

## 6. ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ И ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИ АНАЛОГИИ

### 6.1. ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ АНАЛОГИИ

В механиката се налага да се борави с доста сложен математически апарат и да се правят обемисти изчисления когато се изследват или оразмеряват сложни системи в динамичен режим. Възниква въпросът, не може ли да се упрости работата в такива случаи? Тъй като с електроакустика се занимават почти изключително специалисти по електроника, където има добре развита теория и на нейна база са развити удобни методики за изследване и оразмеряване на електрическите вериги, това е дало тласък на развитието на една област в електроакустиката, наречена електромеханични и електроакустични аналогии. Същността на тези аналогии се състои в заместването на механичната система с електрическа схема, която има реакции, аналогични на изходната механична система.

Нека разгледаме една проста механична трептяща система, показана на фиг.6.1 и състояща се от маса  $m$ , закачена на пружина с гъвкавост  $c$ , като масата се намира в среда с определен вискозитет в следствие на което оказва съпротивление на триене при движение на масата.

Ако изместим масата от състоянието на равновесие на разстояние  $x$ , пружината ще противодейства със сила  $F$ , която е право пропорционална на разстоянието  $x$  и обратно пропорционална на гъвкавостта  $c$ . Гъвкавостта може да се определи като дължината, на която ще се разтегли пружината, когато и се въздейства с определена сила и се измерва (метри на нютон).

Сега нека разгледаме какво представлява активното механично съпротивление (съпротивлението на триене). Както е известно от физиката, това представлява противодействието на средата при движение на тяло и е пропорционално на скоростта на тялото  $V$  и на един коефициент  $r$ , който характеризира средата. Характерна особеност на механичната система с активно механично съпротивление е, че в нея се получава необратим преход на механичната енергия в топлина. Силата на триене може да се изрази по следния начин:

$$F_{\text{тр.}} = r \cdot v \quad \text{или} \quad r = \frac{F_{\text{тр.}}}{v} \quad (6.1)$$

Единицата мярка за активно механично съпротивление е  $N \cdot \text{сек.} / \text{м}$ . Пак от физиката е известно, че всички тела се стремят да запазят състоянието си на покой или равномерно праволинейно движение, като се противопоставят на изменението на силата на инерцията:

$$F_m = m \cdot a \quad (6.2)$$

където  $a$  - ускорение.

За простата трептяща система на фиг.6.1 можем да запишем .

$$F = m \cdot d + r \cdot v + \frac{x}{c} \quad (6.3)$$

По определение, ускорението е:

$$a = \frac{v}{t} \quad (6.4)$$

Тук  $t$  е времето.

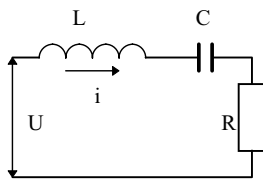
Освен това, честотата на колебание е обратно пропорционална на времето и следователно можем да напишем:

$$a = v \cdot \omega \quad (6.5)$$

Разстоянието е пропорционално на времето и скоростта и от там:

$$F = \omega \cdot M \cdot v + r \cdot v + \frac{1}{\omega c} v \quad (6.6)$$

Нека сега разгледаме уравнението на напреженията в една последователна RLC верига, показана на фиг.6.2. :



Фиг.6.2

$$U = \omega Li + Ri + \frac{1}{\omega C} i \quad (6.7)$$

Ако сравним двете уравнения, ще видим, че от математическа гледна точка те са еквивалентни. Тази еквивалентност отразява факта, че и в двете системи енергията се превръща от един вид в друг – от кинетична в потенциална и обратно в механичната система и от енергия на магнитното поле в енергия на

електрическото поле и обратно в електрическата система. И в двете активното съпротивление превръща енергията в топлина.

На базата на тази еквивалентност е изградена електромеханичната аналогия, като се приема, че на напрежението в електрическата система отговаря силата в механичната, на тока – колебателната скорост и т.н. съгласно таблицата 6. 1

Табл.6.1

Механична система		Електрическа верига	
Наименование	Означение	Наименование	Означение
Маса	<b>m</b>	Индуктивност	<b>L</b>
Гъвкавост	<b>c</b>	Капацитет	<b>C</b>
Механично активно съпротивление	<b>r</b>	Електрическо съпротивление	<b>R</b>
Механичен импеданс	<b>z</b>	Електрически импеданс	<b>Z</b>
Сила	<b>F</b>	Електрическо напрежение	<b>U</b>
Скорост	<b>v</b>	Електрически ток	<b>i</b>
Преместване	<b>x</b>	Електрически заряд	<b>q</b>

При подаване на синусоидално напрежение токът във веригата на фиг.6.2 е:

$$i = \frac{E_m \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{Z} \quad (6.8)$$

А фазовата разлика е:

$$\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (6.9)$$

По аналогия за механичната система на фиг.6.1 можем да напишем:

$$v = \frac{F_m \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{r^2 + \left(\omega m - \frac{1}{\omega c}\right)^2}} \quad (6.10)$$

А фазовата разлика между силата и скоростта на движение е:

$$\varphi = \frac{\omega m - \frac{1}{\omega c}}{r} \quad (6.11)$$

Пак по аналогия с електрическия импеданс можем да напишем за механичния:

$$z_m = \sqrt{r^2 + \left(\omega m - \frac{1}{\omega c}\right)^2} \quad (6.12)$$

където  $r$  е активната съставка на механичния импеданс

$\omega m - \frac{1}{\omega c}$  - реактивната съставка на механичния импеданс.

Честотата, за която реактивната съставка на механичния импеданс става равна на нула се нарича резонансна честота. За тази честота механичният импеданс има минимална стойност, равна на активното механично съпротивление, а скоростта на колебание има максимална стойност, равна на:

$$v = v_{\max} = \frac{F}{r} \quad (6.13)$$

Резонансната честота се определя по формула, аналогична на познатата ни от електротехниката формула на Томпсън:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m \cdot c}} \quad (6.14)$$

Разгледаната механична трептяща система, в зависимост от съотношението на стойностите на различните елементи, включени в нея може да бъде:

**-Система, управлявана от масата** - така се нарича системата, при която инерционният импеданс (определян от масата) е значително по-голям от еластичния и активното съпротивление-т е  $\omega m \gg 1/\omega c$  и  $\omega m \gg r$ . Такава система има ниска резонансна честота и малко затихване. В този случай може да се приеме, че импедансът на системата е  $z \approx j\omega m$ . Нека определим основните свойства на системата. За скоростта получаваме:

$$v = \frac{F}{z} = \frac{F}{j\omega m} = -j \frac{F}{\omega m} \quad (6.15)$$

Наличието на имагинерната единица със знак минус показва, че колебателната скорост закъснява с ъгъл  $\pi/2$  спрямо приложената сила, като амплитудата на скоростта е обратно пропорционална на честотата.

За преместването получаваме:

$$x = -\frac{F}{\omega^2 m} \quad (6.16)$$

Вижда се, че преместването е обратно пропорционално на квадрата на честотата.

**-Система, управлявана от еластичността** - система от този вид се получава, когато еластичното съпротивление е много по-голямо от другите

две-инерционното и активното -  $\frac{1}{\omega c} \gg \omega m$  и  $\frac{1}{\omega c} \gg r$ . При този вид

системи времеконстантата  $\tau = r/c$  е малка в сравнение с периода на въздействащата сила, а резонансната честота е сравнително висока.

Тогава пълният импеданс е приблизително равен на еластичния -  $z \approx -j \frac{1}{\omega c}$ .

Колебателната скорост в този случай е:

$$v = \frac{F}{z} = \frac{F}{-j \frac{1}{\omega c}} = j\omega c F \quad (6.17)$$

Наличието на имагинерната единица  $j$  показва, че колебателната скорост е дефазирана на ъгъл  $\pi$  спрямо приложената сила и е пропорционална на честотата.

Преместването на елементите на системата е:

$$x = cF \quad (6.18)$$

Вижда се, че изместването не зависи от честотата.

**Система, управлявана от съпротивлението** - такава система имаме, когато активното съпротивление е много по-голямо от реактивното-т.е.  $z \approx r$ . В този вид системи силата и скоростта съвпадат по фаза, колебателната скорост не зависи от честотата, а изместването е обратно пропорционално на честотата.

#### **Правила за преминаване от механични системи към еквивалентни електрически схеми:**

1. Всички елементи се изобразяват като двуполустници, като едрият край на елемента маса винаги е на земя.

Докато за елементите гъвкавост и триене наличието на два края е лесно обяснимо и естествено, за масата е необходимо да се поясни, че за да приложим върху нея сила и да и предадем ускорение ни е необходима опорна точка към неподвижен елемент (земя, корпус).

2. Ако всички елементи в системата се движат с еднаква скорост, то краищата им са свързани във възел. Елементите, свързани във възел в електрическата верига се свързват последователно. Това е така, защото скоростта отговаря на тока, а в електрическата верига тока във всички елементи е еднакъв при последователно свързване.

3. Ако чрез всички елементи се предава една и съща сила, то те се свързват верижно. Верижно свързаните елементи се свързват в електрическата система паралелно.

4. При изобразяване на механични системи елементите се разполагат така, че движенията на всички краища на елементи да стават в успоредни направления. Перпендикулярните на това направление връзки се считат за абсолютно твърди, безтегловни и тяхното движение е възможно само в посоката на движение на елементите.

Описаната до тук аналогия е така наречената **първа електро механична аналогия**, която е общоприета. Основното неудобство при нея е че последователно свързани механични елементи в електрическата схема се изобразяват като успоредно свързани и обратно – паралелно свързаните механични елементи се изобразяват като последователни. Това понякога затруднява изчертаването на еквивалентната електрическа схема, особено при сложни механични системи. Съществува една **втора система от аналогии**, при която механичната сила съответства на силата на тока, разликата в скоростите на двата края на елементите – на напрежението, реципрочната стойност на гъвкавостта, наречена еластичност – на индуктивността, масата на капацитета, механичната проводимост (реципрочната стойност на активното механично съпротивление) на електрическото съпротивление. При нея елементите, свързани във възел се изобразяват в електрическата схема като паралелно свързани, а верижно свързаните елементи се представят като последователно свързани в електрическата еквивалентна схема. Това намалява опасността от грешки и затова в някои трудни случаи се препоръчва използването и, като задължително се упоменава, че заместващата схема е съгласно втората електромеханична аналогия.

## 6.2. ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНА АНАЛОГИЯ

Основната величина в акустиката е звуковото налягане, което, както знаем, представлява силата, действаща на единица повърхност, т.е.:

$$p = \frac{F}{S} \quad (6.19)$$

По тази причина е неудобно директното използване на електромеханичната аналогия в акустика, а се използва електроакустичната аналогия, при която звуковото налягане съответства на електрическото напрежение, а звуковия поток  $q = v.S$  съответствува на електрическият ток. След като и в двете основни величини участва площта, се налага въвеждането на така наречените акустична маса, акустично активно съпротивление и акустична гъвкавост, в които също участва площта. Акустичната маса представлява

$$m_a = \frac{m}{S^2} \quad (6.20)$$

и съответства на индуктивността.

Акустичната гъвкавост е:

$$c_a = c.S^2 \quad (6.21)$$

и съответствува на електрическия капацитет.

Активното акустично съпротивление е:

$$r_a = \frac{r}{S^2} \quad (6.22)$$

Във всички тези изрази  $S$  е площта на акустичния елемент, или площта на механичния елемент, с който е съединен във възел акустичния елемент.

Нека разгледаме какво представлява акустичните елементи.

**-Елемент акустична маса** - представлява къса тръба с дължина, малка в сравнение с дължината на звука. Тогава можем да пренебрегнем свиваемостта на въздуха и масата на въздуха в тръбата е:

$$m = \rho l S \quad (6.23)$$

където  $\rho$  - плътност на газа в тръбата, като за въздух  $\rho = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>  
 $l$  - дължина на тръбата  
 или акустичната маса е:

$$m_a = \frac{\rho l S}{S^2} = \frac{\rho l}{S} \quad (6.24)$$

**-Елемент акустична гъвкавост** - представлява затворен обем с размери малки в сравнение с дължината на вълната на звука, който има отвор, в който се движи безтегловно бутало. Акустичната гъвкавост на този елемент е:

$$c_a = \frac{V}{\gamma p_0} = \frac{V}{\rho c_0^2 S^2} \quad (6.25)$$

където  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  - адиабатен показател, който за въздух е 1,42.  $10^{-5}$  Pa.

