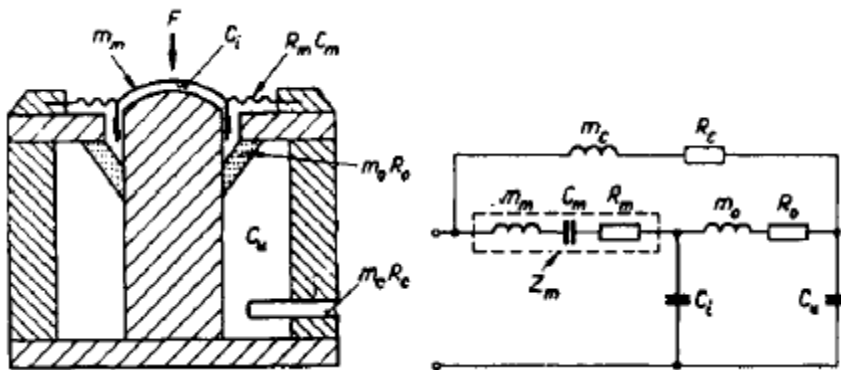
Tada je  $v$  u širokom pojasu frekvencija praktički konstantna.



Frekvencijske karakteristike titrajne brzine uz konstantnu pogonsku silu i uz različita prigušenja titrajnog sustava.



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

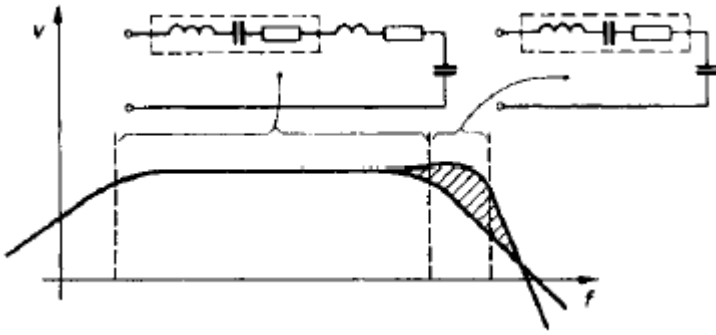


Presjek dinamičkog mikrofona i njegova nadomjesna shema.

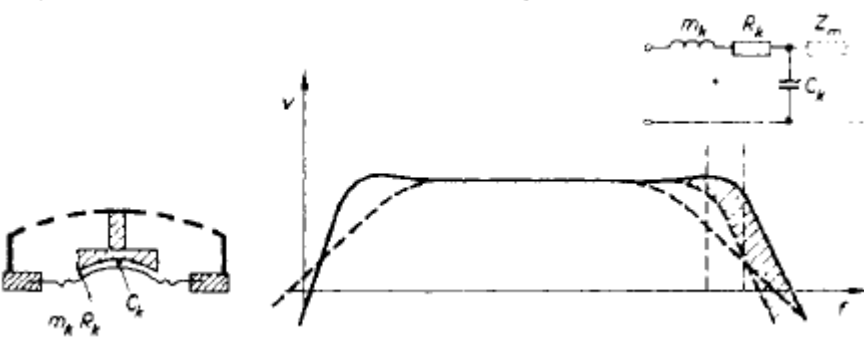
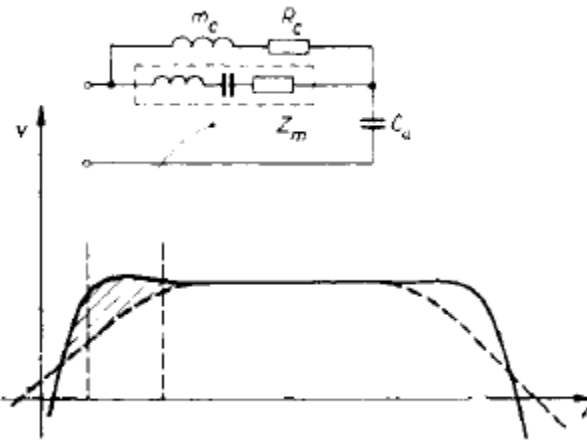
Rezonantna frekvencija takvog sustava je

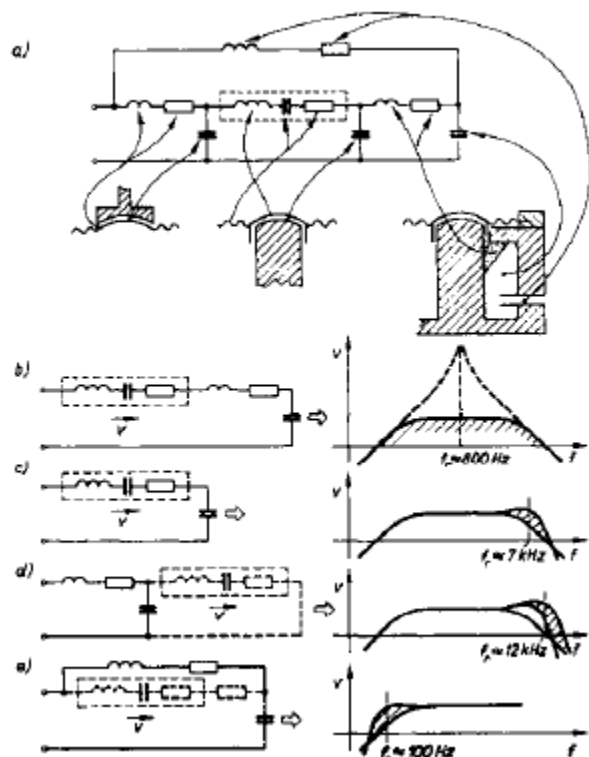
$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{m_m + m_c}}$$

Ovakvo prigušenje je dovoljno za prijenosni pojas od 6 oktava.

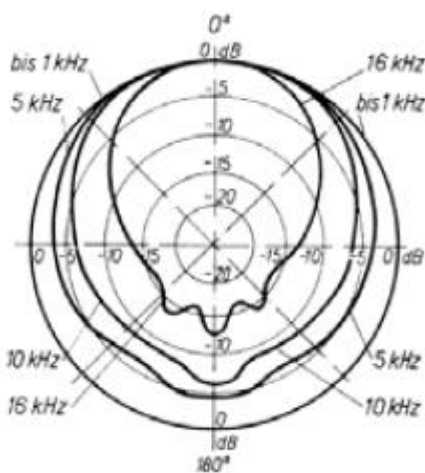


Proširenje frekvencijskog područja povećanjem titrajne brzine serijskim krugom.





