

## 9. ВИСОКОГОВОРТЕЛИ

### 9.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ. ВИДОВЕ.

Съгласно определението, дадено в препоръките на международната електротехническа комисия (IEC), високоговорителят е електроакустичен преобразувател, позволяващ да се получат акустични трептения в резултат на въздействието на електрически сигнал, и предназначен да излъчва в пространството акустична мощност в областта на честотите от звуковия спектър. Следователно, високоговорителите служат за преобразуване на енергията на електрическите колебания, подавани на техния вход, в механична енергия на звуковите колебания. Те трябва да възпроизведат във вид на звук определена говорна или музикална картина, подадена на входа им като електрически сигнал, като при това не въвеждат изкривявания т.е. те трябва да бъдат линейни преобразуватели. Последното изискване никога не може да бъде изпълнено абсолютно точно, но стремежът на конструкторите е да се доближат колкото е възможно повече до идеала, когато една (или няколко) мембрани ще могат да заместят напълно цял един симфоничен оркестър.

Високоговорителят може да се разглежда като електроакустична система. Като всяка система, тя представлява съвкупност от няколко подсистеми или звена, а всяко от тях се характеризира със своите функционални характеристики. Това дава възможност в рамките на тези характеристики всяко звено да се разглежда като самостоятелен елемент и да се изследва и оптимизира отделно от другите звена, а общите характеристики на системата да се явяват резултат от взаимното съгласуване на вече оптимизираните частични характеристики. Оптимизацията на параметрите на звената се осъществява по признака получаване на максимална акустична енергия при постигане на зададените качествени показатели и при подадена определена електрическа мощност. За това е по-удобно частичните характеристики на високоговорителите да се изразяват като отношение на енергетични величини-мощности или интензивности.

Най-целесъобразно е високоговорителя да се представи с помощта на следните звена:

електрическа схема-представлява последователно свързани вътрешното съпротивление на източника на електрически сигнали  $R_i$  и входното електрическо съпротивление на електромеханичния преобразувател  $Z$ . Ефективността на това звено се оценява с помощта на коефициента на използване на изходната мощност на усилвателя:

$$\eta_{\text{ел.}} = \frac{P_{\text{в.г.}}}{P_{\text{ус.}}} \quad (9.1)$$

Където  $P_{\text{в.г.}}$  е мощността, консумирана от високоговорителя

$P_{\text{ус.}}$  е мощността, развивана от усилвателя.

електромеханичен преобразувател-служи да преобразува електрическата енергия на входния сигнал в механична сила, приложена върху акустико-механичната система на високоговорителя, и следователно представлява разгледания в гл.7 електромеханичен преобразувател-двигател. Неговата ефективност се оценява с помощта на коефициента на електромеханична ефективност:

$$\eta_{\text{ем}} = \frac{P_{\text{м}}}{P_{\text{е}}} \quad (9.2)$$

Тук  $P_m$  е механичната мощност, развивана на изхода на електромеханичния преобразувател.

механо-акустичен преобразувател-това звено преобразува променливата сила, получена на изхода на електромеханичния преобразувател в колебания на въздушните частици. Неговите свойства се изразяват с помощта на коефициента на механо-акустична ефективност:

$$\vartheta_{MA} = \frac{P_a}{P_m} = \frac{r_R}{z} \quad (9.3)$$

където  $P_a$  е акустичната мощност, излъчвана от високоговорителя, представляваща произведението на механичния импеданс на акустико-механичната система  $z$  и квадрата на колебателната и скорост.

$r_R$  -съпротивление на излъчване

акустична излъчваща антена-формира товарното съпротивление на акустико-механичната система т.е. съпротивлението на излъчване и характеристиката на насоченост.

Звената си влияят едно на друго и в права и в обратна посока, като например електромеханичният преобразувател влияе върху електрическата схема чрез внесеното съпротивление и т.н. В зависимост от принципа на преобразуване на електрическата енергия в механична, високоговорителите биват:

**Електромагнитни високоговорители**-поради по-лошите параметри в сравнение с другите типове високоговорители, като например повишен клирфактор вследствие на насищането на феромагнитната котва, по-голяма маса на трептящата система и от там-понижена чувствителност и др., в момента практически не намират приложение.

**Електродинамични високоговорители**-високоговорителите от този тип са най-често използваните в момента поради достатъчно простата и технологична конструкция и добри параметри.

**Електростатични (кондензаторни) високоговорители**-този тип високоговорители се характеризират с много добро качество на излъчвания звук, но не са получили широко разпространение главно поради необходимостта от високо поляризиращо напрежение, както и на съгласуващ трансформатор.

**Пиезоелектрически високоговорители**-използват се изключително като високочестотни високоговорители. След разработването на високополимерните пиезо материали, качествата им се доближават до тези на кондензаторните и лентови високочестотни високоговорители. Все още се използват сравнително рядко.

**Термойонни високоговорители**- функционирането на термойонните високоговорители се основава на следната идея: Известно е, че основните проблеми при другите типове високоговорители са свързани с наличието на мембрана с присъщите и резонансни явления, противофазни колебания на различни участъци, маса и свързаната с нея инерционност, импедансна несъгласуваност с околната среда и др. Възниква въпросът не е ли възможно да се построи излъчвател без мембрана? Оказва се, че такава възможност дава йонизиращият въздух, който, когато бъде поставен в променливо електрическо поле се привлича към единия или другия електрод в зависимост от поляритета. Вследствие на това върху него се оказва приложена сила, пропорционална на напрегнатостта на полето, и под нейното действие той се задвижва и се формира звукова вълна. Въпреки привидната си простота, идеята е твърде сложна за изпълнение и създадените йонофони имат ред недостатъци, поради което не са получили разпространение.

**Параметрични звукоизлъчватели**- също представляват звукоизлъчватели без мембрана.Тяхния принцип на действие се базира на

взаимодействието на две ултразвукови колебания с много високо ниво (над 130-140 dB), при което въздушната среда става нелинейна. В резултат на нелинейността при смесването се генерира звуково колебание с честота, равна на разликата на честотите на двете ултразвукови колебания. Когато тази разлика е полезния сигнал, той се излъчва в пространството, при което звучи самият въздух, без наличието на мембрана. Съществуват две принципни възможности за практическо реализиране на такъв излъчвател. Едната е чрез използването на два ултразвукови излъчвателя да се излъчи в пространството една постоянна по амплитуда и честота ултразвукова вълна, наречена "напомпваща" и една променяща своята амплитуда и честота вълна, която носи полезната информация. Смесването им става или в лъч, когато двата излъчвателя са един до друг, или в точка, когато те са отдалечени, като във втория случай ултразвуковата вълна, излъчвана от всеки един от двата излъчвателя се фокусира във вид на лъч. Втората възможност е двете колебания да се излъчват от един и същи излъчвател, при което е необходимо звуковото налягане да се поддържа над 130 dB до определено разстояние, зависещо от долната гранична честота. Формирането на необходимия сигнал става чрез амплитудна модулация на основното ултразвуково колебание с нискочестотния сигнал, при което в спектъра на получения сигнал присъствуват необходимите честоти. Предимство на този вид звукоизлъчватели е възможността да бъдат излъчени много ниски честоти (до единици херци) без да е необходим обем на озвучителното тяло. Особеност при тях е, че характеристиката на насоченост за нискочестотното колебание е същата, както за ултразвука, което дава възможност да се получи насочено излъчване за ниски честоти при малки размери на излъчвателя. Техен недостатък е ниският коефициент на полезно действие - от порядъка на 0,2%.

Принципът на действие на първите четири типа високоговорители беше обяснен в раздела за електромеханични преобразуватели, а по-подробно те ще бъдат разгледани в следващите раздели.

В зависимост от начина, по който се осъществява връзката между трептящата система на високоговорителя и околната среда, високоговорителите биват:

**Високоговорители с директно излъчване** - при този вид високоговорители връзката между трептящата система и околната среда е директна т.е. мембраната се намира в самото звуково поле.

**Рупорни високоговорители** - при тях мембраната е свързана с пространството, в което се излъчва звуковата вълна посредством рупор, или по-често чрез последователно свързани предрупорна камера и рупор. Те подобряват значително съгласуването между акустичните импеданси на мембраната и средата, и в резултат значително се подобрява коефициентът на полезно действие на високоговорителя.

В зависимост от честотния обхват, който са предназначени да възпроизведат, високоговорителите биват нискочестотни, средночестотни, високочестотни и ширококолентови.

## 9.2. ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ НА ВИСОКОГОВОРИТЕЛИТЕ.

Техническите параметри на високоговорителите биват входни и изходни. Тъй като високоговорителите са електроакустични преобразуватели и като такива преобразуват електрическа енергия в енергия на акустичните колебания на частиците, техните входни характеристики са електрически и характеризират преобразувателя като консуматор на електрическа енергия, а техните изходни характеристики са акустически и характеризират ефективността на преобразуването и неговата линейност.

Освен това, техническите параметри на високоговорителите са свързани с някои специфични геометрични понятия, които ще разгледаме по-долу.

### 9.2.1. Геометрични понятия при високоговорителите

**Излъчващ отвор** на високоговорителя се нарича част от равнина, в която се осъществява връзката между излъчващия високоговорител и звуковото поле. При рупорните високоговорители излъчващ отвор е изходящият отвор на рупора, а при високоговорителите с директно излъчване това е част от равнината, минаваща през точките на закрепване на мембраната към корпуса и е с площ по-малка от геометричната площ на мембраната. В този случай площта на излъчващия отвор е еквивалентната площ на звукоизлъчване на високоговорителя.

**Работен център** на високоговорителя се нарича точката, от която се измерва разстоянието между високоговорителя и измервателния микрофон или слушателя. Обикновено за такъв се приема геометричния център на симетрия на излъчващия отвор на високоговорителя.