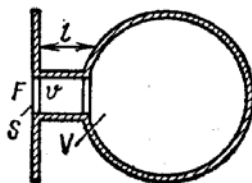
$p_0$  - статично налягане,  $V$  - обем

**-Елемент активно акустично съпротивление** - представлява дълга и тънка тръбичка. Когато сечението на тръбичката е  $S$ , активното акустично съпротивление е:

$$r_a = \frac{\rho c_0}{S} \quad (6.26)$$

тук  $c_0$  е скоростта на звука.

При разглеждане на системи, състоящи се от акустични и механични елементи всяка част от системата се разглежда със собствената си аналогия, като прехода между тях е трансформатор с преводно отношение  $1/S$  от акустичната към механичната страна, или механичните елементи се привеждат към акустични по формулите:



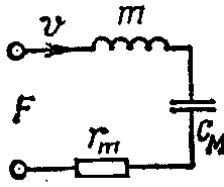
Фиг.6.3

$$z_a = \frac{Z_m}{S^2}; \quad p = \frac{F}{S}; \quad q = v.S \quad (6.27)$$

**Примери за акустични системи:**

**1. Резонатор на Хелмхолц**

Резонаторът на Хелмхолц представлява кухина с малко по сечение гърло (фиг.6.3.). Гърлото на резонатора представлява акустична маса,



Фиг.6.4

която се определя по формула 6.24, а кухината има акустична гъвкавост, която може да се определи съгласно формула 6.25, а триенето на въздуха в стените на гърлото създава активно акустично съпротивление.

Еквивалентната електрическа схема на резонатора на Хелмхолц е сериен трептящ кръг (фиг.6.4) , чиято резонансна честота се намира по формулата на Томсън (6.14). Като заместим формули 6.24 и 6.25 във формула

6.14 за резонансната честота ще получим:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{\rho \cdot l \cdot v}{\gamma \cdot p_0 \cdot S}}} \quad (6.28)$$

Акустичният импеданс е:

$$z_a = \sqrt{r_a^2 + \left( \omega m_a - \frac{1}{\omega c_a} \right)^2} \quad (6.29)$$

Интересно от практическа гледна точка е свойството на резонатора да усилва звука, което се характеризира с коефициента на усилване:

$$k = \frac{P_{\text{внтр.}}}{P_{\text{внр.}}} \quad (6.30)$$

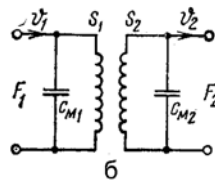
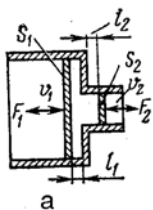
Където  $P_{\text{внтр.}}$  е звуковото налягане в резонатора, а  $P_{\text{внр.}}$  е звуковото налягане извън него. Изразът за  $k$  е:

$$k = \frac{1}{\sqrt{\left( \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2} \right)^2 + \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2}} \quad (6.31)$$

Тук  $\delta = \frac{r_a}{2m_a}$  е показател на затихването.

Максимален коефициент на усилване имаме при  $\omega = \omega_0$  и той е:

$$k_{\text{max}} = \frac{\omega_0}{2\delta} \quad (6.32)$$



Фиг.6.5

Тъй като  $\delta \ll \omega_0$ , то  $k_{\text{макс.}}$  Е с голяма стойност, при което се отнема значително количество енергия от звуковите вълни, падащи върху резонатора. Това му свойство се използва за създаването на резонансни звукопоглазители.

## 2. Акустичен трансформатор

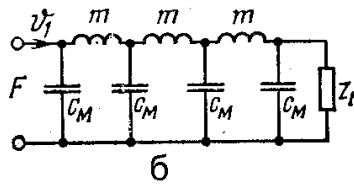
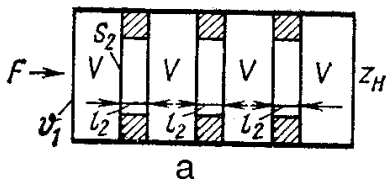
Акустичният трансформатор представлява тръба с рязко променящо се сечение (фиг. 6.5-а), а неговата еквивалентна схема е показана на фиг. 6.5-б.

Преводното отношение на акустичния трансформатор е:

$$n = \frac{S_2}{S_1} \quad (6.33)$$

## 3. Акустични филтри.

-Нискочестотен акустичен филтър

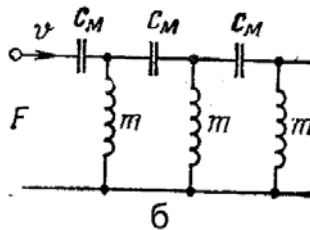
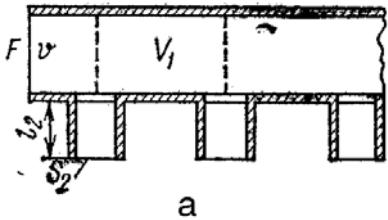


Фиг.6.6

Нискочестотният филтър представлява поредица от обемни, свързани с по-тесни тръбички. Видът му е показан на

фиг. 6.6-а, еквивалентната електрическа схема - на фиг. 6.6-б. Граничната

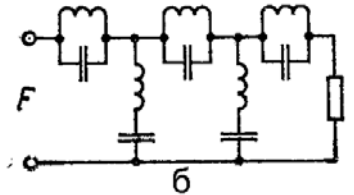
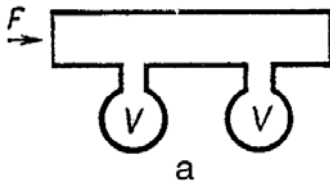
му честота е:  $\omega_{гр.} = 2c \sqrt{\frac{S_2}{l_2 V_1}} = 2\omega_0$  (6.34)



Фиг.6.7

-  
**Високочестотен акустичен филтър**

Високочестотният акустичен филтър представлява тръба с отклоняващи се от нея по-тесни тръбички. Видът му е показан на фиг. 6.7-а, еквивалентната електрическа схема - на фиг. 6.7-б.



Фиг.6.8

Граничната му честота е:

$$\omega_{гр.} = 0,5c \sqrt{\frac{S_2}{V_1 l_2}} = 0,5\omega_0 \quad (6.35)$$



-Лентов акустичен филтър - видът му е показан на фиг.6.8-а, а еквивалентната електрическа схема - на фиг.6.8-б.

## 7.ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

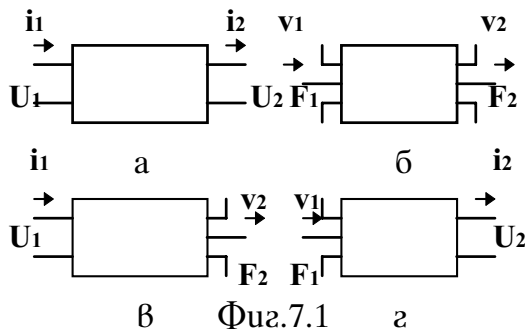
### 7.1.ОБЩИ СВЕДЕНИЯ ЗА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИТЕ ЧЕТИРИПОЛЮСНИЦИ.

В звукотехническите устройства и системи на входа и изхода имаме звук, който, както знаем, представлява механични колебания на средата, а вътре в самите устройства и системи предаването на информацията, както и нейното записване и възпроизвеждане става с помощта на електрически сигнали. За да може механичната енергия на звука на входа да се превърне в енергия на електрическите колебания и електрическата енергия на колебанията на изхода на усилвателя на мощност да се превърне в механична енергия на звуковите колебания са нужни преобразуватели на механичната енергия в електрическа и такива на електрическата енергия в механична. Тези преобразуватели общо се наричат електромеханични преобразуватели. Почти всички такива преобразуватели са обратими - т.е. те могат да изпълняват и двете функции на преобразуване - и от електрическа в механична и от механична в електрическа енергия.

Когато един преобразувател работи в режим на преобразуване на електрическата енергия в механична, той се нарича преобразувател-двигател, понеже в резултат на работата му, на неговия изход определена негова част се привежда в движение. Такива преобразуватели са високоговорителите, озвучителните тела, слушалките и др.

Когато един преобразувател работи в режим на преобразуване на механичната енергия в електрическа, той се нарича преобразувател-генератор, понеже в резултат на работата му, на неговия изход се генерира електрическо напрежение, под действието на което в товара протича електрически ток. Такива преобразуватели са микрофоните, звукоотнемателите на грамофоните и др.

Нека разгледаме в най-общ вид електрическата и механична системи като четириполусници. Електрическият четириполусник се характеризира с действието на някакво входно напрежение, под действието на което протича входен ток и в зависимост от тях се поражда изходно напрежение и протича изходен ток. От своя страна, механичният четириполусник се характеризира с въздействието на входна сила, която въздейства на



входния елемент и го привежда в движение с определена скорост и под въздействието на входните величини изходния елемент изпитва сила и се задвижва с определена скорост. При това разглеждане се приема, че входния и изходния елемент нямат собствена маса и са абсолютно недеформируеми. Електрически и механични четириполусници са показани съответно на фиг.7.1-а и 7.1-б. Ако сега мислено срежем двата четириполусника вертикално по

средата и съединим лявата част на електрическия с дясната част на механичния ще получим електромеханичен четириполусник който има електрически вход и механичен изход - т.е. отговаря на преобразувател-двигател (фиг.7.1-в). Ако съединим лявата част на механичния

четириполюсник от фиг.7.1-б с дясната част на електрическия такъв от фиг.7.1-а ще получим електромеханичен (или по-точно механо-електрически) четириполюсник с механичен вход и електрически изход отговарящ на преобразувател-генератор.

Общата енергия която притежава един електромеханичен преобразувател е сума от електрическата и механични енергии:

$$W_{\text{общо}} = W_{\text{ел.}} + W_{\text{мех.}} \quad (7.1)$$

Общо изискване за електромеханичните преобразуватели, които се използват в електроакустиката е да не внасят изкривявания в преобразуваните колебания, т.е. те трябва да бъдат линейни преобразуватели. Това означава че връзката между електрическите и механични величини се описва с помощта на линейни уравнения. Съгласно теорията на четириполюсниците, системата линейни уравнения, описваща един електромеханичен четириполюсник има вида:

$$\begin{cases} U = ZI + k_1 v \\ F = k_2 I + z v \end{cases} \quad (7.2)$$

Коефициентите пред напреженията, тока, силата и скоростта могат да бъдат определени по следния начин:

Нека най-напред разгледаме електромеханичния обратим преобразувател в двигателен режим. Ако застопорим изходния механичен елемент, неговата скорост става равна на нула. Замествайки тази стойност в първото уравнение на системата уравнения ще получим:

$$Z = \left( \frac{U}{I} \right)_{v=0} \quad (7.3)$$

т.е. това е входния електрически импеданс на преобразувателя в двигателен режим при застопорена механична трептяща система. При това, за да бъде преобразуването линейно,  $Z$  не трябва да зависи от амплитудата на сигнала.

Ако сега прекъснем електрическата верига на преобразувателя, работещ в режим на генератор, токът в електрическата страна става равен на нула. Замествайки тази стойност във второто уравнение от системата ще получим:

$$z = \left( \frac{F}{v} \right)_{I=0} \quad (7.4)$$

Това представлява механичния импеданс на трептящата система на електромеханичния преобразувател в генераторен режим при прекъснатата електрическа верига (или когато е натоварен с безкрайно голямо електрическо съпротивление).

Коефициентите  $k_1$  и  $k_2$  изразяват връзката между разнородни физични величини. Така например  $k_1 v$  трябва да има размерност на напрежение, а  $k_2 I$  - на сила. Поради този си двойствен характер  $k_1$  и  $k_2$  се наричат коефициенти на електромеханична връзка. Те са равни на:

$$k_1 = \left( \frac{U}{v} \right)_{I=0} ; \quad k_2 = \left( \frac{F}{I} \right)_{v=0} \quad (7.5)$$

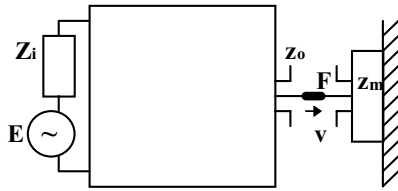
Дименсията им е една и съща. Може да се докаже че  $k_1 = -k_2 = k$ .

От горните изрази се вижда че  $k$  не зависи от електрическите и механичните импеданси на преобразувателя.