Nadomjesna shema dinamičnog mikrofona s odgovarajućim mehaničkim i akustičkim elementima



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  $10\Omega$ , induktiviteta nekoliko desetaka  $\mu\text{H}$ .

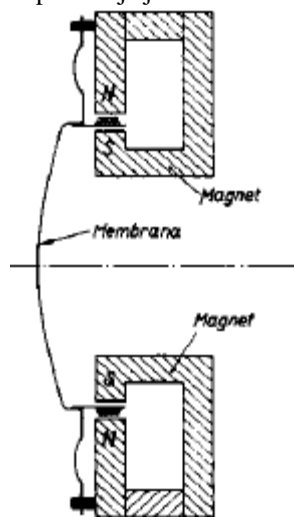
### 10. 1. 4. Gradijentni dinamički mikrofoni s titrajnom zavojnicom

Magnetski se sustav sastoji od tri magneta-sektora postavljena pod  $120^\circ$ .

Membrana je papirnata s frez  $< 100$  Hz.

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

Impedancija je oko  $500\Omega$ .



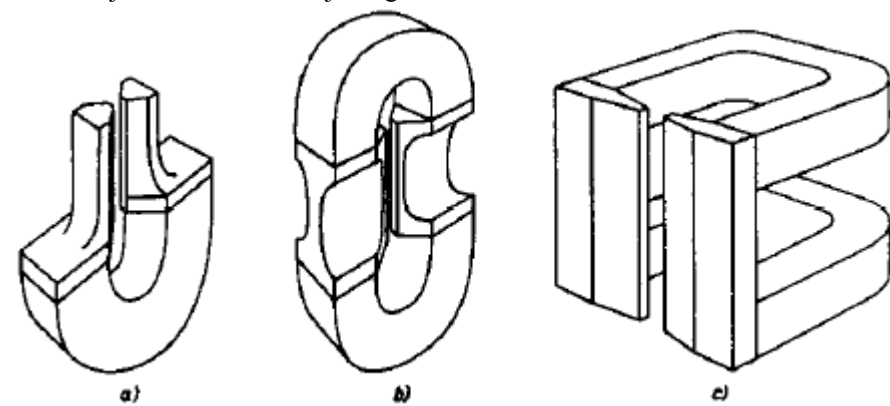
### 10.1.5. Dinamički mikrofonski s trakom

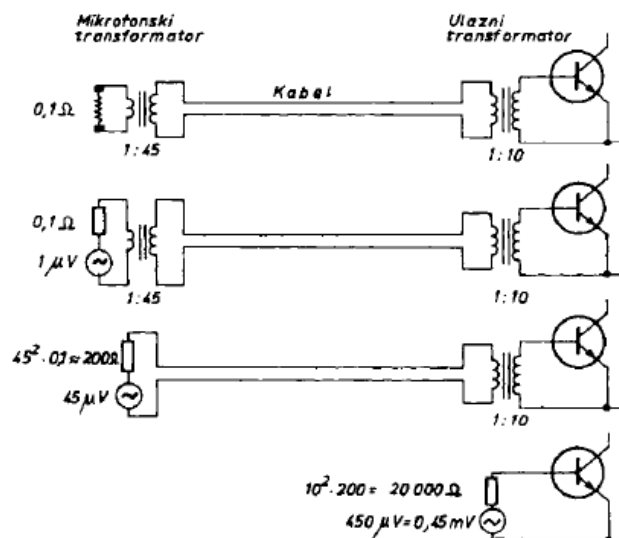
#### a) Gradijentni mikrofonski

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

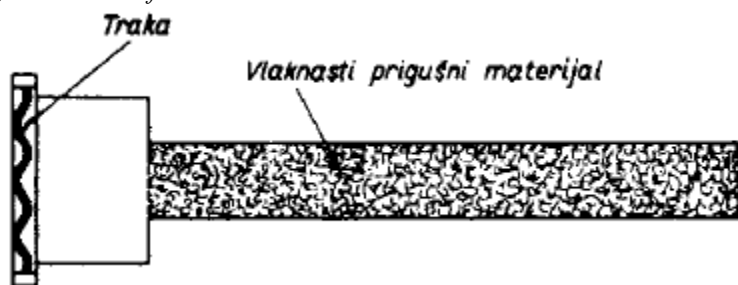
Pri izjednačenju  $\lambda/2$  s razlikom puta teorijski bi izlazni napon pao na nulu.

Nekoliko je načina konstrukcije magnetskih sustava.





b) Tlačni mikrofon



### 10.1.5. Kristalni mikrofon

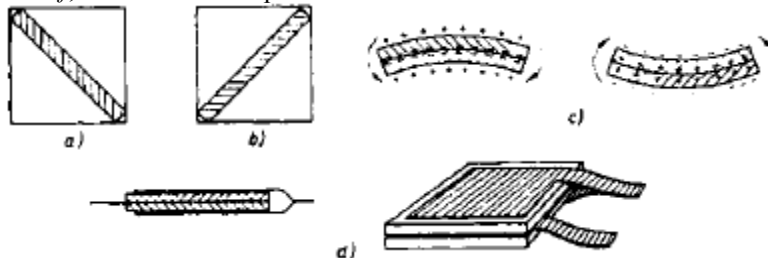
Piezoelektričke materije se dijele

a) kristale i b) keramike.

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

b) barijev titanat

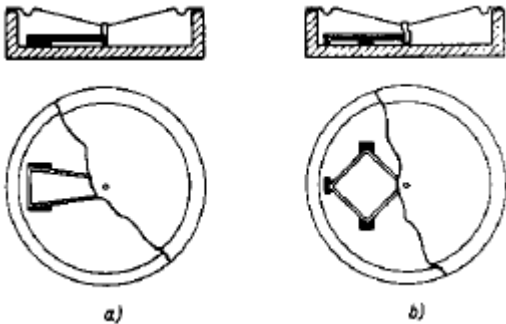
*Bimorf*, osnovni element pretvarača.