**Работна ос** на високоговорителя е правата, минаваща през работния му център в направление на преимущественото му излъчване. Обикновено съвпада с перпендикуляра към равнината, в която лежи излъчващия отвор и минава през работния център.

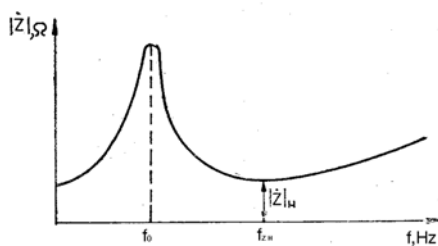
### 9.2.2. Електрически характеристики на високоговорителите

**Пълно входно електрическо съпротивление** (входен електрически импеданс)  $Z_{BX}$  на високоговорителя.

Този параметър се определя както при всички консуматори на електрическа енергия като отношението на приложеното върху входните клеми на високоговорителя напрежение към протичащия през него електрически ток:

$$Z_{BX} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} \quad (9.4)$$

Входният електрически импеданс на преобразувателите-двигатели по принцип е честотно зависим, защото се определя от два честотно зависими



Фиг.9.1

импеданса-този на електрическата част на преобразувателя, който е или индуктивен, или капацитивен, но и в двата случая е в една или друга степен честотно зависим, и от внесения импеданс от механичната част в електрическата. Тъй като механичната трептяща система включва маса и гъвкавост, тя е еквивалентна на трептящ кръг или филтър, а от там и внесения импеданс е с подобен характер и следователно, честотно зависим.

Зависимостта на входния електрически импеданс от честотата се нарича **импедансна характеристика** на високоговорителя. Типичната импедансна характеристика на най-разпространения тип високоговорители-електродинамичния е показана на фиг.9.1.

**Номиналното пълно входно електрическо съпротивление** (номинален импеданс) е стойността на активното съпротивление, с което се замества високоговорителят при измерване на електрическата мощност, която той черпи от захранващия го източник. Стойността на номиналния импеданс се посочва от производителя и в същност представлява най-вероятната минимална стойност на входния импеданс в честотния обхват на

възпроизвеждане за дадения тип високоговорител. Измерените стойности на модула на входния електрически импеданс не трябва да бъдат по-малки от 80% от обявената стойност на номиналния импеданс. Причината за това е, че номиналният импеданс е важен съгласуващ параметър и ако неговата стойност стане прекалено ниска, усилвателят, който захранва високоговорителя се претоварва и неговите нелинейни изкривявания рязко нарастват.

**Резонансна честота.** По принцип, този параметър не електрически, тъй като при тази честота настъпва резонанс на механичните елементи на трептящата система, но чрез приведеното съпротивление той оказва влияние на електрическата страна на високоговорителя. Резонансната честота се дефинира като честотата, за която входният импеданс получава своя най-нискокочестотен максимум. Стойността на резонансната честота зависи от масата и гъвкавостта на трептящата система :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{mc}} \quad (9.5)$$

Тази дефиниция е валидна за високоговорителите, които представляват електромеханични преобразуватели-двигатели от индуктивен тип, докато при преобразувателите от капацитивен тип стойността на входното електрическо съпротивление при резонанс придобива своя най-нискокочестотен минимум.

**Качествен фактор** - Това е числото, което показва колко пъти реактивното съпротивление на елементите на трептящата система при резонанс е по-голямо от съпротивлението на активните загуби и се определя по формулата:

$$Q = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{m}{c}} = \frac{\omega_0 m}{r} = \frac{1}{\omega_0 cr} \quad (9.6)$$

Тук  $c$  и  $r$  е означено съпротивлението на общите механични загуби в трептящата система на високоговорителя, което включва механичните загуби и внесените активни загуби. Поради това така определен качествен фактор се нарича пълен или тотален. Освен тоталния качествен фактор, могат да се дефинират още два качествени фактора на високоговорителя, зависещи от различните по характер загуби-механичните и електрическите, които се наричат съответно механичен качествен фактор ( $Q_M$ ) и електрически качествен фактор ( $Q_E$ ).

Механичният качествен фактор се нарича още качествен фактор при отсъствие на ток в електрическата верига на високоговорителя и той определя поведението на високоговорителя при прекъсната електрическа верига. Ако са известни поотделно механичните и електрическите загуби, то:

$$Q_M = \frac{\omega_0 m}{r_M} = \frac{1}{\omega_0 cr_M} = \frac{1}{r_M} \sqrt{\frac{m}{c}} \quad (9.7)$$

Електрическият качествен фактор е обусловен от тока в електрическата верига на високоговорителя, породен от противоелектродвижещата сила. За него можем да запишем:

$$Q_E = \frac{\omega_0 m}{r_{BH}} = \frac{1}{\omega_0 cr_{BH}} = \frac{1}{r_{BH}} \sqrt{\frac{m}{c}} \quad (9.8)$$

Пълният качествен фактор може да се определи чрез механичния и електрическият от зависимостта:

$$Q_T = \frac{Q_M Q_E}{Q_M + Q_E} \quad (9.9)$$

**Електрическа мощност**- това представлява мощността, която се разсейва върху активно съпротивление със стойност равна на модула на

номиналният импеданс на високоговорителя, когато върху него е подадено напрежение, равно на напрежението върху входните клеми на високоговорителя. Съгласно това определение, електрическата мощност е равна на:

$$P_E = \frac{U_{ВХ}^2}{|Z_{НОМ}|} \quad (9.10)$$

**Паспортна мощност**-тя е мярка за устойчивост на високоговорителя на електромеханично въздействие и характеризира неговата устойчивост на прегряване и механичната му здравина при продължително (100 часа) натоварване със специален шумов сигнал, чието статистическо разпределение на мощността по честота е подобно на това за усреднен сигнал на музикална и говорна програма. Тази мощност се залага при конструирането на високоговорителя и се проверява от производителя при типови и периодични изпитвания, като за целта на високоговорителя се подава гореспоменатия шумов сигнал със заложената мощност и се оставя да работи в продължение на 100 часа, след което се измерват неговите параметри. Той трябва да ги е запазил, и да не проявява ефекти на звънтене, хриптене и т.н., които биха попречили на нормалното му функциониране. Ефективната мощност на шумовия сигнал, която високоговорителят все още издържа при тези условия, е неговата паспортна мощност.

**Номинална мощност**-обявява се от производителя и представлява мощност, равна на номиналната изходна мощност на усилвателя, с който високоговорителят може да работи продължително време, без в него да настъпят електрически или механични повреди.

**Максимална синусоидална мощност**-това е електрическата мощност на синусоидален сигнал с честота от номиналния честотен обхват, който високоговорителят може да издържи продължително време, без в него да настъпят електрически или механични повреди. Тази мощност може да има различна стойност в отделните подобхвати на номиналния честотен обхват.

**Музикална мощност**-тя характеризира *нискочестотните* високоговорители и се дефинира като максималната синусоидална мощност за честота от номиналния честотен обхват, но под 250 Hz, която високоговорителят може да издържи за кратко време (под 2 секунди) и характеризира неговата възможност да издържа краткотрайни пикови претоварвания.

**Работна мощност**-представлява електрическа мощност, под чието въздействие високоговорителят създава звуково налягане с определена стойност на определено разстояние от работния си център по работната си ос. Тя е свързана с чувствителността на високоговорителя и се използва при измерването на някои параметри като коефициент на хармонични изкривявания и др., и при някои изпитвания на високоговорителите главно от Hi-Fi клас. Тя има различна стойност не само за високоговорителите от различен тип, а и за различните екземпляри от един и същ тип и при използването на работната мощност те се поставят в равни условия.

**Максимална дълговременна мощност**-тя е електрическата мощност на специалния шумов сигнал, описан по-горе, в определен честотен обхват, която високоговорителят издържа без да настъпят необратими механични повреди след 10 цикъла при режим редуващи се 1 min. въздействие на електрическия сигнал следвано от 2 min. изключено състояние. Максималната дълговременна мощност е винаги по-голяма от паспортната мощност на високоговорителя.

**Максимална кратковременна мощност**-представлява електрическата мощност на специален шумов сигнал в определен честотен обхват, която високоговорителят издържа, без да настъпят необратими механични повреди

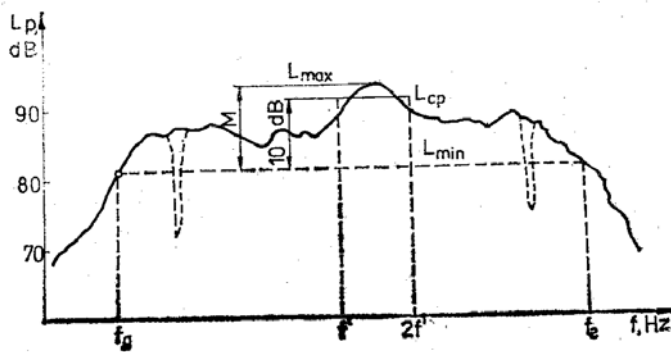
след 60 цикъла при режим 1 с въздействие на електрическия сигнал, следвано от 1 min. изключено състояние. Тази мощност е сходна с максималната дълговременна мощност, но режимът е много по-лек, поради което максималната кратковременна мощност е по-голяма и от паспортната, и от максималната дълговременна мощности.

### 9.2.3. Електроакустични характеристики на високоговорителите

Електроакустичните характеристики определят високоговорителя като източник на звуково поле, а някои от тях определят връзката между входната и изходната величина.