Коефициентът на електромеханична връзка за даден електромеханичен преобразувател може да бъде определен по горните формули, като за преобразувател-генератор трябва да се определи изходното напрежение върху безкрайно голямо входно съпротивление на измервателния уред при определена скорост на движение на трептящата система, а за преобразувател-двигател трябва да бъде определена силата, която въздейства върху затворена трептяща система при определен входен ток.

## 7.2.МЕХАНИЧНА И ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕКВИВАЛЕНТНИ ЗАМЕСТВАЩИ СХЕМИ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ-ДВИГАТЕЛ

### 7.2.1. Механична заместваща схема



Фиг.7.2

$z_T$  - механичен импеданс на товара.

Тогавата системата уравнения, описваща работата на електромеханичния преобразувател има вида:

Нека разгледаме електромеханичния преобразувател с присъединени входна и изходни вериги (Фиг.7.2). Общия механичен импеданс на изхода е:

$$z = z_0 + z_T \quad (7.6)$$

Тук:  $Z_0$  - механичен импеданс на трептящата система;

$$\begin{cases} U = ZI + kv \\ F = -kI + (z_0 + z_T)v \end{cases} \quad (7.7)$$

За входа можем да запишем:

$$U = E - Z_i I \quad (7.8)$$

Заместваме в първото уравнение и получаваме:

$$E - Z_i I = ZI + kv \quad (7.9) \quad \text{или}$$

$$I = \frac{E - kv}{Z + Z_i} \quad (7.10)$$

Външната сила  $F=0$ , понеже при преобразувателя-двигател силата се поражда в резултат от действието на преобразувателя.

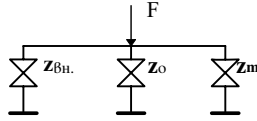
Заместваме стойностите на тока и силата във второто уравнение и получаваме:

$$0 = -k \frac{E}{Z_i + Z} + \left( \frac{k^2}{Z_i + Z} + z_0 + z_T \right) v \quad (7.11)$$

или

$$k \frac{E}{Z_i + Z} = \left( \frac{k^2}{Z_i + Z} + z_0 + z_T \right) v \quad (7.12)$$

Изразът от ляво има характер на механична сила. Това е силата получаваща се в резултат на електромеханичното преобразуване:

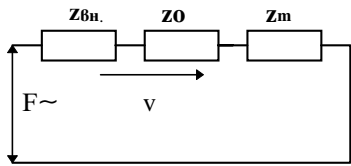


Фиг.7.3

$$F_{\text{емп}} = k \frac{E}{Z_i + Z} \quad (7.13)$$

Събираемите в скобите имат характер на механичен импеданс. От тях  $Z_0$  и  $Z_T$  са ни известни, а третото събираемо представлява внесеното механично съпротивление от електрическата страна на преобразувателя в механичната:

$$z_{\text{вн.}} = \frac{k^2}{Z_i + Z} \quad (7.14)$$



Фиг.7.4

От израза се вижда, че елементите и на трите механични импеданса се движат с една и съща скорост  $\Omega$ . Следователно те са свързани във възел (фиг. 7.3). Ако използваме електро-механичната аналогия сила-напрежение и скорост-ток, ще получим електрическия еквивалент на схемата, показан на фиг. 7.4. За удобство е запазен механичният характер на величините, така, че

при решаване на схемата по методите и при използване на законите на електротехниката, се получават направо зависимостите между механичните величини.

### 7.2.2. Електрическа еквивалентна заместваща схема

За да определим елементите на еквивалентната електрическа заместваща схема, от второто уравнение на системата определяме скоростта:

$$v = \frac{kI}{z_0 + z_T} \quad (7.14)$$

Заместваме в първото уравнение и получаваме израза:

$$E - Z_i I = Z I + \frac{k^2}{z_0 + z_T} I \quad (7.15)$$

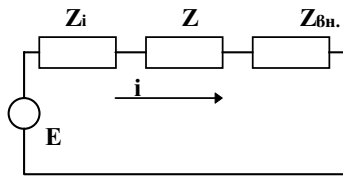
или

$$E = \left( Z_i + Z + \frac{k^2}{z_0 + z_T} \right) I \quad (7.16)$$

Първите две събираеми в скобите са ни известни, а третото също има характер на електрически импеданс и представлява внесеното съпротивление от механичната страна в електрическата:

$$Z_{\%} = \frac{k^2}{z_0 + z_T} \quad (7.17)$$

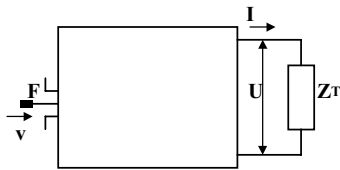
Понеже съгласно уравнението през трите импеданса протича общ ток то следователно те са свързани последователно и електрическата заместваща схема има вида, показан на фиг.7.5.



Фиг.7.5

Трябва да се прави разлика между електрическата заместваща схема на електромеханичния преобразувател и електрическият еквивалент на механичната му система. Първата се отнася до входа на преобразувателя, като влиянието на изхода се отнася до  $Z_{bn}$ , докато втората е заместваща схема на изхода на електромеханичния преобразувател, като влиянието на входа се изразява в създаването на силата  $F_{смп}$  и формирането на внесения механичен импеданс  $Z_{bn}$ . Затова схемата на фиг.7.4 се използва при разглеждане на изхода и свързаните с него изходни величини на електромеханичния преобразувател, а схемата от фиг.7.5 - при разглеждане на входните величини.

### 7.3. Механична и електрическа заместващи схеми на електромеханичен преобразувател - генератор



Фиг.7.6

Нека разгледаме електромеханичния четириполусник с механичен вход и електрически изход, към който е свързан товарния импеданс (фиг.7.6). Съгласно закона на Ом:

$$U = Z_r I \quad (7.18)$$

Понеже няма приложено външно напрежение (то се генерира в резултат на работата на преобразувателя), уравненията добиват вида:

$$\begin{aligned} 0 &= (Z + Z_r)I + kv \\ F &= -kI + zv \end{aligned} \quad (7.19)$$

#### 7.3.1. Механична еквивалентна заместваща схема

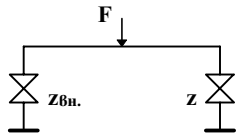
След преобразуване от първото уравнение получаваме:

$$I = -\frac{kv}{Z + Z_r} \quad (7.20)$$

След заместване във второто уравнение получаваме:

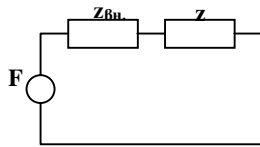
$$F = \left( \frac{k^2}{Z + Z_r} + z \right) v \quad (7.21)$$

Двете събираеми в скобите имат характер на механичен импеданс. От тях  $z$  е известно, а второто събираемо е внесено съпротивление от електрическата страна в механичната:



Фиг.7.7

заместваща схема те са свързани във възел (фиг.7.7), а съответните



Фиг.7.8

$$z_{\text{вн.}} = \frac{k^2}{Z + Z_T} \quad (7.22)$$

Понеже скоростта в елементите на двата механични импеданса е еднаква, в механичната елементи в електрическия еквивалент на механичната заместваща схема съгласно аналогията сила-напрежение и скорост-ток са свързани последователно (фиг.7.8).

### 7.3.2. Електрическа заместваща схема

За да определим елементите на тази схема от второто уравнение определяме скоростта:

$$v = \frac{F + kI}{z} \quad (7.23)$$

Заместваме в първото уравнение и получаваме:

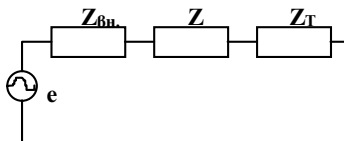
$$\frac{jF}{z} + \left( \frac{k^2}{z} + Z + Z_T \right) I = 0 \quad (7.24)$$

Първото събираемо има характер на електрическо напрежение и представлява електродвижещото напрежение, възникващо в следствие на функционирането на електромеханичния преобразувател-генератор:

$$e = \frac{kF}{z} \quad (7.25)$$

Трите събираеми в скобите представляват електрически импеданси, като двата от тях са известни, а първият отразява влиянието на механичния вход върху електрическия изход и се нарича внесен електрически импеданс:

$$Z_{\text{вн.}} = \frac{k^2}{z} \quad (7.26)$$



Фиг.7.9

която се отнася за входа на преобразувателя.

Трите електрически импеданса са свързани последователно, понеже през тях протича общ ток  $I$ . Съответната конфигурация на електрическата заместваща схема е показана на фиг.7.9. Тя се отнася за изхода на електромеханичния преобразувател и трябва да се различава от електрическия еквивалент на механичната заместваща схема

#### 7.4.ВИДОВЕ ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В ЗАВИСИМОСТ ОТ ПРИНЦИПА НА ДЕЙСТВИЕ

Преобразуването на електрическата енергия в механична и обратно може да стане на базата на два основни принципа:

-Взаимодействие на постоянно магнитно поле с магнитното поле, създавано от протичащ през проводник електрически ток, в резултат на което възниква сила, пропорционална на тока (преобразувател-двигател), или пресичането на магнитните силови линии от движещ се проводник (преобразувател-генератор). Към този принцип спада и взаимодействието на електрически проводник, с променливо магнитно поле, възникващо в следствие на промяната на магнитното съпротивление в магнитната верига на постоянен магнит. Електромеханичните преобразуватели, използващи този принцип на преобразуване се наричат преобразуватели от индуктивен тип.

-Взаимодействие на електрически заредени тела, при което в следствие на промяната на разстоянието между тях се изменя капацитетът и от там - електрическото напрежение (преобразувател-генератор), или възниква сила пропорционална на заряда. Електромеханичните преобразуватели използващи този принцип се наричат преобразуватели от капацитивен тип.

##### 7.4.1. Електромеханични преобразуватели от индуктивен тип

Електромеханичните преобразуватели от индуктивен тип биват електродинамични и електромагнитни.

##### 7.4.1.1.Електродинамични преобразуватели

Принципът на действие на електродинамичния преобразувател се заключава в движението на проводник в постоянно магнитно поле. В случая на преобразувател -двигател през проводника протича ток под въздействието на входното напрежение. При протичането на тока се поражда магнитно поле, взаимодействащо с постоянното магнитно поле и от това взаимодействие се поражда електродинамичната сила:

$$F = B.l.i \quad (7.27)$$

Тук  $B$  е напрегнатостта на постоянното магнитно поле,  $l$  е дължината на проводника, обхванат от магнитните силови линии, а  $i$  е силата на тока, протичащ през проводника.

Посоката на тази сила се определя по правилото на лявата ръка, което гласи: При разтворена ръка, ако магнитните силови линии прободат дланта (да напомним, че се приема, че силовите линии са насочени от северния към южния полюси), пръстите сочат посоката на тока, и тогава палеца сочи посоката на силата  $F$ .

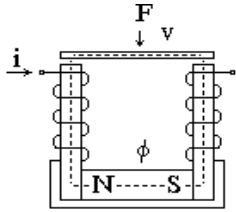
Когато преобразувателят работи в генераторен режим проводника се движи в магнитното поле под действието на външна сила и при това движение в него се индуктира електродвижещо напрежение:

$$e = B.l.v \quad (7.28)$$

Тук  $V$  е компонентата на скоростта на движение на проводника, която е перпендикулярна на силовите линии на магнитното поле.

Произведението  $B_l = k$ , присъстващо и в двата израза, представлява коефициентът на електромеханична връзка при електродинамичните преобразуватели.

#### 7.4.1.2. Електромагнитни преобразуватели



Фиг.7.10

Принципът на действие на този вид преобразуватели се основава на разполагането на мембрана от магнитно мек феромагнитен материал в полето на постоянен магнит (фиг.7.10). При работа на преобразувателя в генераторен режим разстоянието между мембраната и полюсните наставки се изменя под действието на външна сила  $F$ , която движи мембраната със скорост  $v$ . Това довежда до изменение на големината на магнитния поток, протичащ през сърцевината на бобините поради изменението на магнитното съпротивление на въздушната междина. В

следствие на промяната на магнитния поток  $\Phi$  в бобините се индуцира електродвижещо напрежение:

$$e = \frac{B_0 L_\delta v}{n} \quad (7.29)$$

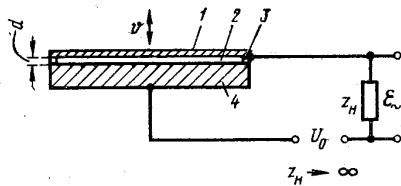
Тук  $n$  е броя на навивките на бобината,  $B_0$  е индукция в магнитната верига при отсъствие на колебания на мембраната и  $L_\delta$  е индуктивност на бобината.