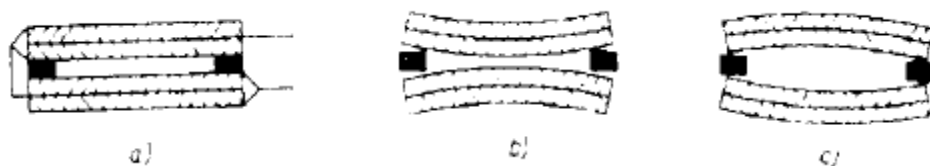
Piezoelektrički mikrofoni se dijele na:

a) mikrofone s membranom

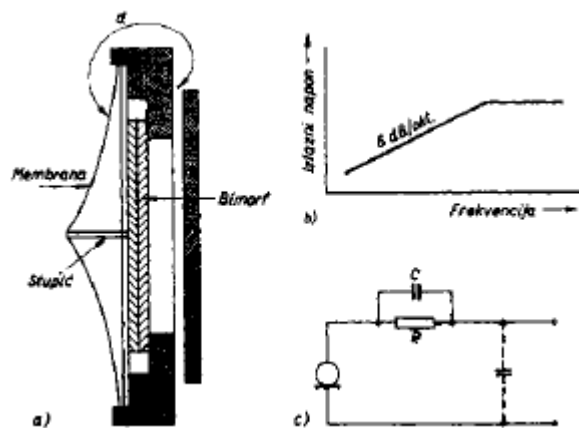
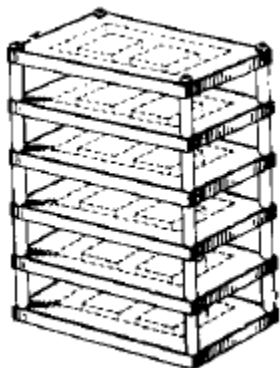


b) Mikrofon sa zvučnom ćelijom

Tlačni mikrofon se dobije spajanjem dva bimorfa na odgovarajući okvir (slika).



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

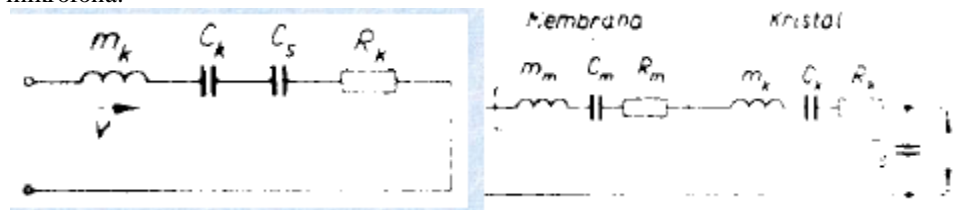


Gradijentni kristalni mikrofon u presjeku

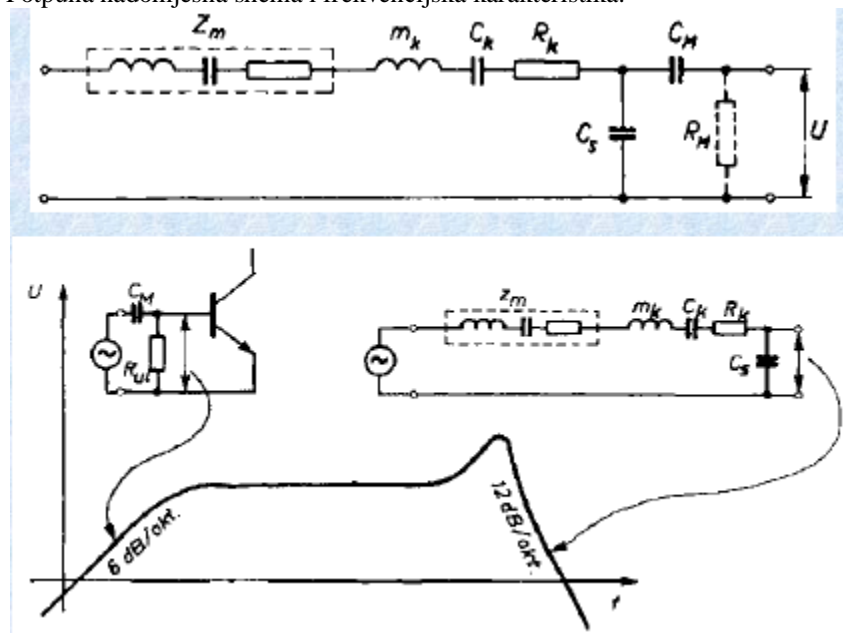
Kod zvučne ćelije  $f_{\text{rez}}$  određuje efektivna masa  $m_k$ , elastičnost kristala  $C_k$ , elastičnost zatvorenog zračnog prostora  $C_s$  te mehanički otpor  $R_k$ .

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 frekventijska karakteristika:



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

### Opća svojstva piezelektričkih mikrofona

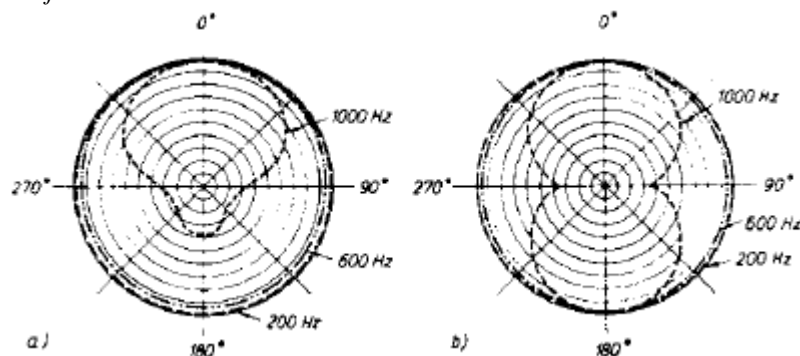
#### Osjetljivost

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%.