**Честотна характеристика на звуковото налягане** - това е зависимостта на създаваното от високоговорителя звуково налягане от честотата в дадена точка, намираща се на определено разстояние (обикновено един метър) от работния му център и лежаща на работната ос при постоянно напрежение на входните клеми. Най-често тази характеристика се определя по направление на работната ос, но понякога се сменя и под един или друг ъгъл спрямо нея.

Честотната характеристика на високоговорителя се определя в пространство, за което са изпълнени условията за съществуване на



Фиг.9.2

свободно звуково поле т.е. няма отразена звукова вълна и при сферична вълна е спазен законът за затихване на звука обратно пропорционално на разстоянието до звукоизточника.

При такива условия можем да бъдем сигурни, че върху снетата

честотна характеристика не оказват влияние интерференциите между пряката и отразена звукови вълни. Самото на честотната характеристика става, като на входните клеми на високоговорителя се подава синусоиден или шумов сигнал с постоянно напрежение или като се поддържа постоянен протичащия през високоговорителя ток, като се приема, че и в двата случая консумираната мощност зависи от номиналния импеданс на високоговорителя т.е. при определянето на напрежението или токът, които трябва да бъдат поддържани, за да се установи исканата мощност, във формулата се замества стойността на номиналния импеданс. При снемането на честотната характеристика високоговорителят се закрепва на акустичен екран с определени от стандарта размери или върху затворена кутия с определен обем. Примерна честотна характеристика на високоговорител, монтиран върху стандартен акустичен екран, снета с помощта на синусоиден сигнал в условията на свободно звуково поле е показана на фиг.9.2.

**Ефективен обхват на възпроизвеждане** - това е честотния обхват в който високоговорителят преобразува ефективно електрическата енергия, подавана на неговия вход, в енергия на звуковите колебания. Практически той се определя като обхвата, в който честотната характеристика се понижава с не повече от някаква определена стойност

спрямо средната стойност на звуковото налягане в определен честотен обхват. Този обхват обикновено е или октавата с най-голяма чувствителност, или обхвата от 100 до 4000 Hz, или обхвата от 250 до 5000 Hz. Допустимата стойност на понижаване на звуковото налягане е различна за различните категории високоговорители, като за тези от категория Hi-Fi е 8 dB, а при говорителите за обща употреба е от 10 до 14 dB. Някои фирми приемат понижаване с 20 и повече dB, при което така определенния ефективен честотен обхват се разширява, като с това се преследва рекламна цел. За това при сравняване на два високоговорителя по широчина на ефективния честотен обхват трябва да се приема едно и също понижаване, защото в противен случай сравнението не е коректно.

**Долна гранична честота**-това е долната граница на ефективния честотен обхват.

**Горна гранична честота**-горната граница на ефективния честотен обхват.

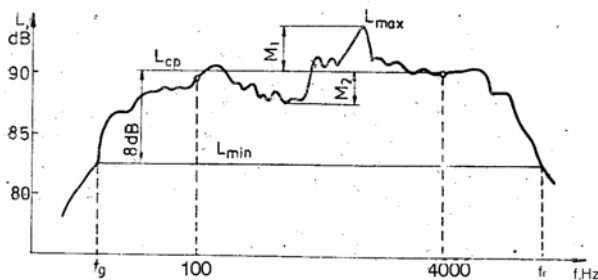
**Номинален честотен обхват**-това е честотния обхват, постоянен за даден тип високоговорител, в който производителя гарантира обявените параметри на изделието. Той е част от ефективния честотен обхват на възпроизвеждане или съвпада с него, като стандартизационните документи изискват границите на номиналния честотен обхват да бъдат от стандартната честотна поредица. Практически след установяване чрез измерване на голям брой високоговорители на най-тесния ефективен честотен обхват, неговите гранични честоти се закръгляват до най-близките честоти от стандартната честотна поредица, намиращи се вътре в него.

**Неравномерност на честотната характеристика**-представлява разликата в нивата на максималното и минимално звуково налягане в даден честотен обхват. Обикновено неравномерността се изразява в децибели и се определя чрез израза:

$$M = L_{\text{MAX}} - L_{\text{MIN}} \quad (9.11)$$

Допустимата неравномерност е свързана с широчината на номиналния честотен обхват и се определя вътре в него, при което пикове и провали с широчина по-малка от 1/8 от октавата не се вземат предвид.

За повечето високоговорители за обща употреба неравномерността



Фиг.9.3

не надвишава 12 dB. За високоговорителите от Hi-Fi клас неравномерността се определя спрямо средното ниво на звуковото налягане, като в този случай има две неравномерности-едната представлява разликата между максималното и средното звуково налягане, а другата е разликата между средното звуково налягане и

минималното. Тогава общата неравномерност е сумата от двете неравномерности:

$$\begin{aligned} M_1 &= L_{\text{MAX}} - L_{\text{CP}} \\ M_2 &= L_{\text{CP}} - L_{\text{MIN}} \end{aligned} \quad (9.12)$$

$$M = M_1 + M_2$$



На фиг.9.3 е показана характеристика на високоговорител от клас Hi-Fi, на която са означени  $L_{MAX}, L_{MIN}, L_{CP}, M_1, M_2$ .

**Средно звуково налягане**-представлява средноквадратичната стойност на създаваното от високоговорителя в дадена точка на свободното звуково поле звуково налягане за даден честотен обхват:

$$p_{cp} = \sqrt{\frac{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots + p_n^2}{n}} \quad (9.13)$$

където:

$p_1, \dots, p_n$  са звуковите налягания за определени честоти, най-често от стандартната честотна поредица.

$n$  е броя честоти, за които са измерени звуковите налягания.

**Чувствителност**-представлява отношението на създаваното от високоговорителя звуково налягане  $p$  на разстояние 1 m по работната ос към корен квадратен от подадената електрическа мощност. Чувствителността представлява мярка за ефективността на преобразуване на електрическата енергия в енергия на звуковото поле и се определя по формулата:

$$A = \frac{p}{\sqrt{P_E}} \cdot \frac{r}{r_0}, Pa/\sqrt{W} \quad (9.14)$$

където:

$A$  е чувствителността,  $Pa/\sqrt{W}$ ;

$r$ -разстоянието, на което е измерено звуковото налягане, m

$r_0$ -реперно разстояние, обикновено 1 m.

Така определената чувствителност се отнася за една честота, или ако на високоговорителя е подаден розов шум с определен честотен обхват, определената чувствителност се отнася за този обхват (обикновено една терца или една октава). При сравняване на два високоговорителя, по-чувствителен е този от тях, който предизвиква по-голямо изменение на създаваното от него звуково налягане при едно и също изменение на подаваната на входа му мощност.

**Характеристична чувствителност**-дефинира се като отношение на средното звуково налягане, създавано от високоговорителя за определен честотен обхват на 1 m от работния център по работната ос, към корен квадратен от стойността на подаваната електрическа мощност:

$$A_x = \frac{p_{cp}}{\sqrt{P_E}} \quad (9.15)$$

Характеристичната чувствителност може да бъде определена както със синусоидален, така и със шумов сигнал. Измерва се в  $Pa/\sqrt{W}$ .

В западната литература обикновено се използва нивото на характеристичната чувствителност, което представлява нивото на средното звуково налягане, създавано на разстояние 1 m при подаване на електрическа мощност 1 W. То се изразява в dB спрямо прага на чуваемост, който, както знаем, е приет за реперно ниво. Означава се с dB/1W/1m.

Често срещана грешка при определянето на нивото на характеристичната чувствителност е определянето му като средно аритметичната стойност на нивата на средното звуково налягане за отделните терци в зададения честотен обхват. Резултата при такова определяне се различава с повече от 30% от правилната стойност, която се получава като нивата на средното звуково налягане за отделните терци се превръщат в съответното звуково налягане, след това се намира

характеристичната чувствителност по формула (9.12) и тогава се намира нивото, съответстващо на така определената стойност.

Честотният обхват, в който се определя характеристичната чувствителност е различен, като съгласно БДС не трябва да бъде по-тесен от две октави. Обикновено се използва обхватът от 250 до 5000 Hz, ако той е включен в ефективния честотен обхват на високоговорителя. При някои високоговорители характеристичната чувствителност се определя за номиналния им честотен обхват.

При сравняване на високоговорители по отношение на тяхната характеристична чувствителност, трябва да се използват едни и същи честотни обхвати, защото в противен случай сравнението няма да бъде коректно поради силната зависимост на характеристичната чувствителност от честотния обхват.

**Характеристика на насоченост на високоговорителите** – представлява зависимостта на звуковото налягане, създавано от високоговорителя за определена честота в точки от пространството, намиращи се на определено разстояние от работния център, от ъгъла, сключен между работната ос и правата, свързваща съответната точка с работния център. Ъгълът  $\Theta_1$ , който обхваща основния лист на диаграмата на насоченост се нарича ъгъл на насочено действие на излъчвателя и се определя по формулата:

$$ka \cdot \sin \Theta_1 = 3,83 \quad (9.16)$$

където:  $k = \omega / c_0$  е вълновото число

$a$  е радиусът на излъчвателя.

Тази формула е валидна, ако при зададената честота  $ka > 3,83$

При  $ka = 3,83$  ъгълът  $\Theta = \pi/2$  и характеристиката на насоченост става косинусоидална (тип осмица). Честотата, която съответствува на тази стойност на  $k \cdot a$  е:

$$\omega_{gp} = 3,83 \frac{c_0}{a} \quad (9.17)$$

и се нарича гранична, защото за честоти по-високи от нея звуковите полета, създавани от задната и предната страна на мембраната не си взаимодействуват даже и когато не са отделени с акустичен екран.

Както се вижда от формула 9.13 с повишаване на честотата, характеристиката на насоченост се "изостря", като намаляването на ъгъла на насоченост зависи от отношението на диаметъра на излъчвателя и дължината на вълната на излъчваното колебание и за това стандартите нормират допустимото изменение на характеристиката на насоченост в рамките на зададен честотен обхват.