Когато преобразувателят работи в двигателен режим, под действието на външното напрежение  $U$  през бобината протича ток  $i$ , пораждащ в бобината магнитна индукция  $B$ . Последната, за да бъде преобразувателя линеен, трябва да отговаря на условието  $B \ll B_0$ .

При това върху мембраната ще действа променлива сила:

$$F = \frac{B_0 L_\delta i}{n} \quad (7.30)$$

Произведението  $\frac{B_0 L_\delta}{n} = k$  присъства и в двата израза и представлява коефициентът на електромеханична връзка при електромагнитните преобразуватели.



- 1-мембрана
- 2-въздушна междина
- 3-изолация
- 4-неподвижен електрод

Фиг.7.11

#### 7.4.2. Преобразуватели от кондензаторен тип

##### 7.4.2.1. Кондензаторни преобразуватели

Този вид преобразуватели (фиг.7.11) представляват зареден кондензатор, на когото едната плоча е подвижна. При работа в генераторен режим кондензатора се зарежда до напрежение  $U_0$  (при неподвижни електроди), при което се установява електрически заряд:



$$q_0 = C_0 \cdot U_0 \quad (7.31)$$

При това положение ако подвижния електрод започне да се движи със скорост  $v$ , разстоянието между електродите се изменя и капацитетът се изменя спрямо електрическия капацитет  $C_0$ . Ако между плочите няма възможност да протече електрически ток, за да се запази заряда, се изменя напрежението върху електродите, при което се създава електродвижеща сила:

$$e = \frac{U_0 v}{j\omega d} \quad (7.32)$$

Тук  $d$  е разстоянието между електродите при отсъствие на движение, а  $\omega$  е кръговата честота.

Ако на заредения кондензатор подадем променливо напрежение (двигателен режим), през него протича ток  $i$  и в резултат възниква сила  $F$ :

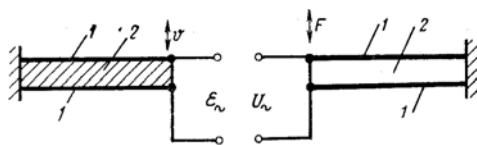
$$F = \frac{U_0 i}{j\omega d} \quad (7.33)$$

Следователно, коефициентът на електромеханична връзка при кондензаторните преобразуватели е:

$$k = \frac{U_0}{\omega d} \quad (7.34)$$

#### 7.4.2.2. Пиезоелектрически преобразуватели

Пиезоелектрическите преобразуватели (фиг.7.12) се основават на правия и обратния пиезоелектрически ефекти, открити от братята Пиер и Жюлио Кюри.



Фиг.7.12

Наречени са така от гръцката дума "пиезо", която значи "натискам". Правият пиезоелектрически ефект представлява появата на електрическо напрежение върху повърхността на някои вещества, наречени пиезоелектрици, при оказване на натиск в определена посока върху

тях. Обратният пиезоелектрически ефект пък представлява появата на механично напрежение и свързана с него деформация при електрическа поляризация на пиезоелектрика, когато големината на механичното напрежение е пропорционална на поляризиращото електрическо напрежение и изменя знака си заедно с него. Не трябва да се смесва пиезоелектрическият ефект с сегнетоелектрическият, при който механичното напрежение не изменя знака си заедно със смяната на знака на поляризиращото напрежение.

Механизмът на пиезоелектрическия ефект се обяснява с преместването на елементарните електрически заряди в кристалната решетка на пиезоелектрика, при което правият пиезоелектрически ефект става под действието на приложената външна сила и води до нарушаването на взаимната компенсация на тези елементарни електрически заряди и от там - появата на електрическо напрежение. При обратния пиезоелектрически ефект елементарните заряди и свързаните с тях носители - елементарни частици се преместват под действието на електрическото поле, предизвиквайки механично напрежение и от там - деформация на кристала.

Ако деформираме пиезоелектрика, при което едната му страна започва да се движи със скорост  $v$ , то на съответните електроди се появява електродвижеща сила:

$$e = \frac{d_{mj} l^2 v}{j \omega h^2} \quad (7.35)$$

където  $d_{mj}$  представлява съответния пиезомодул,  $l$  - дължината на пластината и  $h$  - дебелина на пластината.

Тъй като пиезоелектриците са анизотропни т.е. свойствата им зависят от посоката спрямо кристалографските оси или посоката на предварителната поляризация, пиезомодула зависи от посоката и това се дефинира от индексите  $m$  и  $j$ .

Ако на пиезопластина се подаде променливо напрежение  $U_n$ , под чието действие протича ток  $i$  то пластината ще изпитва сила:

$$F = \frac{d_{mj} l^2}{\omega h^2} \quad (7.36)$$

Следователно коефициентът на електромеханична връзка при пиезопреобразувателите е:

$$k_{mj} = \frac{d_{mj} l^2}{\omega h^2}; \quad (7.37)$$

$$d_{mj} \frac{l^2}{h^2} = D - \text{пиезоелектрична константа.}$$

Както и пиезомодула,  $k$  също зависи от вида на колебанието и посоката на въздействие. По важните коефициенти на електромеханична връзка са:

$k_{33}$  - коефициент на електромеханична връзка за надлъжни колебания;

$k_{31}$  - коефициент на електромеханична връзка за напречни колебания;

$k_p$  - коефициент на електромеханична връзка за радиални колебания;

$k_{13}$  - коефициент на електромеханична връзка при усилие приплъзване.

От друга страна:

$$k_{mj} = \frac{d_{mj}}{\sqrt{\epsilon_{\min}^{\sigma} \epsilon_0 S_{ij}^E}} \quad (7.38)$$

$\epsilon_0$  - диелектрична проницаемост на вакуума;

$\epsilon_{\min}^{\sigma}$  - относителна диелектрична проницаемост;

$S_{ij}^E$  - константа на еластичност.

## 8. МИКРОФОНИ

### 8.1. Определение. Общи изисквания.

Микрофоните служат за линейно преобразуване на акустичната енергия на звуковите колебания в електрически. Следователно, те имат акустически вход и електрически изход. Превръщането на механичните колебания в електрически бе разгледано в гл.7, а превръщането на акустичните трептения в механични-променлива сила при микрофоните се извършва от звеното акустико-механичен преобразувател, който почти

винаги представлява мембрана. Големината на тази сила зависи от площта на мембраната и разликата в звуковите налягания пред и зад мембраната:

$$F = (P_{\text{пр}} - P_{\text{зад}}) S \quad (8.1)$$

където  $P_{\text{пр}}$  е звуковото налягане пред мембраната,  $P_{\text{зад}}$  е звуковото налягане зад мембраната, а  $S$  е площта на мембраната.

Основно изискване към микрофоните е линейното преобразуване т.е. да има пълно съответствие между формата на входната величина (звуково налягане) и изходната (напрежение). При звуково налягане в границите на динамичния диапазон на човешкото ухо това изискване по принцип е изпълнимо. За високите нива на звуковото налягане нарастват нелинейните изкривявания и за такива условия се конструират специални микрофони.

## 8.2. ОСНОВНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРИ НА МИКРОФОНИТЕ

- **Изходен (вътрешен) импеданс на микрофона.** Изходният импеданс на микрофона представлява стойността на импеданса, измерена на електрическия изход на микрофона. При това, измервания микрофон трябва да бъде разположен в среда без отражения. По определение, импедансът представлява отношение на съответното напрежение - в случая напрежението върху клемите на микрофона, към тока, протичащ във веригата и се характеризира с определен модул и фазов ъгъл между тока и напрежението. Съгласно БДС модулът на изходния импеданс при честота 1000Hz се нарича модул на номиналния изходен импеданс.

Ако разглеждаме електрическата еквивалентна заместваща схема на микрофона, ще видим че тя се състои от последователно свързаните входен електрически импеданс на преобразувателя в двигателен режим при застопорена механична трептяща система и внесения импеданс от механичната страна в електрическата:

$$Z_{\text{вн.}} = \frac{k^2}{Z} \quad (8.2)$$

В зависимост от типа на преобразувателя  $Z$  представлява или последователно свързани индуктивност и активно съпротивление (при преобразуватели от индуктивен тип) или паралелно свързани капацитет и активно съпротивление (при преобразуватели от капацитивен тип). Еквивалентната заместваща схема на трептящата система е трептящ кръг, съставен от паралелно съединените маса на трептящата система, гъвкавост на окачването и активно съпротивление на загубите. На тази конфигурация съгласно първа електромеханична аналогия съответства сериен трептящ кръг. Освен това, при по-сложните микрофони влияние оказва акустичната система на втория вход чиято заместваща електрическа схема е електрически филтър. В следствие на това  $Z_{\text{вн}}$  също има характер на трептящ кръг или евентуално на електрически филтър. Това обуславя честотна зависимост на изходния импеданс. Зависимостта на модула на изходния импеданс от честотата се нарича *импедансна характеристика на микрофона*.

- **Чувствителност на микрофона.** Чувствителността е мярка за ефективността на преобразуване на механичната енергия в електрическа и представлява отношението на изходната величина (генерираното напрежение) към входната (звуковото налягане предизвикало появата на това напрежение):

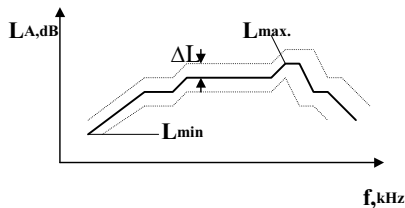
$$A = \frac{e}{p} \left[ \frac{V}{Pa} \right] \quad (8.3)$$

Микрофонът никога не работи на празен ход, а върху някакъв електрически товар, свързан към изхода му. Обикновено електрическото съпротивление на товара е поне три пъти по-голямо от входното съпротивление на микрофона за честота 1000Hz и това е номиналният товар на микрофона. Чувствителността под товар е:

$$A_T = \frac{U_T}{P} \quad (8.4)$$

Нивото на чувствителността представлява изразеното в децибели отношение на определената чувствителност към чувствителността  $A_p = 1V/Pa$  която е приета за реперна:

$$L_A = 20 \lg \frac{A}{A_p} [dB] \quad (8.5)$$



Фиг.8.2

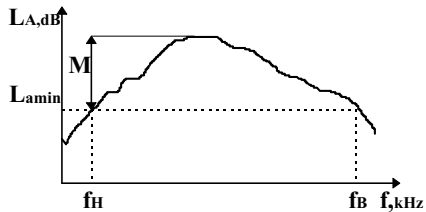
Номинална се нарича обявената от производителя най-вероятна чувствителност за дадена честота или честотен обхват. Обикновено  $A_{ном.}$  се дефинира за честота 1000Hz или за октавата с централна честота 1000Hz.

Характеристичната чувствителност  $A_x$  е средноквадратичната стойност на чувствителностите за определени честоти от полезния честотен обхват на микрофона:

$$A_x = \frac{\sqrt{A_{f_1}^2 + A_{f_2}^2 + \dots + A_{f_n}^2}}{n} \quad (8.6)$$

Тук  $n$  е броя на честотите. Обикновено  $A_{f_i}$  са честоти от стандартната честотна поредица.

- **Честотна характеристика.** Честотната характеристика на микрофона представлява зависимостта на чувствителността му от честотата.



Фиг.8.1

Обикновено се използва честотната зависимост на нивото на чувствителността (фиг.8.1). Както се вижда от фигурата, микрофонът има различна чувствителност за различните честоти, като тя силно спада за най-ниските и най-високите честоти. Разликата между най-ниската и най-високата стойност на нивото на чувствителността за даден честотен обхват се нарича **неравномерност** на честотната характеристика:

$$M = L_{A_{max}} - L_{A_{min}} [dB] \quad (8.7)$$

Граничните честоти за които е определена дадената неравномерност се наричат долна и горна гранични честоти на дадения честотен диапазон.

Ако  $M=10\div 16\text{dB}$ , честотният обхват между  $f_D$  и  $f_T$  се нарича полезен или ефективен честотен обхват на микрофона.

- **Типова честотна характеристика** на даден тип микрофон се нарича честотната характеристика, характерна за дадения тип микрофон. Тя се получава при усредняване на голям брой индивидуални честотни характеристики на микрофони от дадения тип. Задава се в техническата документация на микрофона обикновено с начупена линия (плътната линия от фиг.8.2) като около нея се задава допусково поле (пунктираната линия от фиг.8.2), което гарантира повторемостта на хода на честотната характеристика на отделните образци в рамките на допустимата неравномерност.