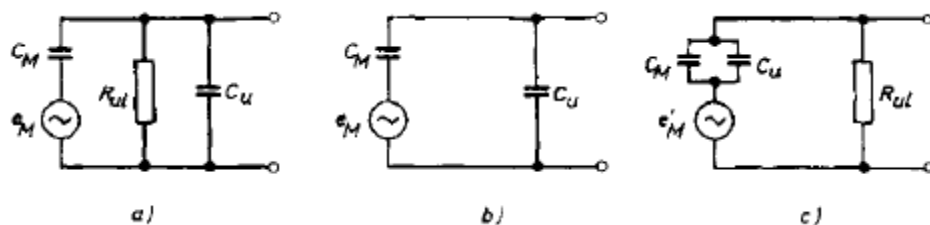
### Šum

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

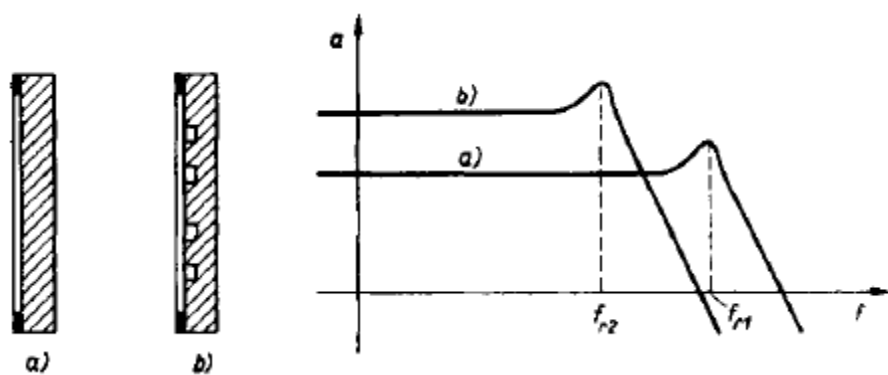
### Osjetljivost

Membrana je metalna ili metalizirana folija, debljine 10 - 15  $\mu\text{m}$ , napeta ispred čvrste metalne protuelektrode na udaljenosti oko

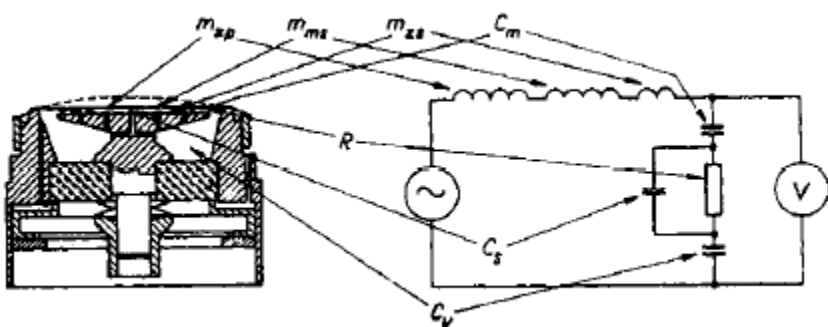
10 - 20  $\mu\text{m}$ .

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  $\Delta C$  promjena kapaciteta zbog pomaka membrane,  $C_m$  je kapacitet mikrofona, a  $C_p$  štetni kapacitet dovoda.

$$u = E_0 \frac{\Delta C}{C_m + C_p}$$

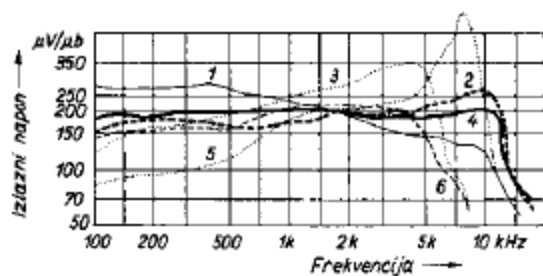
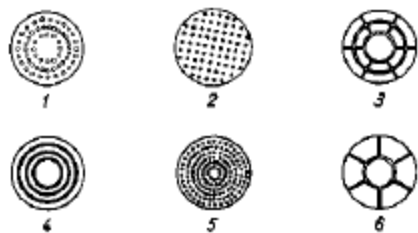


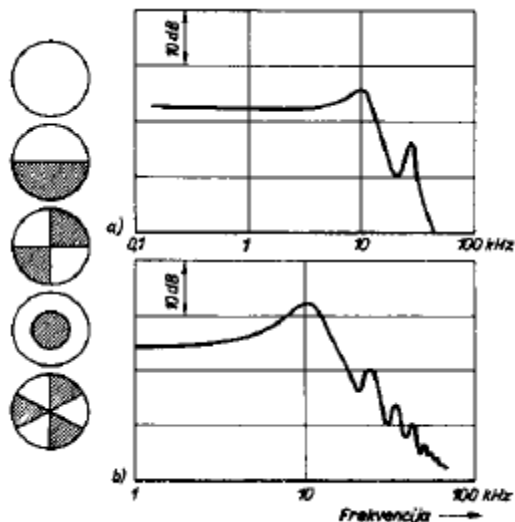
Smanjenjem krutosti osjetljivost se povećava na prosječnih 30 do 50 mV/Pa.  
 Frekvencijska karakteristika



$m_{zp}$  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.

Oblik frekvencijske karakteristike ovisi o broju, veličini, dubini, obliku itd. rupa u protuelektrodi.





Nastajanje rezonantnih izdizanja zbog pojave novih čvornih linija na membrani

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.

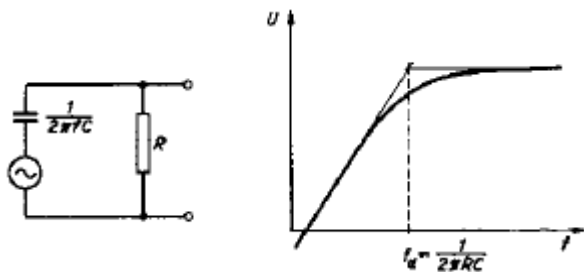
Time osjetljivost kondenzatorskih mikrofona u izvjesnoj mjeri ovisi o nadmorskoj visini na kojoj se upotrebljavaju i o promjenljivim atmosferskim utjecajima.

*Donja i gornja granična frekvencija*

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

Granična frekvencija se dobiva izjednačenjem obaju otpora:

— = R odnosno — = f



Ako je npr. kapacitet mikrofona 100 pF, a donja granična frekvencija treba biti 30 Hz, R mora biti više od 50 MΩ.