**Акустична мощност** – представлява средната по време мощност на излъчвания от високоговорителя сигнал с определена честота. Тя не трябва да се смесва с електрическата мощност, тъй като за всяка честота акустичната мощност представлява електрическата такава, умножена по коефициента на полезно действие на високоговорителя.

Средната акустична мощност представлява средната стойност на акустичната мощност, излъчвана от високоговорителя в определен честотен обхват, като осредняването се извършва по стойностите на акустичната мощност за честоти, равномерно разпределени в логаритмичен мащаб.

**Коефициент на полезно действие** – представлява отношението на излъчената от високоговорителя акустична мощност  $P_{ak}$  към подаваната електрическа мощност  $P_E$  за честота  $f$ :

$$\eta = \frac{P_{ak}}{P_E} \quad (9.18)$$

Среден коефициент на полезно действие се нарича средната стойност на к.п.д. в номиналния честотен обхват на високоговорителя.

**Нелинейни изкривявания** – както вече казахме, високоговорителят не може да бъде абсолютно линеен излъчвател, а в една или друга степен се проявява като нелинеен елемент. Вследствие на това в излъчения акустичен сигнал се появяват честотни компоненти, които не присъстват в спектъра на входния електрически сигнал.

Количествена мярка за нелинейните изкривявания е коефициентът на нелинейни изкривявания, представляващ отношението на спек-тралните съставки в изходния сигнал, породени от нелинейността на преобразуването, към общия изходен сигнал.

Нелинейните изкривявания биват два вида:

*Хармонични изкривявания* – представляват изкривявания на формата на сигнала, при които в изходния сигнал се появяват съставки с честота по-висока от тази на породилия ги сигнал и кратна на нея. Проявяват се независимо от това, дали на входа на високоговорителя е подаден сигнал само с една честота, или с няколко честоти едновременно, но са сравнително по-малко дразнещи, защото се възприемат от ухото като обогатяване на сигнала с обертонове.

*Интермодуляционни изкривявания* – представляват изкривявания, породени от взаимодействието между сигнали с различни честоти, подадени едновременно на входа на високоговорителя. В резултат на това взаимодействие в изходния акустичен сигнал се появяват съставки с честота равна на сумата и разликата на подадените на входа честоти, както и на сумата и разликата на едната и удвоената втора входни честоти, на сумата и разликата на едната и утроената втора входни честоти и т.н., като честотата на тези съставки е както по-висока, така и по-ниска от тази на входните сигнали и при това не кратна на тях. Тези изкривявания са значително по-дразнещи от хармоничните, защото се възприемат от ухото като дисонанс. Както се вижда от определението, те се проявяват само когато на входните клеми на високоговорителя е подаден сигнал, съдържащ повече от една честоти.

Коефициентът на хармонични изкривявания от  $n$ -ти ред за сигнал с честота  $f$  се нарича отношението между звуковото налягане на  $n$ -тата хармонична с честота  $n \cdot f$  и общото звуково налягане:

$$d_{hn} = \frac{p_n}{p} \quad (9.19)$$

Коефициентът на хармонични изкривявания за конкретен високоговорител зависи от мощността и честотата на подадения на входа му сигнал.

*Сумарен коефициент на хармонични изкривявания* се нарича ефективната стойност на всички коефициенти на хармонични изкривявания от  $n$ -ти ред при  $n \geq 2$ :

$$d_h = \sqrt{d_{h2}^2 + d_{h3}^2 + d_{h4}^2 + \dots} = \frac{\sqrt{p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 + \dots}}{p} \quad (9.20)$$

В практиката обикновено  $d_h$  се определя само чрез коефициентите на хармонични изкривявания от втори и трети ред.

Коефициентът на интермодуляционни изкривявания от  $n$ -ти ред  $d_{in}$  представлява отношението между стойността на спектралните съставки на създаваното звуково налягане с честота  $f_2 \pm (n-1)f_1$  при  $n > 1$  и стойността на звуковото налягане с честота  $f_2$  при подаване на входа на високоговорителя едновременно на два сигнала с честоти съответно  $f_1$  и  $f_2$ . Коефициентът на интермодуляционни изкривявания от втори ред  $d_{i2}$  и от трети ред  $d_{i3}$  са съответно:

$$d_{12} = \frac{P_{(f_i-f_i)} + P_{(f_i+f_i)}}{P_{f_i}} \quad (9.21)$$

$$d_{13} = \frac{P_{(f_i-2f_i)} + P_{(f_i+2f_i)}}{P_{f_i}}$$

Сумарният коефициент на интермодуляционни изкривявания се определя от израза:

$$d_i = \sqrt{d_{12}^2 + d_{13}^2} \quad (9.22)$$

**Преходни процеси**-масата на трептящата система на високоговорителя е носител на инертността, вследствие на която движението на мембраната закъснява спрямо появата или изчезването на движещата сила. Времето на това закъснение представлява продължителността на преходните процеси и представлява важна характеристика на високоговорителя от която до голяма степен зависи естествеността на звучането. Това е така, защото високоговорителя нормално функционира в преходен режим. Опитно е установено, че преходните процеси се усещат, когато тяхната продължителност надмине 7 mS за честотите около 100 Hz и 0,2 mS при по-високите честоти.

Обикновено за преходните процеси на високоговорителите се съди по начина на възпроизвеждане на правоъгълен сигнал, или на пакет синусоиди с обвиваща крива с правоъгълна форма.

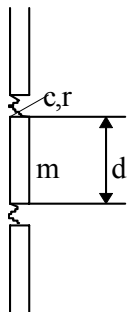
**Еквивалентен обем на високоговорителя**-представлява затворения обем въздух, който възбуден през площ, равна на звукоизлъчващата повърхност на дадения високоговорител, би имал същата гъвкавост, както окачането на високоговорителя. Използува се при оразмеряването на озвучителни тела.

### 9.3.ЕЛЕКТРОДИНАМИЧНИ ВИСОКОГОВОРИТЕЛИ

#### 9.3.1.Обща теория на електродинамичните високоговорители

Тъй като електродинамичният високоговорител представлява електроакустична система, в която второто звено е електромеханичен преобразувател-двигател от електродинамичен тип, неговия принцип на действие и най-общото принципно устройство отговарят на разгледаните в глава 7 такива преобразуватели. Както често в електрониката, най-целесъобразно е да разглеждаме звената в обратен ред, започвайки от акустичната антена, зашито звената, които са по-близо до изхода формират товара на предишните стъпала, в резултат на което много понятия се дефинират в първите, а се използват и във вторите.

Четвъртото звено-**акустичната антена**-формира товарът на третото звено и характеристиката на насоченост и при високоговорителите с директно излъчване това е самата мембрана, а при рупорните говорители- предрупорната камера и рупорът.Трябва да се отбележи, че това звено не зависи от принципа на преобразуване на електрическата енергия в акустична и за това изводите, които ще направим за него са общи за всички типове високоговорители от класификацията според принципа на действие.



При разглеждането мембраната може да бъде третирана като плосък бутален излъчвател, монтиран на безкраен екран (фиг.9.4), при което ще бъдат направени следните допускания:

-механичната система на мембраната се състои от маса  $m$ , гъвкавост  $c$  и активно съпротивление  $r$ , като последното

Фиг.9.4 обикновено е твърде малко и може да бъде пренебрегнато.  
-мембраната има формата на абсолютно твърд диск  $s$

диаметър  $d$ , който трепти само в посока, перпендикулярна на неговата равнина.

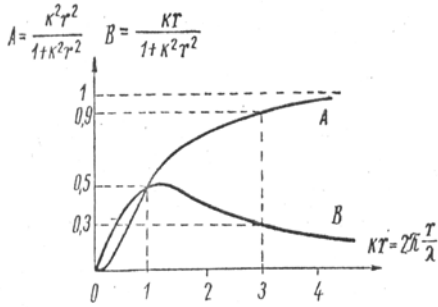
-екранът, гънката и мембраната са звуконепроницаеми.

Ако със  $Z_R$  означим импедансът на излъчване (т. е. противодействието на газовата среда върху цялата трептяща система) а  $\Gamma_R, X_R$  са неговата активна и реактивна съставки, може да се докаже, че:

$$z_R = 2\rho_s c_0 (A + jB) \quad (9.23)$$

където  $A$  и  $B$  са коефициенти, чиято честотна зависимост е дадена на фиг. 9.5

Трябва да се отбележи, че  $A$  и  $B$  зависят не само от честотата, но и от отношението на диаметъра на буталния излъчвател и дължината на вълната на излъчваното колебание.



Фиг. 9.5

Нека разгледаме как се изменят  $A$  и  $B$  за два характерни случая:

1.  $d < \lambda$

При този случай :

$$A \approx \frac{d^2}{8c_0^2} \omega^2 \quad (9.24)$$

Тогаво активната съставка на  $z$  е:

$$r_R = \frac{\pi \rho_s}{16 c_0} d^4 \omega^2 \quad (9.25)$$

Най-високата честота, до която е валидна тази формула се ограничава от условието  $d < 0,45\lambda$ .

$$B = \frac{4}{3\pi} \frac{d}{c_0} \omega \quad (9.26)$$

Реактивната съставка става:

$$x_R = \frac{2}{3} \rho_s d^3 \omega \quad (9.27)$$

Формулата е валидна, докато  $d < 0,375\lambda$ .

Както вече беше споменато, тази реактивна съставка има характер на маса и се нарича присъединена маса:

$$m_R = \frac{2}{3} \rho_s d^3 \quad (9.28)$$

2.  $d \gg \lambda$ .