- **Характеристика на насоченост.** Така се нарича зависимостта на чувствителността на микрофона от ъгъла, сключен между акустичната му ос и посоката към звуковия източник, при постоянна честота на звуковото налягане. Често се използва нормираната характеристика на насоченост, представляваща отношението на чувствителността под даден ъгъл към тази по акустичната ос:

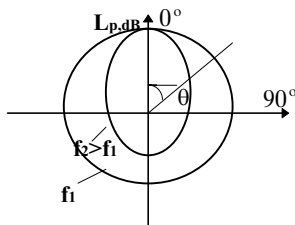
$$G_0(\theta) = \frac{A(\theta)}{A_0} \quad (8.8)$$

В практиката обикновено се използва нивото на нормираната характеристика на насоченост:

$$L_{G_0(\theta)} = L_{A_0} - L_{A_0} = 20 \lg \frac{A(\theta)}{A_0}, \text{dB} \quad (8.9)$$

Графиката на характеристиката на насоченост, изобразена в полярна координатна система се нарича *диаграма на насоченост* (фиг.8.3).

**Отношението фронт/тил**  $\theta_0/180^\circ$  представлява отношението на осевата чувствителност  $A_0$  на даден насочен микрофон към чувствителността му  $A_{180}$  при ъгъл  $180^\circ$  за дадена честота:



Фиг.8.3

$$Q_{0/180} = \frac{A_0}{A_{180}} \quad (8.10)$$

Разликата фронт/тил е разликата между нивата на осевата чувствителност и тази при ъгъл  $180^\circ$  за дадена честота:

$$L_{Q_{0/180}} = L_{A_0} - L_{A_{180}} \quad (8.11)$$

На практика разликата фронт/тил се определя за даден честотен диапазон и тогава  $L_{A_0}$  и  $L_{A_{180}}$  са нивата на средните чувствителности по оста и на  $180^\circ$  за този честотен обхват.

За практиката представлява интерес **индексът фронт/тил**, който се определя като разликата между нивата на електрическите мощности  $L_\Phi$  и  $L_T$  отдавани върху товара при самостоятелно въздействие на дифузно звуково поле от предната (фронтална) и задната (тилна) полусфера при равни звукови налягания. Индексът фронт/тил показва степента на подтискане на шума (например от публиката) в сравнение с полезния сигнал (например от певеца).

Ако поставим един микрофон извън звуково поле, на клемите му, въпреки това, ще има някакво електродвижещо напрежение  $E_{ш}$ , дължащо се на флуктоациите на атмосферното налягане, на топлинното движение на въздушните частици и на топлинния шум в електрическата част на микрофона. **Еквивалентното звуково налягане на собствения шум** е това звуково налягане, което въздействайки на микрофона по акустичната му ос би предизвикало появата на ЕДН равно на  $E_{ш}$ :

$$P_{ш} = \frac{E_{ш}}{A_0_{ном}} \quad (8.12)$$

Нивото на собствения шум се определя по формулата:

$$L_{ш} = 20 \lg \frac{P_{ш}}{P_0} \quad (8.13)$$

където  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ .

- **Нелинейни изкривявания.** За нормалните звукови сигнали те са пренебрежимо малки поради малката амплитуда на колебание на мембраната. Забележими изкривявания се получават при много високи нива – над прага на болезнено усещане. Обикновено се обявява звуковото налягане при което клирфактора достига 0,5 или 1%. Когато микрофонът е предназначен специално за работа при високи нива (например такива които се закрепват на музикален инструмент), се обявява коефициентът на нелинейни изкривявания при нивото, за което е предназначен да работи микрофона.

- **Вибровъзприемчивост** – така се нарича склонността на микрофона да преобразува в ЕДН вибрациите, на които е подложен корпусът му, например от ръката на изпълнителя или предавани чрез стойката. Това е вреден ефект и трябва да се намалява до минимум. Това става чрез “меко” закрепване на микрофонния капсул към корпуса чрез демпващи пръстени или мембрани.

### 8.3. ПРИЕМНИЦИ НА ЗВУКОВО НАЛЯГАНЕ И ПРИЕМНИЦИ НА ГРАДИЕНТ НА ЗВУКОВО НАЛЯГАНЕ.

Както казахме, преобразуваният звуковото налягане в сила елемент е мембраната, която в един или във друг вид присъства във всички микрофони, независимо от принципа им на действие (изключение правят параметричните микрофони, които за сега не намират приложение във въздушна среда). Тя представлява тънка гъвкава пластина закрепена по периферията си за корпуса на микрофонния капсул. Силата, въздействаща върху мембраната,

123

зависи от нейната площ и от разликата в налягането от двете страни на мембраната:

$$F = \delta(P_{фр.} - P_{зад.})S \quad (8.14)$$

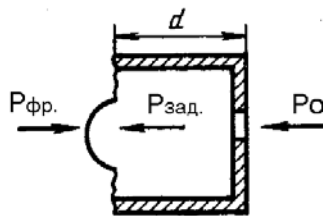
Тук  $P_{фр.}$  е налягане от предната (фронтална) страна на мембраната,  $P_{зад.}$  е налягането от задната (тилна) страна на мембраната, а  $\delta$  е коефициент на дифракция, представляващ отношението на звуковото налягане на повърхността на мембраната  $P$  към звуковото налягане в същата точка на пространството преди внасянето на микрофона.

Коефициентът на дифракция зависи много от формата на микрофона и от честотата.

Звуковото налягане  $P_{\text{фр.}}$  и  $P_{\text{зад.}}$  в общия случай се състои от сумата на статичното налягане  $P_0$  и моментната стойност на звуковото налягане.

В зависимост от това дали звуковото налягане въздейства само от предната страна на мембраната или от двете ѝ страни, различаваме микрофони-приемници на звуковото налягане (когато звуковото налягане въздейства само от предната страна на мембраната) и микрофони-приемници на градиент (разлика) на звуково налягане (когато звуковото налягане въздейства и от двете страни на мембраната). При това се вземат мерки статичното налягане винаги да въздейства и от двете страни на мембраната, като пространството зад мембраната се свързва с околното пространство с помощта на капилярен отвор, имащ голямо съпротивление за звуковото налягане.

### 8.3.1. Приемници на звуково налягане



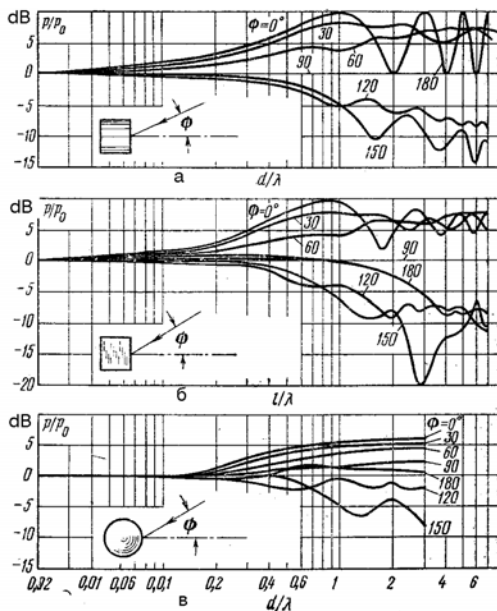
Фиг.8.4

За да може звуковото налягане да въздейства само върху предната страна на мембраната, последната трябва да бъде монтирана на стената на затворен обем, който да спира достъпа на звуковата вълна до задната страна (фиг.8.4). В стената на задния затворен обем е оформен капилярният отвор, за

124

който бе споменато по-горе. При такава конструкция на микрофона, силата, въздействаща върху трептящата система ще бъде:

$$F = \delta(P_{\text{фр.}} - P_{\text{зад.}})S = \delta[P_0 + P_{\text{фр.}} - (P_0 + 0)]S = \delta P_{\text{фр.}} \cdot S \quad (8.15)$$



Фиг.8.5

При ниски честоти,  $\delta=1$  и  $F$  не зависи от формата на микрофона. За високите честоти стойността на  $\delta$  зависи от формата на микрофона и от посоката, от която идва звукът. Тази зависимост е илюстрирана на фиг.8.5 за различни форми на микрофона - цилиндър (фиг.8.5-а), куб (фиг.8.5-б) и сфера (фиг.8.5-в). Това обуславя и същата зависимост на силата от честотата и ъгъла на падане на звуковата вълна, като максималната стойност на  $\delta$  е 2. Тази зависимост и на силата от честотата започва от стойността на последната за която дължината на вълната е сравнима с размерите на микрофона. Допълнително влияние върху характеристиката на насоченост на микрофона оказва и отношението на размера на мембраната към дължината на

вълната, като това влияние се проявява при дължини на вълната по-малки

от удвоения размер на мембраната. Например, микрофон с диаметър 21мм е ненасочен до честота 8kHz. За това микрофоните-приемници на звуково налягане се приемат за ненасочени, което е напълно вярно за ниски честоти, приблизително вярно за средните честоти и невярно за високите честоти.

### 8.3.2. Приемници на градиент на звуково налягане

Ако мембраната на микрофона е монтирана в отвор върху твърда преграда, звуковото налягане въздейства и от двете страни на мембраната. Тогава:

$$F = \delta[(P_0 + P_{\text{фр.}}) - (P_0 + P_{\text{зад.}})]S = \delta(P_{\text{фр.}} - P_{\text{зад.}})S \quad (8.16)$$

Когато въздействието на звуковото налягане от двете страни на мембраната е симетрично, имаме симетричен приемник на градиент на звуково налягане и характеристиката на насоченост на такъв микрофон е подобна на цифрата "8" като зависи от ъгъла на падане на звуковата вълна спрямо оста на микрофона както  $\cos\theta$ . При него разликата между амплитудите на звуковото налягане от двете страни на мембраната за ниски честоти зависи от това, дали микрофона е разположен в непосредствена близост от източника на звук или се намира на разстояние от него, значително по-голямо от размерите на микрофона, докато за високи честоти тя не зависи от това разстояние.

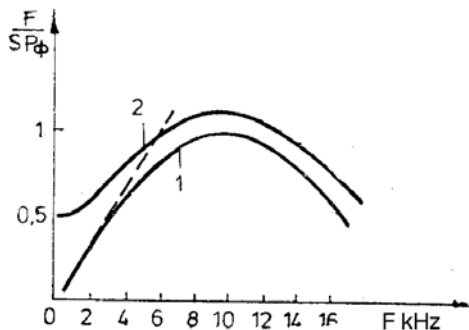
При голямо разстояние между микрофона и източника на звук, където звуковата вълна е приблизително плоска, силата, действаща върху мембраната е:

$$F = 2P_{\text{зв.}} S \sin\left(\frac{\omega}{2c} d \cos\theta\right) \quad (8.17)$$

Тук  $c$  е скоростта на звука,  $d$  е диаметъра на мембраната, а  $\theta$  е ъгъла между работната ос на микрофона и направлението към източника на звук.

За ниски честоти е изпълнено условието:

$$\frac{\omega d}{2c} < \frac{\pi}{2} \quad (8.18)$$



Фиг.8.6

Освен това функцията  $\sin$  е приблизително равна на аргумента и силата, въздействаща върху мембраната е:

$$F = P_{\text{зв.}} S \frac{\omega d}{c} \cos\theta \quad (8.19)$$

126

Когато ъгълът  $\theta=0$  (падане на звуковата вълна по работната ос):

$$F = P_{\text{зв.}} S \frac{\omega d}{c} \quad (8.20)$$



Вижда се, че силата въздействаща върху трептящата система на микрофона-симетричен приемник на градиент на звуково налягане е честотно зависима, като за ниски честоти това е права линия, а при високи честоти честотната характеристика има приблизително синусоидална форма (плътната линия от фиг.8.6). За случая, когато микрофона е разположен близо до източника на звук, където не можем да пренебрегнем кривината на фронта на звуковата вълна, то:

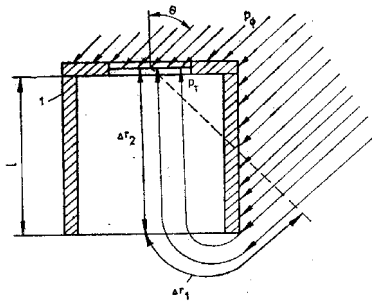
$$F = P_{\text{зв}} S \frac{\omega d}{c} \sqrt{1 + \frac{c^2}{2\omega r^2}} \quad (8.21)$$

(отнася се за звукова вълна по работната ос).