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:

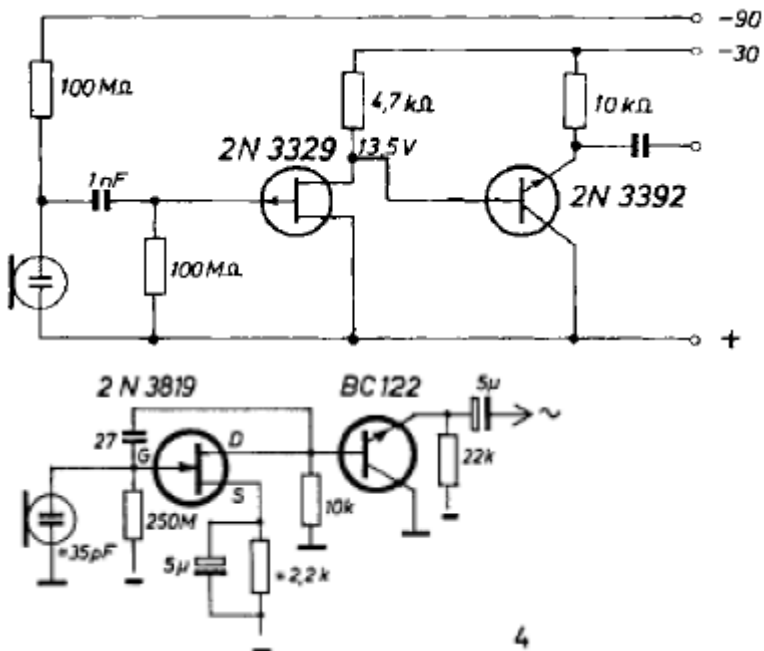
- napon na kondenzatoru je obrnuto proporcionalan kapacitetu
- promjena kapaciteta nije proporcionalna zvučnom tlaku (zbog zračnog jastuka iza membrane)

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

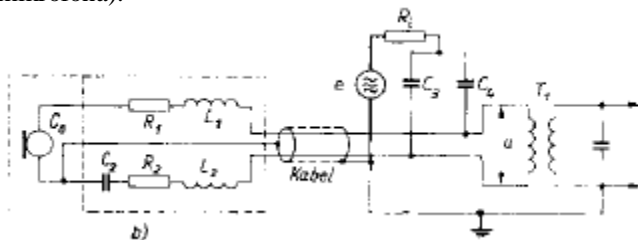
*Kondenzatorski mikrofoni na ulazu prepojačala*

Sklopovi prepojačala (pp.) mogu biti niskofrekvencijski i visokofrekvencijski.

a) U NF pp. privodi se napon, dobiven na opteretnom otporu, direktno pojačalu. Pojačalo mora imati vrlo visoku ulaznu impedanciju, a zbog visokog polarizacijskog napona sklop je osjetljiv na proboj.



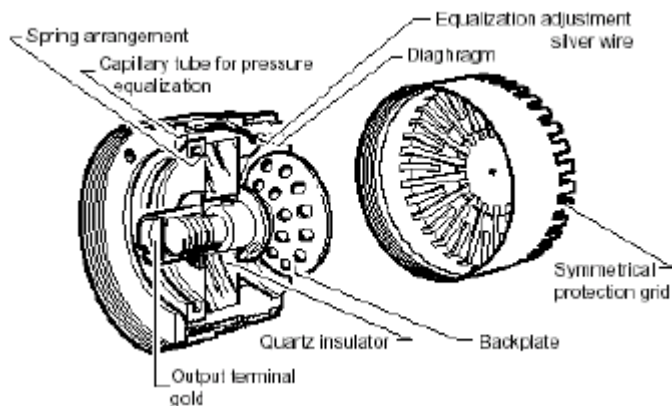
b) U VF pp. modulira se promjenom kapaciteta mikrofona VF struja dobivena iz posebnog oscilatora. Tonfrekvencijska komponenta dobiva se nakon demodulacije. Parazitarne promjene frekvencije oscilatora uzrokuju šumni napon koji smanjuje dinamičko područje uređaja (mikrofona).



VF generator  $e$  napaja preko  $C_3$  i  $C_4$  dva serijska titrajna kruga, (ugodena na  $f$  generatora), u kojima se nalazi mikrofona.

Dok nema promjene kapaciteta mikrofona nema ni napona  $u$  na primaru  $T_1$ .

Promjena kapaciteta daje napon  $u$  koji ima frekvenciju generatora, a proporcionalan je omjeru  $(C_0 - C_2)/C_2$ , čime se dobiju dva bočna pojasa.



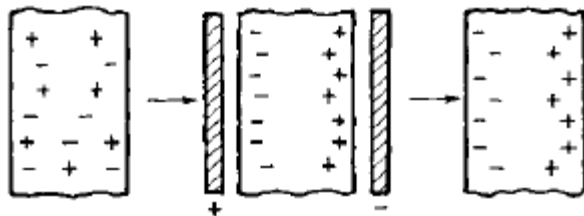
Presjek tipičnog kondenzatorskog mikrofona (Brüel&Kjær)

### 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.

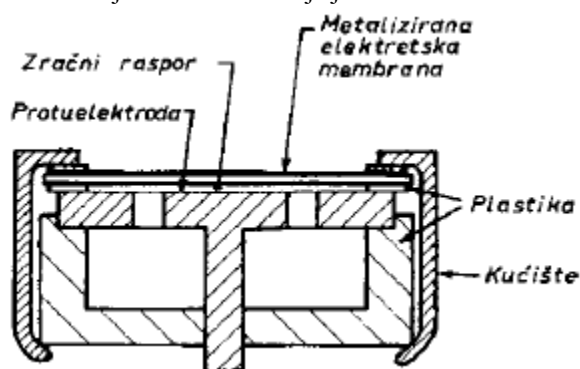
Nakon određenog vremena dielektrik se hladi pod djelovanjem polja, te ostaje polariziran (elektret=**elektricitet**-magnet).