В този случай  $A \rightarrow 1, B \rightarrow 0$ . Тогаво:

$$r_R \approx 2\rho_s c_0 S \quad (9.29)$$

а реактивната съставка клони към нула.

Характеристиката на насоченост на един бутален излъчвател, монтиран на безкраен екран се дефинира, както вече беше споменато, като отношението на звуковото налягане под определен ъгъл спрямо оста на излъчване към звуковото налягане по оста на излъчване:

$$G_{(\Theta)} = \frac{P_{0(\Theta)}}{P_0} = 2 \frac{I_1\left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \Theta\right)}{\pi \frac{d}{\lambda} \sin \Theta} \quad (9.30)$$

където  $I_1(X)$  е цилиндрична функция от първи ред на аргумента  $X$ .

От тук можем да направим следните изводи:

1) Когато размерите на излъчвателя са малки по отношение на дължината на вълната на излъчваното колебание, излъчването е ненасочено.

2) С увеличаването на честотата аргументът на цилиндричната функция започва да нараства и когато стойността му стане равна на някой от корените на функцията, а те са 3,83; 7,02; 10,2; 13,3; 16,5 и т. н., цилиндричната функция става равна на 0 и с нея се нулира и излъчваната енергия т.е. в тези посоки в характеристиката на насоченост се получават провали. Трябва да отбележим, че аргументът зависи от два фактора-отношението на дължината на вълната към диаметъра на излъчвателя, и от синуса на ъгъла  $\Theta$ . При повишаване на честотата първата нула се появява при ъгъл  $\Theta = 90^\circ$  и когато дължината на вълната е  $\lambda = 0,82d$ . Когато честотата нараства още, се получава нула при по-малки стойности на ъгъла и втора нула пак при  $\Theta = 90^\circ$  и т.н., като характеристиката става все по-насочена. Тъй като силната насоченост на високоговорителя се явява недостатък, понеже на различен ъгъл спрямо оста на излъчване слушателят би възприемал звука с различна окраска вследствие на промяната на честотната характеристика, стремежът на конструкторите е тази насоченост се намали. Един от начините е използването на мембрани с по-малък диаметър при високочестотните високоговорители. Това обаче не може да бъде универсално решение, понеже чувствителността на високоговорителя е пропорционална на квадрата от площта на мембраната. Друг начин за намаляване на насочеността е използването на акустични лещи, които бяха разгледани в раздел 1.

Поради ниската стойност на съпротивлението на излъчване, което е причина за импедансна несъгласуваност на мембраната на високоговорителя и средата при високоговорителите с директно излъчване, те имат много нисък коефициент на полезно действие. За неговото увеличаване се използва рупорната антена. По определение, рупорът представлява гладка тръба с плавно увеличаващо се по определен закон сечение. Повишаване на КПД може да се получи, ако са налице следните предпоставки:

1) Входното съпротивление на рупора да има активен характер и да бъде независимо от честотата.

2) Да няма отражение на звуковата вълна от изходния отвор.

Съществуват много разновидности на рупори в зависимост от закона за изменение на сечението с разстоянието. Те могат да се разделят на две големи групи. Първата група включва семейството рупори на Бесел, чиято форма се описва с помощта на степенни функции от вида:

$$S = S_0(1 + \alpha_n x)^n \quad (9.31)$$

Където  $n$  е цяло число, изразяващо степента на функцията  
 $x$  е разстоянието от началото на рупора

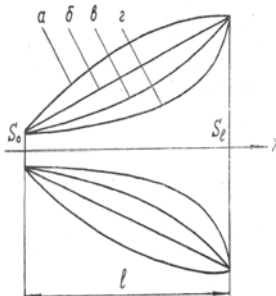
$$\alpha_n l = \sqrt[n]{\frac{S_l}{S_0}} - 1 \text{ е коефициент.}$$

Като частни случаи на този вид рупори са *параболичния*, получаващ се при  $n=1$  и *коничния*, получаващ се при  $n=2$ . При  $n \rightarrow \infty$  степенния рупор се превръща в експоненциален.

Другото семейство рупори се определя от функцията:

$$S = S_0(\text{ch} \delta x + \text{sh} \delta x)^2 \quad (9.32)$$

Този вид рупори се наричат *хиперболични*. Коефициентите  $\delta$  и  $g$  се наричат съответно коефициент на разширението и коефициент на формата на рупора. При  $g=0$  се получава така наречения катеноидален рупор, а при  $g=1$  се получава



а-параболичен рупор  
 б-коничен рупор  
 в-експоненциален рупор  
 г-катеноидален рупор

Фиг.9.6

отново експоненциален рупор, който е граничен между двете семейства рупори. Различните форми на рупорите е показана на фиг.9.6.

Зависимостта на сечението на експоненциалните рупори от разстоянието е:

$$S = S_0 e^{\delta x} \quad (9.33)$$

Тук  $\delta$  е коефициент на разширение на рупора.

$x$  е координатата по оста на рупора, като за начало е приет входа.

Решението на уравнението на разпространението съдържа две звукови вълни, като едната се разпространява от началото на рупора навън, а другата - в обратна посока:

$$p = e^{-\frac{\delta}{2}x} \left[ A_1 e^{j\left(\omega t - x\sqrt{k^2 - \frac{\delta^2}{4}}\right)} + A_2 e^{j\left(\omega t + x\sqrt{k^2 - \frac{\delta^2}{4}}\right)} \right] \quad 9.34 \quad \text{Където} \quad k = \frac{\omega}{c_0} \quad \text{е} \quad \text{вълновото}$$

число.

Трябва да отбележим, че горният израз е в сила за честотите, за които  $k^2 > \frac{\delta^2}{4}$ .

Ако разгледаме рупор без отражение от изходното отворствие, което е в сила за безкраен по дължина рупор, вторият коефициент  $A_2 = 0$ . Коефициентът  $A_1 = p_m$  представлява амплитудата на звуковото налягане на вълната, разпространяваща се в права посока. Следователно изразът за звуковото налягане в рупора при отсъствие на отражение от изхода е:

$$p = p_m e^{-\frac{\delta}{2}x} e^{j\left(\omega t - x\sqrt{k^2 - \frac{\delta^2}{4}}\right)} \quad (9.35)$$

От тук могат да бъдат направени следните изводи:

1) Амплитудата на звуковото налягане  $p_m e^{-\frac{\delta}{2}x}$  е функция на разстоянието от началото на рупора  $x$ .

2) Звуковото налягане се разпространява в пространството, тъй като аргументът на функцията е от вида  $\left(\omega t - x\sqrt{k^2 - \frac{\delta^2}{4}}\right)$ .

3) Скоростта на разпространение на звуковата вълна в рупора  $c_0'$  зависи от честотата и показателя на разширение на рупора  $\delta$ :

$$c_0' = \frac{c_0}{\sqrt{1 - \frac{\delta^2 c_0^2}{4\omega^2}}} \quad (9.36)$$

Акустичният импеданс на средата е:

$$z_0 = \frac{p}{v} = \left[ \sqrt{1 - \frac{\delta^2 c_0^2}{4\omega^2}} + j \frac{\delta c_0}{2\omega} \right] \rho_s c_0 \quad (9.37)$$

Както се вижда от този израз, акустичният импеданс на рупора има активна и реактивна съставка, които зависят от показателя на разширение и от честотата, но не зависят от  $x$ , от където можем да направим извода, че за даден рупор при определена честота акустичното съпротивление е еднакво във всички точки на рупора.

Активната съставка на акустичния импеданс зависи от израза под корена. Вижда се, че при увеличаване на честотата той клони към единица, а от там активната съставка клони към  $\rho_s c_0$  т.е. към акустичното

съпротивление на плоска звукова вълна. С намаляване на честотата подкоренната величина монотонно намалява, като за една честота тя става равна на нула. Тази честота се нарича критична, а съответната ъглова скорост е:

$$\omega_{\text{кр.}} = \frac{\delta c_0}{2} \quad (9.38)$$

Когато честотата стане по-малка от критичната, подкоренната величина става отрицателна и следователно акустичното съпротивление става чисто реактивно, при което трептящото бутало в гърлото на рупора престава да излъчва звукова енергия в него. За честоти по-големи от критичната активната съставка бързо нараства и тогава буталото започва да излъчва енергия в рупора. Следователно, за да се излъчват звукови вълни с ниска честота в рупора, той трябва да има ниска критична честота, а за целта показателят на разширяването на рупора трябва да бъде малък.

Реалните рупори не са безкрайни и при тях се получават отражения от изходното отворение, като в резултат на сумирането на правата и отразената вълна се увеличава неравномерността на честотната характеристика на рупорния високоговорител. При определени съотношения

между дължината на рупора  $l$  и величината  $k_x = \sqrt{k^2 - \frac{\delta^2}{4}}$  настъпват резки изменения в стойността на входното съпротивление на рупора. При изпълнение на условието  $k_x l = n\pi$ , където  $n$  е произволно цяло число, входното съпротивление на рупора е по-малко от това на безкрайния рупор.

Ако сравним честотните характеристики на безкрайния и краен по размери рупор ще видим, че колкото по-къс е един рупор, толкова по-дълбоки стават провалите и по-високи пиковете в честотната характеристика, като от друга страна при по-късите рупори пиковете и провалите се разреждат и са на по-големи честотни интервали.