Тук  $r$  е разстояние от източника на звук до равнината на мембраната.

Когато  $r \gg \frac{c}{\omega}$ , то  $F = P_0 S \frac{d}{r}$ , т.е. силата става честотно независима и графиката има вида на прекъснатите линии от фиг.8.6.

Следователно, ако такъв микрофон е предвиден да работи на далечно разстояние от източника и честотната му характеристика е съответно изравнена, при работа с близко разположен източник той ще подчертава ниските честоти т.е. ще "боботи". От друга страна, ако той е предвиден да работи в близката област, то силите върху мембраната, обусловени от звуково налягане на отдалечени източници (обикновено нежелани) и особено тези с ниски честоти ще бъдат силно отслабени, което означава, че микрофона е шумозащитен.



Фиг.8.7

Когато въздействието на звуковото налягане от двете страни на мембраната е несиметрично в следствие на това, че от едната страна въздейства непосредствено, а от другата през акустично съпротивление или система за времезакъснение, казваме, че имаме микрофон-несиметричен приемник на градиент на звуково налягане (фиг.8.7). Тогава диаграмата на насоченост представлява кардиоида

Електрически комбинирани микрофони

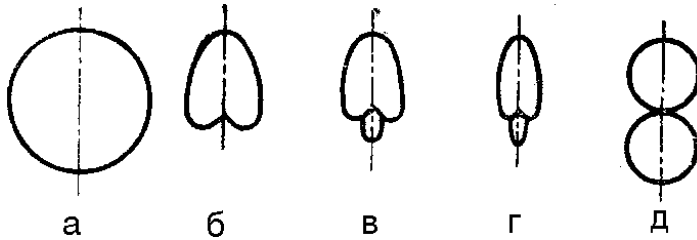
Ако се комбинират електрически (сумира се изходното им напрежение) един микрофон-приемник на звуково налягане и един-приемник на градиент на звуково налягане, могат да бъдат получени всички възможни характеристики на насоченост, като се изменя отношението на чувствителностите на двата микрофона, които трябва да бъдат разположени максимално близо един до друг. Ако с  $C$  означим отношението на чувствителността на приемника на градиент на звуково налягане към тази на приемника на звуково налягане, тогава изразът на характеристиката на насоченост на комбинирания микрофон има вида:

$$R_{(\theta)} = \frac{1}{1+C} (1 + C \cos \theta) \quad (8.22)$$

Различните характеристики на насоченост се получават при следните условия:

- когато действа само приемника на звуково налягане ( $C=0$ ) се получава кръгова характеристика на насоченост (фиг.8.8-а);

- когато действа само приемника на градиент на звуково налягане ( $C = \infty$ ) характеристиката на насоченост има формата на осмица (фиг.8.8-б);  
 - при отношение на чувствителностите приемник на градиент на звуково налягане към приемник на звуково налягане  $0,63 : 0,37$  ( $C=1,7$ )



Фиг.8.8

характеристиката на насоченост има формата на суперкардиоида (фиг.8.8-г);

- при равни чувствителности на двата приемника ( $C=1$ ) формата на характеристиката на насоченост е

кардиоида (фиг8.8-в);

- при отношение на чувствителностите приемник на градиент на звуково налягане към приемник на звуково налягане  $0,75 : 0,25$  ( $C=3$ ) формата на характеристиката на насоченост е хиперкардиоида (фиг.8.8-д);

Електрически комбиниран микрофон може да се получи от два еднакви микрофона с характеристика тип кардиоида, обърнати в противоположна посока. Характеристиката на насоченост на кардиоидния микрофон се описва с израза:

$$e_1 = \frac{e_0}{2}(1 + \cos\theta) \quad (8.23)$$

За обратно насочения микрофон съответния израз е:

$$e_2 = \frac{e_0}{2}(1 - \cos\theta) \quad (8.24)$$

При последователно еднопосочно електрическо свързване на два такива микрофона се получава:

$$e = e_1 + e_2 = e_0 \quad (8.25)$$

Т.е. нямаме зависимост на изходното напрежение от ъгъла и характеристиката на насоченост е кръгова.

При последователно-насрещно свързваме ще получим:

$$e = e_1 - e_2 = e_0 \cos\theta \quad (8.26)$$

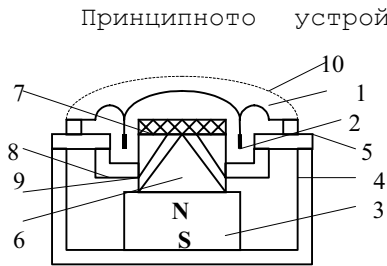
или характеристиката на насоченост е косинусоидална т.е. тип осмица.

При частично свързване на единият микрофон чрез делител се получават другите типове характеристики.

## 8.4 ЕЛЕКТРОДИНАМИЧНИ МИКРОФОНИ С ПОДВИЖНА БОБИНА

В този вид микрофони звеното електромеханичен преобразовател-двигател е от електродинамичен тип. По отношение на насочеността те нямат принципно ограничения за видовете характеристики, но практически

се произвеждат като приемници на звуково налягане (т.е. с кръгова характеристика на насоченост) или като несиметричен приемник на градиент на звуково налягане (т.е. с кардиоидна, суперкардиоидна или хиперкардиоидна характеристика на насоченост).



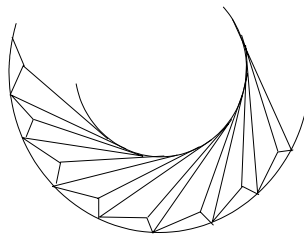
Фиг.8.9

Принципното устройство на един електродинамичен микрофон с подвижна бобина, който е приемник на звуково налягане е показано на фиг.8.9. Основните му конструктивни възли са трептящата система и магнитната система.

Трептящата система се състои от мембрана (1) и закрепена към нея звукова бобина (2). Мембраната е изработена от тънко пластмасово фолио, обикновено от материала поликарбонат, поради добрите му механични свойства и устойчивостта на температура (такъв материал е например макрофол), или понякога от полиестер,

полиетилен тарафталат и в някои по-стари типове от полистирол.

Централната част на мембраната обикновено има куполообразна форма, или по-рядко някаква комбинация от конусни повърхнини. Целта на това е получаването на значителна твърдост на тази част при минимално тегло т.е. при малка дебелина на материала. Благодарение на това честотния диапазон, при който се запазва буталното движение на мембраната (т.е. такова движение, при което всичките нейни части са движат синхронно), се разширява в областта на високите честоти.



фиг.8.10

Периферията на мембраната е оформена като гънка, осигуряваща движението на подвижната система по посока на оста на капсула, като при това не позволява движение в посока, перпендикулярна на тази ос. За целта гънката е оформена или от концентрични гофри с различно сечение (синусоидално, от полуокръжност, триъгълно

и др.), или представлява така наречената тангенциална гънка, (фиг.8.10), която осигурява по-голяма стабилност в радиална посока и това позволява въздушната междина на магнитната система да се направи по-тъсна и от там да се получи по-голяма напрегнатост на магнитното поле в нея. Звуквата бобина обикновено е навита без основа от тънък проводник-0,06 до 0,08 мм. със специална изолация тип "термолан", която при нагряване се разめква и слепва намотките помежду им, образувайки монолитна бобина. Практически това става, като след навиването на бобината през нея се пропуска да протече постоянен ток, който нагрява проводника до необходимата температура.

Предназначението на магнитната система е да създаде постоянно по големина и посока магнитно поле в работната въздушна междина. Състои се от постоянен магнит (3) и магнитопровод. Последният се състои от чашка (4), горна полюсна наставка (5) и сърце (6). Магнитът обикновено е лят от магнитно твърда сплав (например, Алнико), а детайлите на магнитопровода са изработени от магнитно мек материал-електротехническо желязо (Армко) или ниско въглеродна стомана от типа СТ.3 или СТ.10. Магнитната индукция в работната въздушна междина е  $B=0,6$  до  $1,0T$ . Капачката (8) служи да отдели обемът, затворен в магнитната система, от обема под мембраната и е изработена от немагнитен материал, обикновено месинг, а каналите (9) свързват подмембранното пространство с обема, затворен в магнитната система, като по този начин образува резонатор на Хелмхолц. Дискът (7),

изработен от плат или филц служи за създаване на активно акустично съпротивление в гърлото на резонатора, регулирайки неговия Q-фактор. Чрез така оформения резонатор може да се влияе на хода на честотната характеристика на микрофона.

Капачката (10) предпазва мембраната от механични въздействия и повреди. Освен това, тя оказва влияние върху честотната характеристика на микрофона в областта на високите честоти.

За да бъде равномерна честотната характеристика на микрофона, трябва скоростта на трептене на мембраната да бъде постоянна в целия номинален честотен обхват.

При свързването на микрофона към входа на усилвателя, той се оказва натоварен с входното съпротивление. Тогава напрежението, което микрофона отдава е :

$$U = \frac{E R_T}{R_i + R_T} \quad (8.26)$$

Тук  $R_i$  е изходното съпротивление на микрофона.

Зависимостта на напрежението  $U$  от честотата се нарича **електрическа товарна характеристика** на микрофона. За разглеждания микрофон тя е равномерна, защото в принципа на действие не е заложена честотна зависимост на  $U$ . Долната граница на номиналния честотен диапазон на тези микрофони достига 80 - 100 Hz, а горната граница е 15 - 20 kHz. Принципното устройство на електродинамичен микрофон приемник на градиент на звуково налягане е подобно на разгледания, като в магнитната система на микрофона и в корпуса му са направени отвори, през които звуковото налягане прониква до задната страна на мембраната. Получаването на равномерна честотна характеристика изисква специални мерки, което довежда до усложняване на конструкцията. Условието за получаване на равномерна честотна характеристика при микрофоните, приемници на градиент на звуково налягане е входният им механичен импеданс да нараства пропорционално на честотата, защото:

$$F = 2\pi P_{зв.} S_d \quad (8.27)$$

От друга страна :

$$e = \frac{kF}{z_{мех.}} \quad (8.28)$$

или:

$$e = \frac{BIP_{зв.} S_d 2\pi f}{cz_{мех.}} \quad (8.29)$$

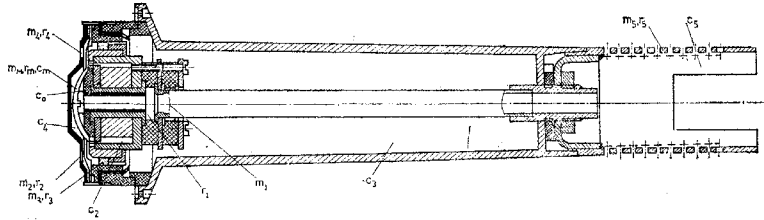
Това означава, че за да се компенсира нарастването на  $e$  с честотата, трябва  $z_{мех.}$  също да нараства с честотата, което може да се постигне, като се конструира трептящата система така, че да бъде система, ръководена от масата. Входния механичен импеданс на такава система има вида:

$$z \approx 2\pi m f \quad (8.30)$$

Този израз е валиден за честоти по-високи от резонансната честота на микрофона и в дадения случай е равна на резонансната честота на трептящата система, а изходното напрежение става честотно независимо:

$$e = \frac{BIP_{\text{зв}} d}{mc} \quad (8.31)$$

На фиг.8.11 е показана конструкцията на микрофон с характеристика на насоченост тип кардиоида, а неговата еквивалентна заместваща схема е показана на фиг.8.12.



Фиг.8.11

Акустичните елементи на микрофона са:

- $m_M, c_M, r_M$  - маса, гъвкавост на окачването и съпротивление на загубите на мембраната.
- $c_0$  -

гъвкавост на обема под мембраната.

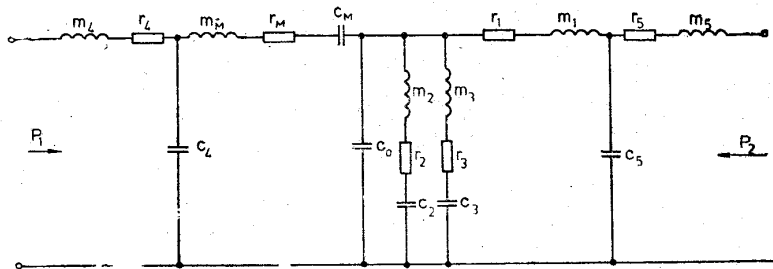
$m_1, r_1$  - маса и съпротивление на загубите в тръбата, в която прониква задната звукова вълна.