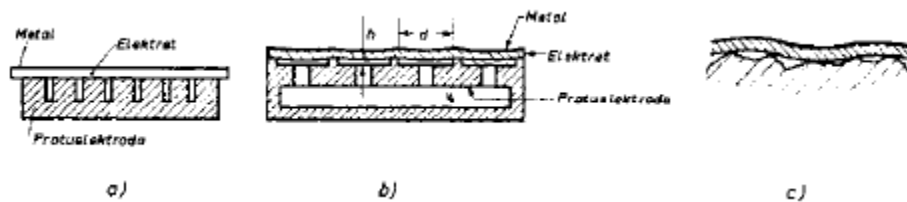
Formiranje unutarnjeg prostornog naboja

#### Konstrukcije elektretskih mikrofona

Jedna od najčešćih konstrukcija je na slici



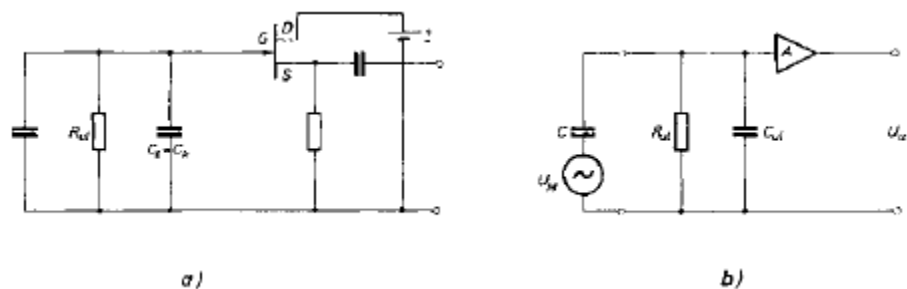
Mikrofon s nategnutom membranom od metalizirane elektretske folije.



Membrana elektreta na protuelektrodi

#### 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.



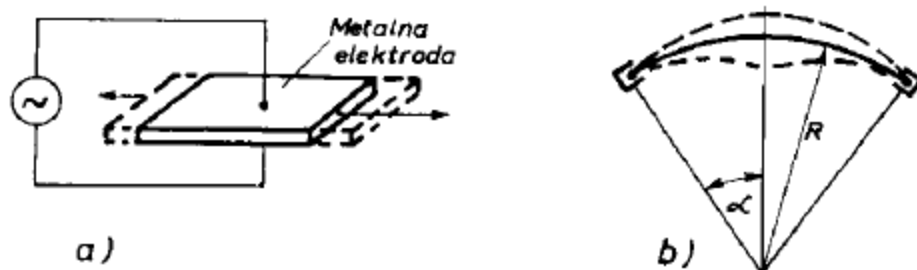
Pretpojačala su često implementirana u elektretsku kapsulu.

Opća svojstva

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

### 10.1.8. Piezopolimerni mikrofoni

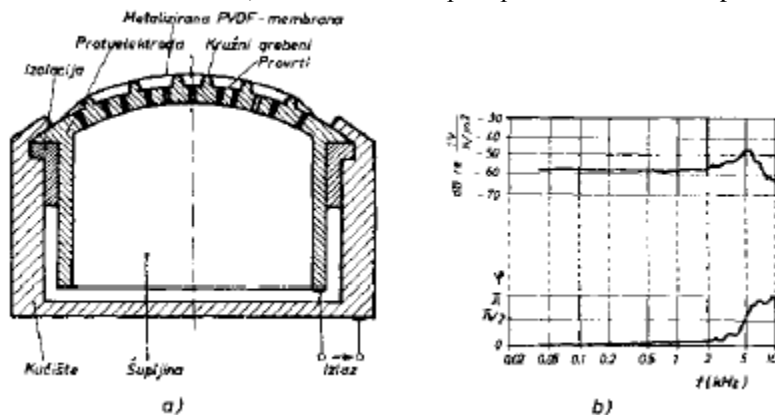
Kod polimera *polivinildenfluorida* (PVDF) otkriven (1969.) je jaki piezoelektrički efekt. PVDF postaje piezoelektričan kad se provede postupak polarizacije, sličan postupku kod elektreta. Primjena se temelji na transversalnom piezoelektričkom efektu.



Transverzalna i uzdužna pobuda

#### Konstrukcija

Jedna od češćih izvedbi, mikrofoni 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  $700^\circ\text{C}$  opada.

Omjer  $S/\bar{S}$  je nešto lošiji (za oko 20 dB) nego kod elektreta, a prosječne vrijednosti su oko 65 dB.

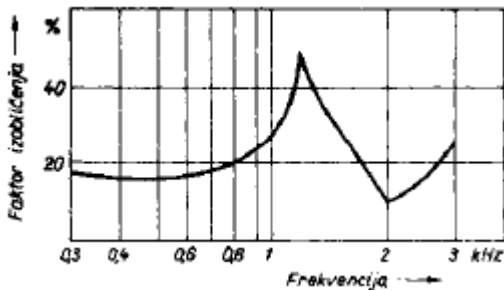
Tranzijentni odziv je izvrstan zbog male mase titrajnog sustava.



### 10.1.9. Ugljeni mikrofon

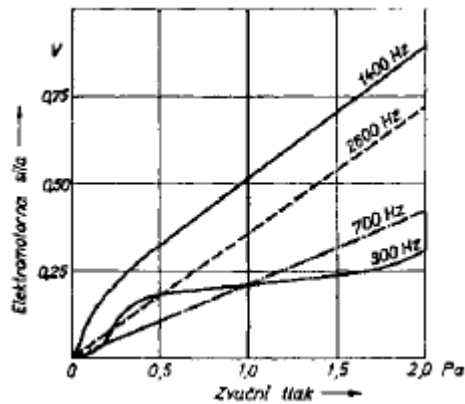
Harmoničko izobličenje je relativno veliko, a kod velikih glasnoća može doseći i 100%.

- 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.