Поради несъгласуваност на вълновите съпротивления на рупора и неговия товар (околното пространство) на изхода му се получава скок на звуковото налягане. За да се предотврати образуването на стоящи вълни в рупора се избира максималния възможен напречен размер на изхода  $2r_{\text{изх}}$ , като:

$$r_{\text{изх}} = \frac{\lambda_n}{2\pi} \quad (9.39)$$

Където  $\lambda_n$  е дължината на вълната на най-ниската честота, излъчвана от рупора  $f_n \approx 1,2f_{\text{кр.}}$

Тогава максималния показател на нарастване е:

$$\delta_{\text{max.}} = \frac{4\pi f_{\text{кр.}}}{c_0} \quad (9.40)$$

А дължината на рупора е:

$$l = \frac{1}{\delta} \ln \frac{r_{\text{изх}}^2}{r_{\text{вх}}^2} \quad (9.41)$$

Насочеността на рупорните високоговорители се подчинява на същите закономерности, както и при тези с директно излъчване, като вместо диаметър на мембраната се използва диаметър на излъчващия отвор на рупора.

Третото звено – **механо-акустичния преобразувател** – представлява мембраната. Тя превръща механичните колебания на твърдо свързаната с нея звукова бобина, в акустични колебания на средата. Както виждаме, при високоговорителите с директно излъчване, физическият елемент,



изпълняващ ролята на трето и четвърто звено е един и същ, но в двата случая участват различни негови характеристики. При рупорните високоговорители физическите елементи, формиращи двете звена са различни.

Амплитудата на колебателната скорост на плосък бутален излъчвател, монтиран върху безкраен екран е:

$$v_m = \frac{F_m}{\sqrt{r_R^2 + \left[ \omega(m + m_R) - \frac{1}{\omega c} \right]^2}} \quad (9.42)$$

където  $F_m$  е амплитудата на силата, действаща върху трептящата система.

Средната акустична мощност на един такъв излъчвател е:

$$P_{cp.} = \frac{1}{2} v_m^2 r_R = \frac{F_m^2 r_R}{r_R^2 + \left[ \omega(m + m_R) - \frac{1}{\omega c} \right]^2} \quad (9.43)$$

От тук се вижда, че най-голяма ще бъде акустичната мощност при честотата, за която се анулира реактивната съставка. Това става на резонансната честота. Физикално това се обяснява с факта, че тогава силите, които действуват върху масата и гъвкавостта се уравниават взаимно и електродинамичната сила се използва изцяло за преодоляване на съпротивлението на излъчване:

$$P_{cp.max} = \frac{1}{2} \frac{F_m^2}{r_R} \quad (9.44)$$

Този случай в аудиотехниката е много рядък, защото означава, че високоговорителя ще работи само на една честота. За да се получи честотна независимост на средната акустична мощност в някакъв широк честотен обхват, трябва да са изпълнени следните условия:

1) Когато излъчвателя работи над резонансната си честота. В такъв случай:

$$\omega(m + m_R) > \frac{1}{\omega c} \quad (9.45)$$

2) когато е изпълнено условието:

$$\omega(m + m_R) > r_R \quad (9.46)$$

В този случай преобразуването не е ефективно, тъй като по-голямата част от силата се използва за разтрептяване на масата, а по-малката част-за преодоляване на съпротивлението на излъчване.

3) Когато диаметърът на излъчвателя е по-малък от дължината на излъчваната вълна.

Тогава излъчваната средна акустична мощност е:

$$P_{cp.} = \frac{\pi \rho_s}{32 c_0} \frac{F_m^2 d^4}{(m + m_R)^2} \quad (9.47)$$

От изложеното по-горе се вижда, че честотния обхват, в който средната акустична мощност е постоянна е с долна гранична честота, определена от първото условие:

$$f_{д.г.} > f_l = \frac{1}{2\pi\sqrt{(m + m_R)c}} \quad (9.48)$$

и горна гранична честота, определена от третото условие:

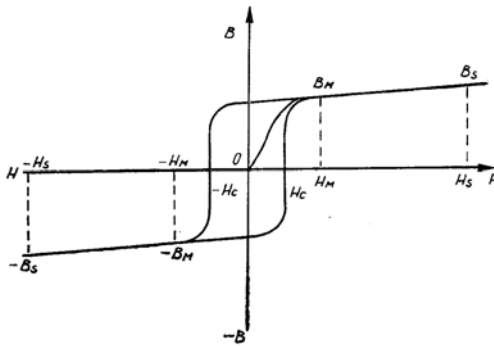
$$f_{г.г.} < \frac{\sqrt{2} c_0}{\pi d} \quad (9.49)$$

За честотите под долната гранична честота излъчваната средна акустична мощност намалява пропорционално на четвъртата степен на

честотата или звуковото налягане спада с 12 dB/oct, а за честотите над горната гранична честота излъчваната средна акустична мощност намалява пропорционално на квадрата на честотата, или звуковото налягане спада с 6 dB/oct.

Второто звено - **електромеханичният преобразувател** - е съставено от магнитна система, чието предназначение е да създаде силно постоянно магнитно поле в магнитната междина, и звукова бобина, която е разположена в това поле. През нея протича входния ток и в резултат на взаимодействието на магнитното поле на този ток и постоянното магнитно поле възниква електродинамичната сила, която е приложена върху звуковата бобина. Последната е механически твърдо свързана с мембраната, поради което електродинамичната сила въздейства и върху последната, и въпреки, че мембраната е елемент от следващото звено - механо-акустичния преобразувател, чрез своята маса тя участва и в звеното електромеханичен преобразувател. Звуковата бобина, мембраната и свързаните с тях елементи като трептилка, гънка и шапка образуват трептящата система, характеризираща се с определена маса и гъвкавост на окачването, като последната зависи от конструкцията и материала на гънката и трептилката.

Както ни е известно от гл.7, силата, получена в резултат на електромеханичното преобразуване е  $F = Bli$ . Следователно, за получаване на максимална сила при определени дължина на проводника и сила на тока, е нужно напрегнатостта на магнитното поле във въздушната междина да има максимална стойност, като при това е желателно масата на магнита да бъде колкото може по-малка. В съвременните високоговорители се използват изключително само магнитни системи с постоянни магнити, тъй



Фиг.9.7.

като един електромагнит изисква постояннотоково захранване и по този начин намалява КПД на системата и усложнява неговата конструкция, а съвременните магнитно твърди материали се отличават с достатъчно голяма стабилност във времето и запазват значително количество магнитна енергия.

Нека разгледаме някои основни понятия и зависимости, свързани с магнитното поле и постоянните магнити. Магнитното поле се характеризира с така наречената

напрегнатост, която се определя от отношението:

$$H = \frac{B}{\mu_0} \text{ [A/m]} \quad (9.50)$$

Където  $B$  е магнитната индукция, а  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \right]$  - магнитната проницаемост на вакуума.

Магнитния момент на едно тяло, отнесен към неговия обем, определя неговата намагнитеност:

$$J = \frac{M}{V} \quad (9.51)$$

Магнитната индукция, напрегнатостта на магнитното поле и намагнитеността са взаимно свързани, което се изразява с уравнението:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + J) = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (9.52)$$

Тук  $\chi$  се нарича магнитна възприемчивост на веществото, а

$\mu$  - магнитна проницаемост.

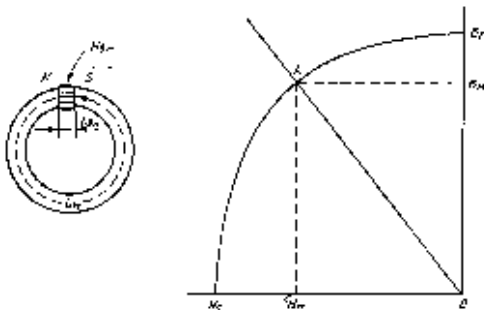
Величината:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi \quad (9.53)$$

се нарича *относителна магнитна проницаемост на веществото*. При феромагнитите има две особености. Първата е, че  $\mu \gg \mu_0$  и освен това  $\mu$  зависи от интензитета на полето и от предишното магнитно състояние на феромагнетика. Границата на стойността на магнитната проницаемост, клоняща към нула при дадена стойност на магнитното поле се нарича *начална магнитна проницаемост* ( $\mu_n$ ). При увеличаване на напрегнатостта на полето до определена стойност проницаемостта расте до своята максимална стойност и при по-нататъшно увеличение на полето тя намалява, стремейки се към единица.

Втората отличителна особеност на феромагнитните материали е техния хистерезисен цикъл. Той представлява изменението на индукцията при една и съща напрегнатост на магнитното поле, като функцията от магнитното поле, въздействувало по-рано върху феромагнетика (фиг.9.7). Площта, заградена от хистерезисния цикъл се нарича *хистерезисна област*, а точките, в които хистерезисният цикъл пресича координатните оси, определят остатъчната индукция  $B_r$  и коерцитивната сила  $H_c$ . Върховете на хистерезисния цикъл определят други два основни параметъра на феромагнетика - индукцията на насищане  $B_s$  и напрегнатостта на насищане на полето  $H_s$ .

Когато един постоянен магнит е намагнитен до насищане, ако той е затворен пръстен, стойността на магнитната индукция върху размагнитващата му крива съвпада с остатъчната индукция  $B_r$  (фиг.9.8). Ако разрежем пръстена, създавайки по този начин въздушна междина, полученото поле ще размагнити до определена степен магнита и стойността на  $B$  ще се придвижи към по-малка стойност, например  $B_m$ ,



Фиг.9.8

отговаряща на точка А. Преди създаването на въздушната междина магнито-движещата сила е:

$$F_M = I_M \cdot H_M \quad (9.54)$$

Тук  $H_M$  е напрегнатостта на магнитното поле, измерваща се в

A/m, а  $I_M$  е дължината на магнита.

Създадената въздушна междина също притежава свое магнитно поле, за което магнитодвижещата сила  $F_{BM}$  е:

$$F_{BM} = H_{BM} \cdot l_{BM} \quad (7.55)$$

Където  $H_{BM}, l_{BM}$  са съответно напрегнатостта на магнитното поле и дължината на въздушната междина.