$m_2, c_2, r_2$  - маса, гъвкавост и съпротивление на загубите на резонатора, образуван в магнитната система.

$m_3, c_3, r_3$  - маса, гъвкавост и съпротивление на загубите на резонатора, образуван в корпуса на микрофона.

$m_4, c_4, r_4$  - маса, гъвкавост и съпротивление на загубите на резонатора, образуван под предната защитна капачка.

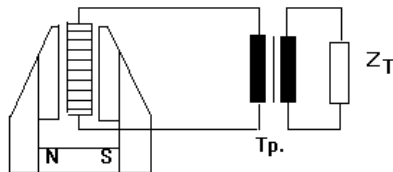
$m_5, c_5, r_5$  - маса, гъвкавост и съпротивление на загубите на резонатора, образуван при задния вход на микрофона.



Фиг.8.12

Както се вижда, схемата има два входа на които въздействува звуковото налягане  $P_1$  и  $P_2$ . При това  $P_2$  зависи от  $P_1$  и от разстоянието между предния и заден входове. Изходната

величина е колебателната скорост на мембраната, защото звуковата бобина е закрепена към нея, а индуктираното напрежение е пропорционално на скоростта на трептене на бобината в магнитното поле.



Фиг.8.13

Въздушният стълб в тръбата, разположена вътре в корпуса на микрофона е с маса  $m_1$ , която се прибавя към динамичната маса на мембраната и това довежда до понижаване на резонансната честота на трептящата система на микрофона и от там - до по-ниска долна гранична честота. Освен това, звеното  $m_1 - r_1$

довежда до дефазирание на задната звукова вълна, необходимо за получаване на исканата пространствена характеристика на микрофона. В някои конструкции задния вход се реализира в тилното страна на капсула, което не променя принципа на действие.

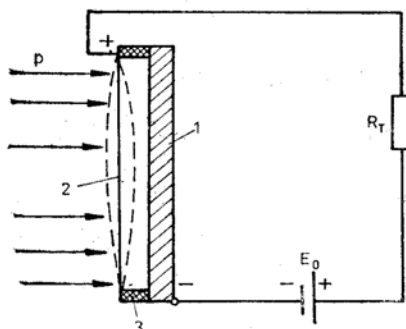
Един почти излязъл от употреба вариант на този тип микрофони е лентовия електродинамичен микрофон (фиг.8.13). При него трептящата система представлява нагъната лентичка от проводим материал, най-често алуминий или метализирана пластмаса, която е разположена в силното магнитно поле, създавано от постоянен магнит и магнитна система с подходяща форма. Под действието на звуковото налягане лентичката започва да трепти, пресичайки магнитните силови линии, вследствие на което в нея се индуцира ЕДН - т.е. тя замества и бобината, и мембраната. Поради малката маса на лентичката този вид микрофони се характеризират с много къси преходни процеси, което спомага за подобряване на качеството на преобразуване. От друга страна, малката стойност на електрическото и съпротивление налага използването на съгласуващ трансформатор, а това усложнява конструкцията на микрофона и го оскъпява.

Тъй като звуковото налягане има достъп до двете страни на лентичката, този тип микрофони са типични приемници на градиент на звуково налягане и тяхната характеристика на насоченост е тип осмица. За получаване на други типове характеристики на насоченост от задната страна на лентичката се поставя акустичен лабиринт, който превръща микрофона в приемник на звуково налягане, но увеличава габаритите му.

## 8.5. КОНДЕНЗАТОРНИ МИКРОФОНИ

### 8.5.1. Общи сведения. Ненасочени кондензаторни микрофони.

При кондензаторните микрофони звеното електромеханичен преобразувател-генератор е от капацитивен тип. Принципното устройство на такъв микрофон е показано на фиг.8.14. Неподвижната плоча на кондензатора представлява масивен електрод, а подвижната плоча представлява тънка проводима мембрана, изработена от метално фолио или метализирана пластмаса.



Фиг.8.14

Разстоянието между двата електрода е много малко (от порядъка на 40 микрона) и за да се увеличи гъвкавостта на обема между тях в масивния електрод се пробиват отвори или се издълбават канали, които не

на-маляват значително площта му, но дават възможност на мембраната да се движи свободно, като по този начин се увеличава чувствителността до десет пъти. В този си вид кондензаторния микрофон е приемник на звуково налягане. Нека разгледаме условията, при които чувствителността му е честотно независима. Съгласно изведената по-рано формула, чувствителността на един микрофон-приемник на звуково налягане под товар е:

$$A_{0zt} = \frac{kS_{\text{екв.}}}{z + z_{\text{вн.}}} \frac{Z_T}{Z + Z_T} \quad (8.32)$$

Тук  $k$  - коефициент на електромеханична връзка; при кондензаторния микрофон той е честотно зависим.

$S_{\text{екв.}}$  - площ на мембраната; това е честотно независима величина.

$Z$  - електрически изходен импеданс на микрофона; той има капацитивен характер и следователно е честотно зависим.

$Z_T = R$  - електрическият товар на микрофона. Ако не вземаме предвид паразитния капацитет, той е чисто активен и следователно - честотно независим.

$z_{\text{вн.}}$  - внесеното механично съпротивление, което в случая е много малко и може да се пренебрегне.

$a$  - разстояние между мембраната и неподвижния електрод.

$z$  - механичният импеданс на мембраната.

Тъй като мембраната на кондензаторните микрофони, както вече казахме, се изработва от тънко метално или метализирана пластмасово фолио, тя се характеризира с много малко вътрешно триене и следователно активната съставка на  $z$  може да бъде пренебрегната. Тогава можем да запишем:

$$z \approx \frac{1}{j\omega c} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) \quad (8.33)$$

Тук:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{mc}} \text{ е резонансната ъглова скорост на мембраната}$$

$m$  - действащата маса на мембраната, която е по-малка от действителната понеже мембраната е запъната по периферията си и амплитудата на трептенето е различна в различните участъци, като най-голяма е в центъра и нулева по периферията.

$c$  - гъвкавост на мембраната, която се състои от две гъвкавоститазии на самата мембрана, която е силно опъната, и гъвкавостта на обема въздух, намиращ се под мембраната.

От казаното до тук се вижда, че механичната трептяща система на кондензаторния микрофон е система, ръководена от гъвкавостта, понеже масата е много по-малка от гъвкавостта, а активното съпротивление може да се пренебрегне.

Модулът на чувствителността е :

$$\left|A_{0z_1}\right| = \frac{U_0 S_{\text{екв.}}}{a \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)} \frac{c}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC_0}\right)^2}} \quad (8.34)$$

Ако са изпълнени условията:

$$\omega \gg \frac{1}{RC_0} \quad (8.35)$$

и

$$\omega \ll \omega_0 \quad (8.36)$$

чувствителността става честотно независима в честотния обхват:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi RC_0} \div \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (8.37)$$

и е равна на:

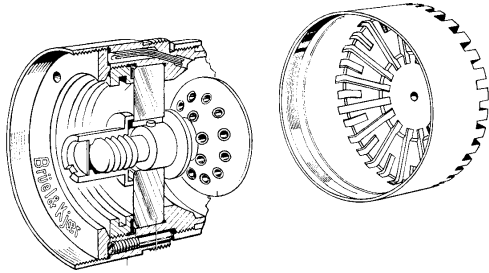
$$|A_{0z1}| = \frac{U_0 \cdot S_{\text{скв.с}}}{a} \quad (8.38)$$

Необходимата стойност на резистора за получаване на определена долна гранична честота при известен капацитет на микрофона е:

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot f_H \cdot C_0} \quad (8.39)$$

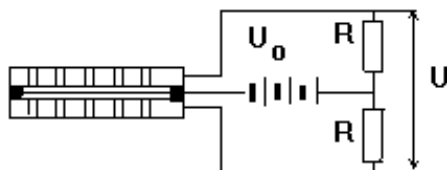
Входното съпротивление на усилвателното стъпало, към което се свързва микрофона трябва да бъде равно или по-голямо от тази стойност. Практическата му стойност е над 100 МΩ. Тази стойност може да се постигне чрез използването на полеви транзистор, свързан в схема общ сорс, като това стъпало трябва да се монтира непосредствено до капсула на микрофона, защото в противен случай се създават условия за проникване на фонове напрежения във входа на усилвателя. Освен това се увеличава и паразитният капацитет, което намалява чувствителността, като относителното намаляване на изходното напрежение при едно и също звуково налягане е:

$$\frac{U_{c_H=0}}{U_{c_H}} = 1 + \frac{C_{\text{П}}}{C_0} \quad (8.40)$$



Фиг.8.15

По-горе беше споменато, че горната граница на честотния обхват, в който чувствителността не зависи от честотата, е по-ниска от резонансната честота на мембраната. Когато чрез оформяне на прорези или отвори в неподвижния електрод се увеличи обема под мембраната, което, както казахме, увеличава чувствителността, има вероятност резонансната честота да попадне в обхвата на възпроизвежданите честоти. Това би довело до получаването на връх в честотната характеристика, което е вредно явление понеже увеличава неравномерността на честотната характеристика. То може да се намали, като се направят отворите или каналите в неподвижния електрод по-тесни, като по този начин се въвеждат активни загуби. Допълнително разширяване на честотния обхват на микрофона в областта на високите честоти може да се постигне чрез оформянето на Хелмхолцов резонатор с подходяща резонансна честота и Q-фактор с помощта на предпазната решетка пред мембраната. Пример за висококачествен измерителен кондензаторен микрофон е модела на фирмата "Брюл и Кер", показан на фиг.8.15



Фиг.8.16

Конструкцията на един микрофон с характеристика на насоченост тип осмица е

По-горе беше споменато, че горната граница на честотния обхват, в който чувствителността не зависи от честотата, е по-ниска от резонансната честота на мембраната. Когато чрез оформяне на прорези или отвори в неподвижния електрод се увеличи обема под мембраната, което, както казахме, увеличава чувствителността, има вероятност резонансната честота да попадне в обхвата на възпроизвежданите честоти. Това би довело до получаването на връх в честотната характеристика, което е вредно явление понеже увеличава неравномерността на честотната характеристика. То може да се намали, като се направят отворите или каналите в неподвижния електрод по-тесни, като по този начин се въвеждат активни загуби. Допълнително разширяване на честотния обхват на микрофона в областта на високите честоти може да се постигне чрез оформянето на Хелмхолцов резонатор с подходяща резонансна честота и Q-фактор с помощта на предпазната решетка пред мембраната. Пример за висококачествен измерителен кондензаторен микрофон е модела на фирмата "Брюл и Кер", показан на фиг.8.15

### 8.5.2. Насочени кондензаторни микрофони.

Кондензаторните микрофони могат да бъдат конструирани така, че характеристиката им на насоченост да бъде осмица или кардиоида.



показана на фиг.8.16. Мембраната е поставена между два масивни перфорирани електрода, което дава възможност на звуковото налягане да прониква от двете страни на мембраната. Двата масивни електрода са свързани противотактно. Микрофонът, който има тази конструкция е типичен приемник на градиент на звуково налягане и неговата чувствителност зависи от посоката на пристигане на звуковата вълна спрямо оста на микрофона.

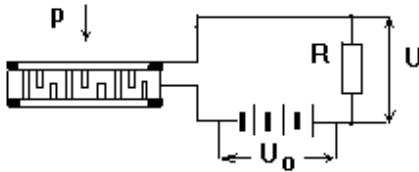
Изразът за чувствителността на такъв микрофон е:

$$E = \frac{2U_0SD}{C_0ar} \cos \Theta \quad (8.41)$$

където:  $U_0$  - поляризиращо напрежение  
 $a$  - разстоянието между мембраната и всеки от електродите.  
 $S$  - площ на мембраната  
 $C_0$  - собствен капацитет на микрофона  
 $D$  - диаметър на мембраната  
 $r$  - активно механично съпротивление  
 $\Theta$  - ъгъл между посоката, от която идва звуковата вълна и оста на микрофона.