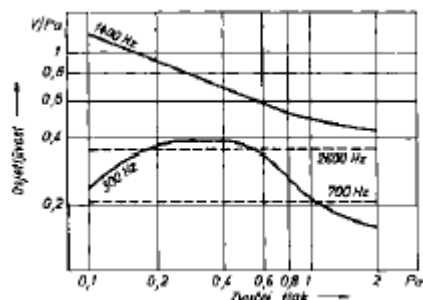


#### Frekvencijske karakteristike

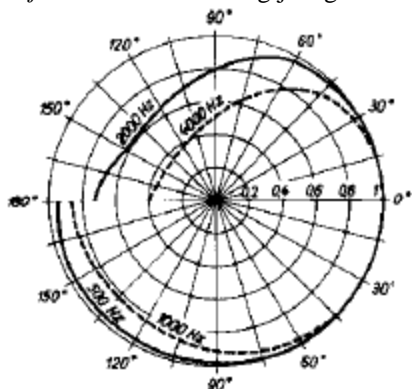
Pobudne karakteristike ugljenog mikrofona na različitim frekvencijama



Na različitim zv. Tlakovima ugljeni mikrofon ima različitu osjetljivost na istoj frekvenciji.



### Usmjerne karakteristike ugljenog mikrofona



Do oko 1kHz usmjerna karakteristika je praktički kružna.

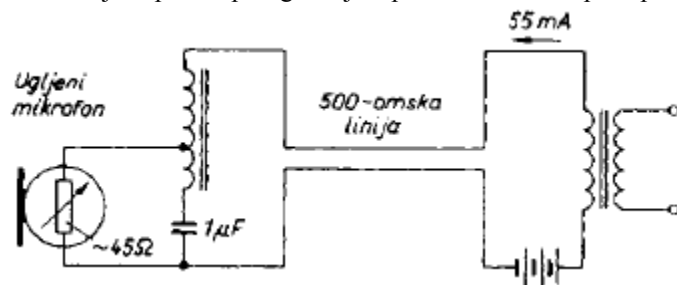
Šum raste s povećanjem mikrofonske struje, i ako ona prijeđe neku vrijednost (obično 100 – 200 mA) šum naglo raste i pretvara se u “kuhanje”.

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 mikrofona 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 mikrofona otporu potrošača (sl.).



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

Napon baterije je 4 V.

Mikrofoni 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 mikrofona

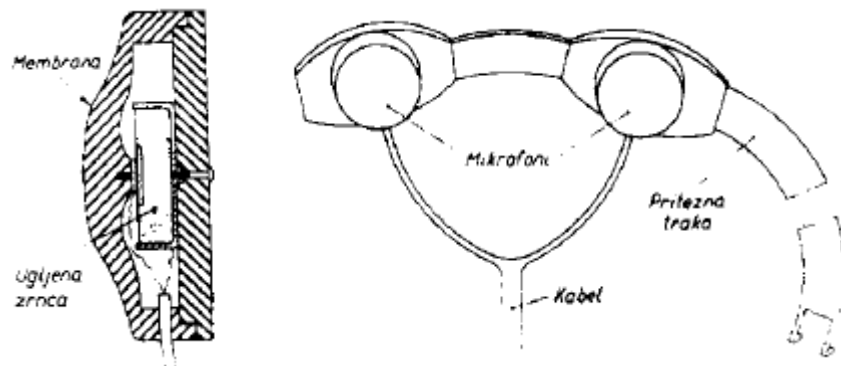
#### Laringofon

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

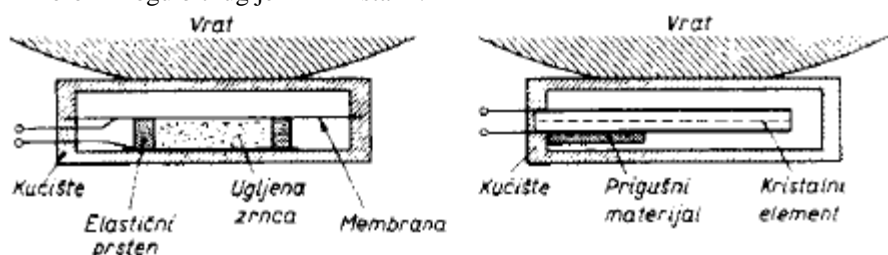
Membrana, relativno velike mase i krutosti, prislanja se na grlo, te se govorna energija prenosi direktno na membranu.

Konstrukcijom mikrofona treba postići izdizanje frekvencijske karakteristike prema višim frekvencijama.

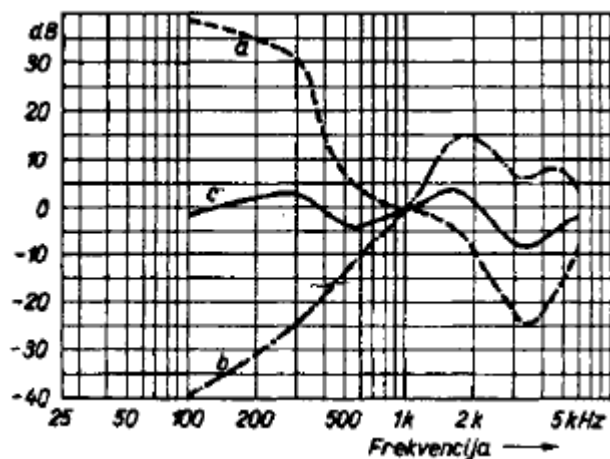
Zbog što bolje iskoristivosti zvučne energije često se upotrebljavaju po dva mikrofona.



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.



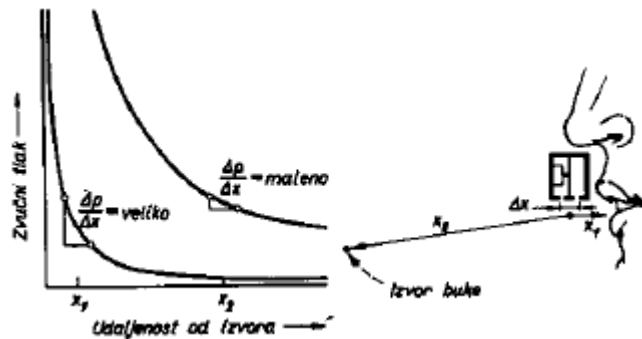
Još bolja razumljivost postiže se kristalnim glenim mikrofonom. Izborom odgovarajućeg električkog prigušenja postiže se jednolik pojas prenošenja frekvencija između 100 Hz i 3 kHz.



Frekvencijske karakteristike grla (a), mikrofona (b) i reprodukcije (c) pokazuju međusobnu ugođenost.