Тъй като магнитните силови линии са непрекъснати, то за един затворен пръстен сумата от магнитодвижещите сили е:

$$F_M + F_{BM} = 0 \quad (9.56)$$

Или

$$H_M \cdot l_M = -H_{BM} \cdot l_{BM} \quad (9.57)$$

Ако приемем, че нямаме разсейване, тогава магнитните потоци в магнита и въздушната междина също са равни:

$$\Phi_M = \Phi_{BM}$$

или

$$S_M B_M = S_{BM} B_{BM}$$

От тук можем да определим напрегнатостта на полето и индукцията във въздушната междина:

$$H_{BM} = -\frac{H_M I_M}{I_{BM}}$$

$$B_{BM} = \frac{B_M S_M}{S_{BM}}$$

Освен това :

$$B_{BM} = \mu_0 H_{BM}$$

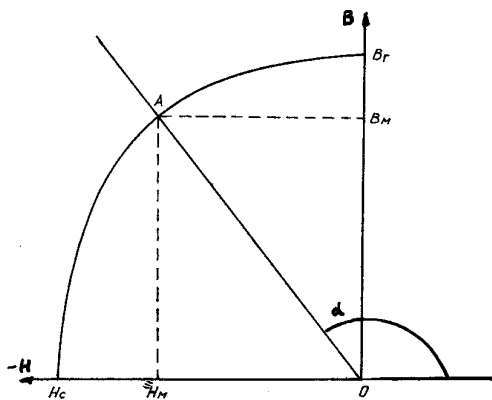
От тук получаваме:

$$\frac{B_M S_M}{S_{BM}} = \mu_0 \left( -\frac{H_M I_M}{L_{BM}} \right)$$

или

$$B_M = -\mu_0 \frac{S_{BM} I_M}{S_M I_{BM}} H_M$$

Една от основните задачи при конструирането на магнитни системи е да се намери работната точка на магнита. Тя представлява пресечната точка на размагнитващата крива и една права, прекарана под ъгъл  $\alpha$  от началото на координатната система (фиг.9.9), като ъгълът се определя от уравнението:



Фиг.9.9

$$\operatorname{tg} \alpha = -\mu_0 \frac{S_{BM} I_M}{S_M I_{BM}}$$

Стойностите на  $B_M, H_M$  за работната точка се означават с  $H_0, B_0$ .

В разглеждането до тук не включвахме детайлите на магнитопровода. За отчитане на тяхното влияние ще въведем два коефициента. Първият от тях е коефициентът на използване на магнитодвижещата сила  $\tau$ :

$$\tau = -\frac{H_{BM} I_{BM}}{H_M I_M}$$

Нека се върнем към формула 9.57 и да включим в нея

магнитодвижещата сила в магнитопровода:

$$H_M I_M + H_{BM} I_{BM} + H_{Fe} I_{Fe} = 0$$

при което:

$$H_{Fe} I_{Fe} = \sum_{i=1}^n H_{Fe_i} I_{Fe_i}$$

В практиката  $H_{Fe} I_{Fe} \approx (0,08-0,03) H_M I_M$ , ако детайлите на магни-топровода не са наситени. Последното е вярно, ако  $B_{Fe} < 1T$  при детайли, изработени от Ст.3 и Ст.10, или ако  $B_{Fe} < 1,4T$  при детайли от електротехническо желязо (Армко), или  $B_{Fe} < 2,1T$  за детайли изработени от специална желязно-кобалтова сплав. Стойността на  $\tau$  варира от 0 до 1, като тя е 0 при  $I_{BM} = 0$  и става равна на 1, когато  $H_{Fe} I_{Fe} = 0$ .

Вторият коефициент е коефициентът на използване на магнитния поток  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{\Phi_{BM}}{\Phi_M} = \frac{B_{BM} S_{BM}}{B_M S_M} \quad (9.66)$$

Практическите стойности на този коефициент се движат от 0,2 до 0,7.

От формули 7.51 и 7.54 можем да определим напрегнатостта и магнитната индукция:

$$H_{BM} = -\tau \frac{H_M I_M}{I_{BM}} \quad (9.67)$$

$$B_{BM} = \sigma \frac{B_M S_M}{S_B}$$

Замествайки във формула 7.48 получаваме:

$$\sigma \frac{B_M S_M}{S_{BM}} = \mu_0 \left[ -\tau \frac{H_M I_M}{I_{BM}} \right] \quad (9.68)$$

или

$$B_M = -\mu_0 \frac{\tau S_{BM} I_M}{\sigma S_M I_{BM}} H_M$$

Както в предишния случай работната точка е пресечната точка на размагнитващата крива и правата, сключваща ъгъл  $\alpha$  с оста  $H$  и минаваща през началото на координатната система (фиг.9.9):

$$\operatorname{tg} \alpha = -\mu_0 \frac{\tau S_{BM} I_M}{\sigma S_M I_{BM}} \quad (9.69)$$

По-лесно се работи с допълващия ъгъл:

$$\operatorname{tg}(180^\circ - \alpha) = \operatorname{tg} \beta = \mu_0 \frac{\tau S_{BM} I_M}{\sigma S_M I_{BM}} \quad (9.70)$$

Магнитната система представлява магнитна верига и въздушната междина, както и детайлите на магнитопровада се характеризират със своята магнитна проводимост  $G$ . Общата магнитна проводимостта е равна на сумата от проводимостите на отделните участъци:

$$G = \sum G_i = G_{BM} + \sum G_{pi} \quad (9.71)$$

Където  $G_{BM}$  е магнитната проводимост на въздушната междина, а  $G_{pi}$  са магнитните проводимости на отделните участъци на магнитопровада.

Магнитния поток в магнита е:

$$\Phi_M = B_{M_{opt}} S_M = H_{M_{opt}} I_M \sum G_i \quad (9.72)$$

От друга страна:

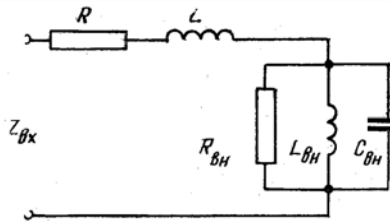
$$\frac{B_{M_{opt}}}{H_{M_{opt}}} = \operatorname{tg} \beta_{opt} = \frac{I_M}{S_M} \sum G_i \quad (9.73)$$

Тук трябва  $I_M, S_M, \sum G_i$  така да се подберат, че ъгълът  $\beta = \beta_{\text{опт}}$  т.е. произведението  $ВМ.НМ$  да добие своята максимална стойност.

Този метод за определяне на параметрите на работната точка се нарича метод на Еверщед-Пику.

Диаметърът на сърцето се определя от условието индукцията в него да бъде по-малка от тази на насищане, като вземем пред вид, че целия поток минава през него:

$$D_C = \sqrt{\frac{1}{\sigma} \frac{B_{\text{сп}} S_0}{\pi B_{\text{нас}}}} \quad (9.74)$$



Фиг.9.10

Тук  $B_{\text{сп}}$  е индукцията във въздушната междина, усреднена по височината на звуковата бобина.

$S_0$  е лицето на страничната повърхност на бобината.

$B_{\text{нас}}$  е индукцията на насищане на материала на сърцето.

Първото звено на електродинамичните високоговорители - **електрическата схема** - определя вида на входния импеданс, който

е:

$$Z_{\text{вх}} = Z + Z_{\text{вн}} = Z + \frac{|k^2|}{z + z_T} \quad (9.75)$$

Входния импеданс при застопорена трептяща система  $Z$  при този вид високоговорители има индуктивен характер, дължащ се на звуковата бобина:

$$Z = R + j\omega L \quad (9.76)$$

където:  $R$  е активното съпротивление на проводника, от който е навита бобината плюс активните загуби от токове на Фуко в магнитопровода и загубите от скин ефект в проводника при високите честоти. Последните два вида загуби са честотно зависими.

$L$  е индуктивността на бобината.

Механичният импеданс на трептящата система (без нейния товар)  $z$  се определя от активното съпротивление на загубите в окачването  $\Gamma_{\text{тр.с.}}$ , масата на трептящата система  $m_{\text{тр.с.}}$  и нейната гъвкавост  $C_{\text{тр.с.}}$ :

$$z = \Gamma_{\text{мп.с.}} + j\omega m_{\text{мп.с.}} + \frac{1}{j\omega c_{\text{мп.с.}}} \quad (9.77)$$

Този импеданс отразява влиянието на второто звено на системата (електромеханичния преобразувател)- върху първото звено (електрическата схема).

Товарът на механичната трептяща система- $z_T$  е механичното съпротивление, което въздухът оказва на трептящата система и отразява влиянието, което третото звено (акустико-механичния преобразувател) оказва върху първото звено.

$$z_T = \Gamma_R + j\omega m_R \quad (9.78)$$

Тук  $\Gamma_R$  е активното съпротивление, което въздухът оказва на трептящата система.

$m_R$  е присъединената маса въздух, зависи от геометричните размери на мембраната и акустичното оформление. Физически представлява масата на един слой въздух, намиращ се непосредствено до мембраната, който се движи заедно с нея при колебателното и движение.

Като се заместят горните изрази във формула 9.75 и като имаме пред вид, че коефициентът на електромеханична връзка  $k=Bl$ , получаваме следния израз за входния импеданс на електродинамичния високоговорител:

$$Z_{\text{вх}} = R + j\omega L + \frac{1}{\frac{r_{\text{мп.с.}} + r_{\text{R}}}{B^2 l^2} + j\omega \frac{m_{\text{мп.с.}} + m_{\text{R}}}{B^2 l^2} + \frac{1}{j\omega c_{\text{мп.с.}} B^2 l^2}} \quad (9.79)$$

Електрическата заместваща схема на електродинамичния високоговорител, съответстваща на формула 9.79 е дадена на фиг.9.10, като в нея на масата съответствува внесения капацитет, а на гъвкавостта-внесената индуктивност.