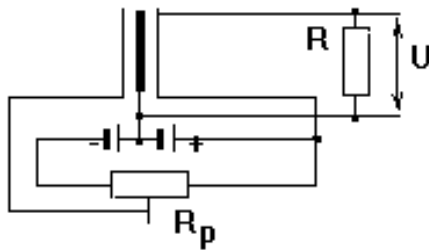
Както се вижда, характеристиката на насоченост е косинусоидална т.е. - тип осмица.

На фиг.8.17 е показана конструкцията на едностранно насочен микрофон с характеристика тип кардиоида.



Фиг.8.17

налягането мембраните трептят в различни посоки, а под влиянието на градиента на налягане - в една посока. При подходяща конструкция на микрофона, осигуряваща еднаквост на преместването на мембраната под действието на налягането и на градиента на налягане, едната мембрана (от към посоката, от която идва звука) ще трепти с удвоена амплитуда, а другата ще остане неподвижна. Когато се поляризира само едната мембрана и само от нея се снима изходно напрежение, микрофонът ще има максимална чувствителност когато поляризираната мембрана е обърната към посоката, от която идва звука, и ще бъде нечувствителен, когато не поляризираната мембрана е обърната в тази посока т.е. микрофонът ще бъде едностранно насочен.



Фиг.8.18

На този принцип могат да бъдат конструирани кондензаторни микрофони с електрически изменяема насоченост. Схемата на свързване, при която се реализира тази възможност е показана на фиг.8.18. Едната мембрана има постоянен положителен потенциал, а другата може да има отрицателен, нулев или положителен потенциал. Когато двете мембрани имат положителен потенциал се получават

два кардиоидни микрофона, обърнати в противоположна посока и при сумирането на двата сигнала се получава микрофон с кръгова характеристика на насоченост. Когато едната мембрана има нулев потенциал, се получава разгледания по-горе случай на едностранно насочен микрофон с характеристика тип кардиоида. Когато едната мембрана има положителен потенциал, а другата отрицателен, двете кардиоидни характеристики се изваждат и се получава микрофон с характеристика на насоченост тип осмица. Плавното преминаване от един тип характеристика към друга може да става с помощта на потенциометър, както е показано на фигурата.

### 8.5.3. Електретни микрофони

Електретните микрофони са разновидност на кондензаторните, с тази разлика, че единият от електродите е предварително наелектризиран и запазва заряда си, което премахва необходимостта от постоянно поляризиращо напрежение. Запазването на заряда след наелектризиране е възможно за един клас диелектрици, наречени електрети. Времето, за което електрическият товар на електрета намалява 2,17 пъти се нарича време на живот на електрета. За съвременните такива материали времето на живот се оценява на около двеста години, което е повече от времето на живот на съвременните интегрални схеми.

Първите електретни микрофони са конструирани през 1935 година на базата на восъчни електрети, които са имали много малко време на живот. Електретните микрофони получиха широко разпространение в последните години благодарение на откриването на нови електретни материали с достатъчно дълго време на живот. В момента те са най-широко разпространения тип микрофони, като постепенно изместват динамичните поради по-добрите си електроакустични показатели и по-проста технология на масовото производство. Основният им недостатък, който за сега им пречи да изместят напълно другите типове микрофони е необходимостта непосредствено до капсула да се разполага съгласуваща схема с много високо входно съпротивление (например, дрейнов повторител), което води след себе си необходимостта от постоянно токово захранване, което все пак е с ниско напрежение, за разлика от обикновените кондензаторни микрофони.

Електретният товар по своята природа може да бъде от токови носители, инжектирани в диелектрика, или от негови собствени токови носители, разделени и преместени в приелектродните слоеве от приложено електрическо поле, както и от ориентация на диполи при полярните диелектрици. По този начин се формира повърхностен или обемен заряд.

Един електрет, който не е покрит с метални електроди, притежава външно електрично поле и се явява електростатичен аналог на постоянен магнит. При екраниране на един от полюсите на заряда с друг заряд се получава еднopoлюсен (еднopoлярен) електрет, чийто заряд е по-голям. Екранирането се постига чрез едностранно метализиране на електрета, при което огледалните индуцирани заряди в прилепналия метален слой компенсират съседните товари в електрета. По този начин последният се превръща от макродипол в еднopoлярен електрет.

В зависимост от начина на формиране на заряда, електрети-те биват електроелектрети и термоелектрети. Операцията, при която се формира заряда се нарича електретизиране.

При електроелектретите с помощта на електрически разряд (коронен или контактен) се инжектират електрони в повърхността на електрета. Инжектирането може да стане с помощта на електронен лъч, при което се получава по-обемен и равномерен заряд.

За формиране на заряда при термоелектретите е необходима висока температура (над така наречената температура на встъкляване, която е характерна за всеки материал), при която постоянните диполи и свободните товари са достатъчно подвижни. След като термоелектрет-та се нагрее до тази температура се включва електрическо поле с напрегнатост до 30 kV/cm., което предизвиква ориентирание на диполите и дрейф на зарядите към електродите. След това, без да се изключва полето се намалява температурата до стайна, при което зарядите се "замразяват" в новото си положение.

За да бъде траен заряда, и при двата вида електрети трябва електрическото съпротивление на материала да бъде много голямо, защото в противен случай ще протече ток, който ще компенсира заряда. Съвременните електрети създават електрическо поле, съот-ветствуващо на постоянно поляризиращо напрежение от 70 до 280 V.

Електретните микрофони биват два основни типа - с електрет, използван за мембрана и с електрет, нанесен върху неподвижния електрод.

Микрофоните с електретна мембрана са по-разпространени, но техните качества са резултат на компромис между необходимите механични свойства на мембраната и нейните свойства на електрет. Към необходимите механични свойства на материала спадат възможността да бъде изработено тънко фолио, еластичността и механичната здравина, а електрическите са високо електрическо съпротивление, високо пробивно напрежение и възможност за електретирание.

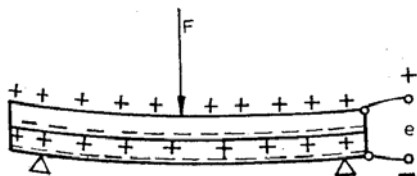
От известните материали в най-висока степен притежава необходимия комплекс от качества материала с химическо название политетрафлуоретилен, повече известен с търговското си наименование тефлон. При електретиранието тефлона се нагрява до 230°C и се прилага електрическо поле с напрегнатост от порядъка на 100 kV/cm. като отрицателния полюс се подава на електрода, създаващ разряда. Установено е, че при тези условия се получава по-стабилен заряд.

При микрофоните с електрет, нанесен на неподвижния електрод, механичните свойства на мембраната могат да се избират независимо от електричните свойства на електрета, което води до избягване на необходимостта от гореспоменатия компромис. За това из-мервателните електретни микрофони са именно от този тип, докато микрофоните от първия тип се използват за широка употреба.

Конструкцията на електретните микрофони е подобна на тази на обикновенните кондензаторни микрофони, показана на фиг.8.15 и фиг.8.16.

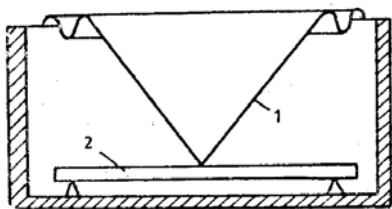
## 8.6. ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧЕСКИ МИКРОФОНИ

При пиезоелектрическите микрофони звеното електроакустичен преобразувател-генератор е от типа, при които се използва правия пиезо- ефект. Тъй като пиезоматериалите са механически твърди и крехки и от тях не могат да бъдат изработвани достатъчно големи и еластични мембрани, се налага използването на специални конструкции, за да се повиши чувствителността на тези микрофони. От пиезокерамичния материал се изработва така наречения биморфен елемент или биморфна пластина. Тя представлява две еднакви тънки пластини, които са залепени една за друга, както е показано на фиг.8.19. При пиезоелектрическите микрофони



Фиг.8.19

се прилагат електрически последователно свързани биморфни пластини, при които изходното напрежение е сумата от изходните напрежения на двете единични пластини, а изходното съпротивление е също сумата от двете



Фиг.8.20

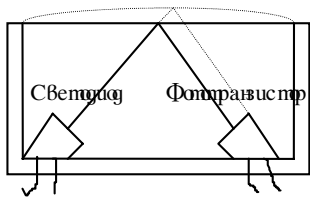
съпротивления на единичните пластини. При прилагането върху биморфната пластина на усилие, което се стреми да я огъне, вследствие на правия пиезоефект на повърхността на единичните пластини се появяват електрически заряди с поляритет както е показано на фиг.8.19 и понеже пластините електрически са свързани последователно, те се сумират и изходното напрежение е два пъти по-голямо отколкото при единична пластина. За съгласуване на акустичните импеданси на пластината и въздуха се използва мембрана, както е показано на фиг.8.20. Както знаем, коефициентът на електромеханична връзка при пиезоелектрическите микрофони е обратно пропорционален на честотата. Следователно, за получаване на честотно независима чувствителност е необходимо, както и при кондензаторните микрофони, входния механичен импеданс да бъде обратно пропорционален на честотата. За целта трептящата система трябва да бъде система, ръководена от гъвкавостта с резонансна честота много по-висока от горната граница на преобразувания честотен обхват. За пиезокерамичните биморфни пластини това условие се изпълнява лесно, стига масата на мембраната да не бъде голяма. Пак подобно на кондензаторния микрофон, за доброто възпроизвеждане на ниските честоти е необходимо времеконстантата, определена от произведението на капацитета на пиезопластинката и входното съпротивление на усилвателя, да бъде по-голяма от периода на най-нисочестотното преобразувано колебание. Това условие при пиезоелектрическия микрофон също се изпълнява по-лесно, отколкото при кондензаторния микрофон, защото капацитета на пиезопластинката е над десет пъти по-голям от този на кондензаторния капкул. Това дава възможност да се ползува кабел с дължина няколко метра за връзка между микрофона и усилвателя, без това да се отразява значително на чувствителността.

Пиезоелектрическите микрофони се характеризират с добра чувствителност, но неравномерността на честотната им характеристика е сравнително голяма и за това те са намерили ограничено приложение като битови микрофони от нисък клас и като микрофони за слухови апарати.

## 8.7.НЕОБРАТИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ЗВУКОВО НАЛЯГАНЕ В ЕЛЕКТРИЧЕСКО СЪПРОТИВЛЕНИЕ

### 8.7.1. Транзисторни и оптоелектронни микрофони

Тези видове микрофони не генерират ЕДС, а преобразуват звуковото налягане в промяна на електрическото съпротивление на съответния елемент, като по този начин се изменя електрическият ток в изходната верига.



Фиг.8.21

При транзисторните микрофони това става, като към центъра на една мембрана е закрепена сапфирена игла, чийто връх допира емитерния преход на един транзистор от плоскостен тип. При разтрептяването на мембраната под

действието на звуковото налягане иглата упражнява променлив натиск върху прехода на транзистора, при което се изменя съпротивлението във веригата емитер-колектор, явяваща се изходна верига на транзистора. По този начин звуковото налягане управлява колекторния ток на транзистора, под чието действие върху колекторния резистор се получава променлив пад на напрежение, съответстващ по форма на звуковото колебание.

При оптоелектронните микрофони се използва двойка светодиод-фототранзистор, като върху фототранзистора попада отразената от огледалната повърхност на мембраната светлина (фиг.8.21). Светлинното петно се измества при движението на мембраната и осветява с различна интензивност фотоприемника, в резултат на което се изменя токът в колекторната верига и от там - падът на напрежение върху колекторния резистор, като този пад съответства по форма на звуковото колебание.

#### 6.6.2. Въгленови микрофони

Въгленовите контактни микрофони са най-стария тип микрофони, използвани още в първите телефонни апарати. Този вид микрофони също не генерират ЕДС, а под въздействието на звуковото налягане изменят своето съпротивление и от там се изменя токът във веригата, в която е включен микрофона. Състоят се от капсула, пълна с въгленов или графитен прах, който се притиска с променлива сила от мембрана, върху която въздействува звуковото налягане, при което се изменя контактът между въгленовите или графитни частици (зърна) и от там - контактното съпротивление и като цяло съпротивлението на микрофонния капсул. Поради своите недостатъци - повишен шум получаващ се вследствие на случайния характер на контакта между въгленовите зърна, големи изкривявания и непостоянство на параметрите с времето, произтичащо от слепването на въгленовите зърна при продължителна работа, този вид микрофони намират приложение само в някои по-стари типове телефонни апарати, като постепенно биват измествани и от там от други видове, главно електретни, микрофони.