*Diferencijalni mikrofon*

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



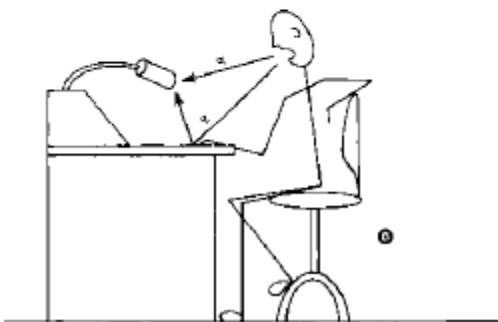
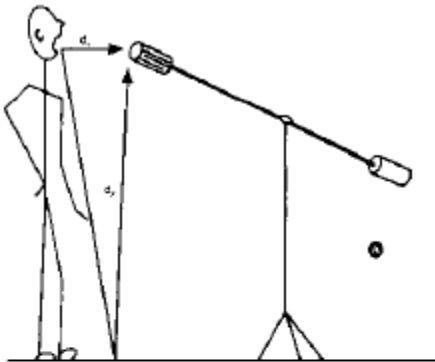
#### Ostali

- Usni mikrofon – za komentatore i sl.
- Usmjereni mikrofoni (jednocijevni, mnogocijevni, fazni, s parabolčnim 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 mikrofon, 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.



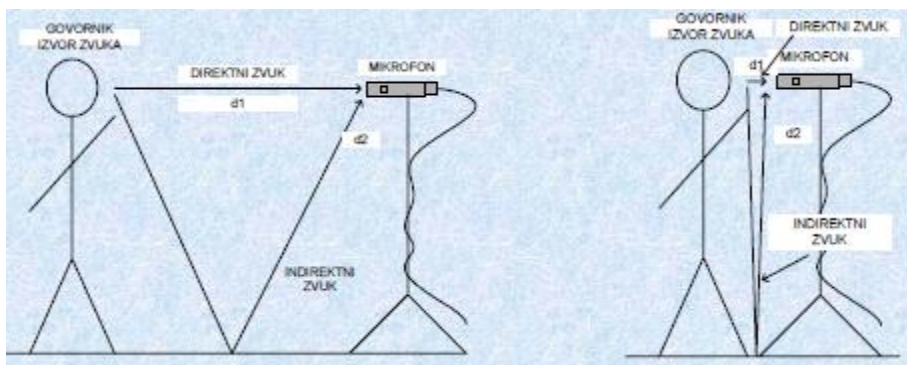
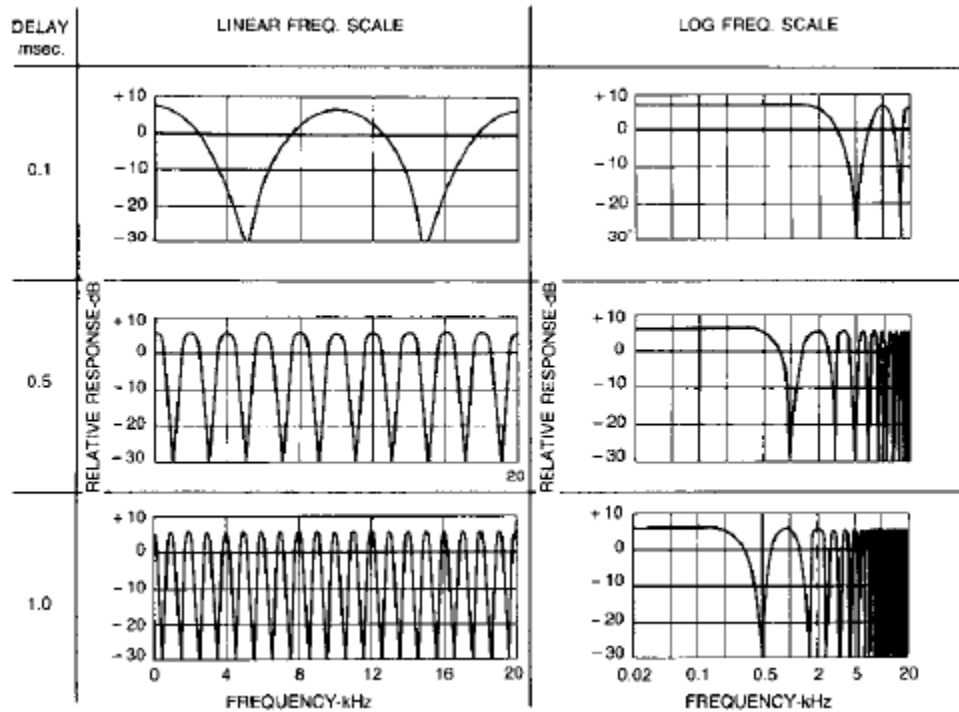
Na nekim frekvencijama taj fazni zakret iznositi će pola valne duljine  $\varphi = k \cdot \lambda / 2$  (za  $k=1,3,5,\dots$ ), kada će doći do protufaznosti signala i njihovog poništavanja.

Pretpostavimo li da je  $d1=1,5$  m

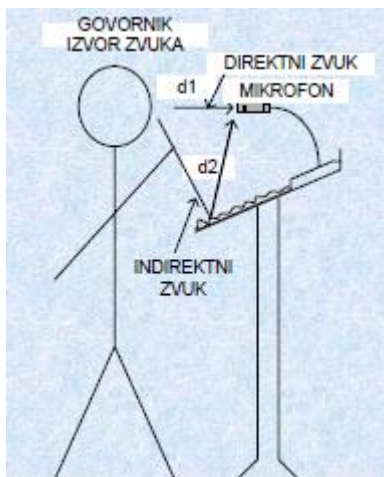
$d2=4$  m,

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

$f1=68,8\text{Hz}$ ,  $f3=206,4\text{Hz}$ ,  $f5=344\text{Hz}$ ,  $f7=481,6\text{Hz}$ ,  $f9=619,2\text{Hz}$ ,  $f11=756\text{Hz}$ ,  $f13=894\text{Hz}\dots$



Smanjenje utjecaja češljastog filtra smanjivanjem udaljenosti izvora i mikrofona



Smanjenje utjecaja češljastog filtra smanjenjem razine reflektiranog signala