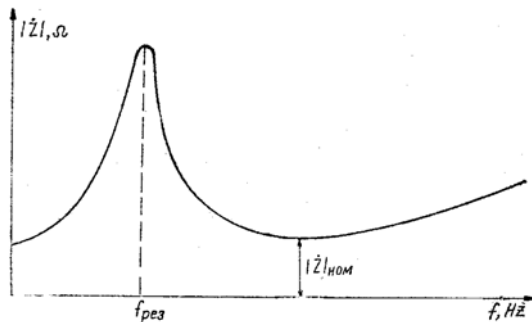
Елементите имат следните стойности:

$$R_{\text{вн}} = \frac{B^2 l^2}{r_{\text{мп.с.}} + r_{\text{R}}} \quad (9.80)$$

$$L_{\text{вн}} = c_{\text{мп.с.}} B^2 l^2$$

$$C_{\text{вн}} = \frac{m_{\text{мп.с.}} + m_{\text{R}}}{B^2 l^2}$$

Общия ход на импедансно-честотната характеристика на електродинамичен високоговорител е дадена на фиг.9.11



Фиг.9.11

$$Z_{\text{рез}} = Z_{\text{вн}} \approx R + R_{\text{вн}} \quad (9.81)$$

В случая е пренебрегнат импеданса на звуковата бобина, който за ниски честоти е много малък, и за това е поставен знакът  $\approx$ . В обхвата от честоти под  $f_0$  импедансът има индуктивен характер и напрежението изпреварва тока по фаза, като при  $f=f_0$  фазовата разлика става равна на 0.

При повишаване на честотата над  $\omega_0$  импедансът на внесения капацитет постепенно става значително по-малък от този на внесената индуктивност, при което последния може да се пренебрегне. За тези честоти се образува един последователен трептящ кръг, съставен от L и  $C_{\text{вн}}$ , чиято резонансна честота е:

182

$$\omega'_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC_{\text{вн}}}} \quad (9.82)$$

Входния импеданс на тази честота за практическите конструкции е:

$$Z_{\text{вн}} = R + \frac{L}{C_{\text{вн}} R_{\text{вн}}} \quad (9.83)$$

Този импеданс е минималния импеданс на високоговорителя и съвпада с номиналния. Практически:

$$Z_{\text{НОМ}} \approx 1,2R \quad (9.84)$$

В честотния обхват между  $f_0$  и  $f'_0$  импедансът има капацитивен характер, при което токът изпреварва по фаза напрежението, като за честотата  $f'_0$  фазовата разлика отново става равна на 0.

За честотите над  $f'_0$  импедансът на  $C_{\text{вн}}$  клони към 0 и тогава входният импеданс става равен на импеданса на звуковата бобина:

$$Z_{\text{вх}} = Z = R + j\omega L \quad (9.85)$$

Това довежда до плавно нарастване на входния импеданс в този обхват с увеличаване на честотата.

Ако  $i$  е ефективната стойност на тока през звуковата бобина, то съответните мощности са:

$$\begin{aligned} P_{\text{в.г.}} &= i^2 Z \\ P_{\text{вс.}} &= i^2 (R_i + Z) \end{aligned} \quad (9.86)$$

Тогава:

$$\eta_{\text{ел}} = \frac{Z}{R_i + Z} \quad (9.87)$$

Имайки пред вид честотната зависимост на  $Z$ , за да имаме честотно независим коефициент на използване на изходната мощност на усилвателя, трябва  $R_i \ll Z$  т.е. изходното съпротивление на усилвателя да бъде много малко, което в съвременните усилватели се постига чрез използването на дълбоки отрицателни обратни връзки.

Коефициентът на полезно действие на електродинамичните високоговорители е зависи от всички звена на високоговорителя и е:

$$\eta = 1,2 \frac{\rho_s}{\pi c_0} \frac{B_{\text{вм}}^2 V_{\text{пр}}}{\rho_{\text{ел}}} \left( \frac{S}{m_d} \right)^2 \quad (9.88)$$

Тук  $V_{\text{пр}}$  е обемът на медта на звуковата бобина в работния въздушен обем.  $\rho_{\text{ел}}$  е специфичното електрическо съпротивление на проводника на звуковата бобина.

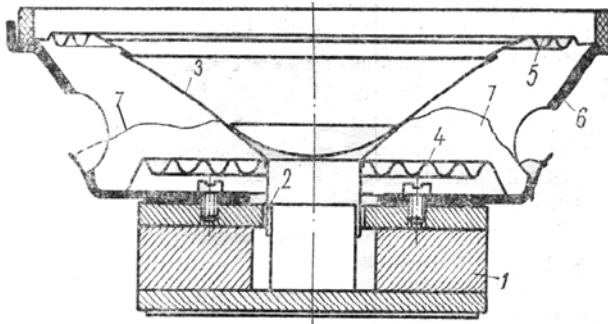
$m_d$  е динамичната маса на мембраната, включваща и присъединената маса въздух.

$S$  е площта на излъчване на високоговорителя.

### 9.3.2. Видове електродинамични високоговорители

Практическите конструкции на електродинамични високоговорители с директно излъчване биват два основни вида:

*Електродинамичен високоговорител с подвижна бобина* - при него проводника, през който протича входния ток и върху който в резултат на



Фиг.9.12

взаимодействието на този ток с постоянното магнитно поле на магнитната система е приложена електродинамичната сила, е оформен във вид на подвижна бобина и е закрепен към мембрана, която под действието на електродинамичната сила започва да трепти и излъчва звукова вълна. В зависимост от формата на мембраната тези високоговорители биват конусни, куполни и такива с



плоска мембрана. При конусните високоговорители мембраната има вид на конус с различна по форма образуваща и основа с форма на кръг или елипса. При куполните мембраната има куполообразна форма и значително по-малък диаметър. Това спомога да се намали насочеността на излъчване на високоговорителя за високи честоти. Високоговорителите с плоска мембрана са сложни за изработка, поради което се получава голям технологичен брак, а това увеличава цената им. Техните мембрани са плоски, при което, за да се получи достатъчна твърдост и да може мембраната да трепти като бутало, нейната конструкция е многослойна, като от двете страни е изпълнена от гладко фолио, а по средата има пълнеж подобен на пчелна пита или изпълнен от разпенен материал, обикновено пластмаса.

Лентов електродинамичен високоговорител- при него проводника и излъчващата мембрана са обединени и са оформени като тънка проводима лентичка, разположени в магнитното поле на магнитната система. Благодарение на малката маса на трептящата система този вид високоговорители имат много кратки преходни процеси и като следствие - много добро звучене.

### 9.3.2.1. Електродинамични високоговорители с подвижна бобина

#### 9.3.2.1.1. Конструкция на електродинамичните високоговорители с подвижна бобина

Тъй като основните възли на високоговорителите с подвижна бобина са подобни, ще разгледаме подробно конусните, и след това ще се спрем на разликите между тях и другите два вида.

Конструктивно този вид високоговорители се състоят от следните възли (фиг.9.12):

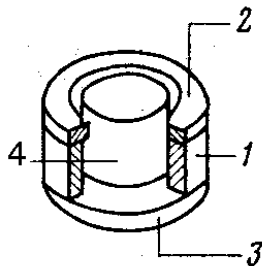
-Магнитна система (1)

-Трептяща система, състояща се от звукова бобина (2), мембрана (3), трептилка (центрираща шайба) (4) и гънка (5).

-Шаси (6)

Предназначението на **магнитната система** е да създаде във въздушната междина магнитно поле с колкото е възможно по-голяма напрегнатост, понеже, както се вижда от формула 9.85 коефициентът на полезно действие е право пропорционален на квадрата на тази напрегнатост. За постигането на тази цел са възможни различни конструктивни решения, като основните са три:

**Магнитна система с пръстеновиден лят магнит.** Принципната



Фиг.9.13

конструкция на такава магнитна система е показана на фиг.9.13. Тя се състои от магнит (1) и магнитопровод, който от своя страна се състои от горна полюсна наставка (2), долна полюсна наставка (3) и сърце (4).

Магнитът има формата на пръстен, за чиито пропорции е характерно, че дебелината на стената е по-малка от височината на цилиндъра. Той е изработен от специална сплав, която запазва в себе си значително количество магнитна енергия. Такива сплави са "Ални", съдържаща алуминий, никел и желязо, която запазва в себе си енергия

$11 \text{ kJ/m}^3$  (килоджаула на кубичен метър) и

използуваната сега "Алнико", съдържаща алуминий, никел и кобалт и запазваща енергия от  $27 \text{ kJ/m}^3$ .

Детайлите на магнитопровода са изработени от магнитно мек материал, за да имат малко магнитно съпротивление. Най-често се

използват нисковъглеродни стомани, като ст.3 или ст.10, електротехническо желязо или металокерамика, за база на която служи желязо, което е почти чисто химически. Когато детайлите се изработват от металокерамика, сърцето и долната полюсна наставка (ДПН) представляват един детайл, което е предимство на този метод, защото не се образуват паразитни междини между сърцето и ДПН при занитването на тези детайли един към друг. Тези паразитни междини увеличават магнитното съпротивление на магнитопровода и намаляват напрегнатостта на полето във въздушната междина. Недостатък на металокерамиката е порестата структура на детайла, което затруднява нанасянето на защитното покритие и намалява устойчивостта на корозия. За избягването на този недостатък и на паразитните междини, понякога детайла, представляващ ДПН-сърце, се изработва от нисковъглеродна стомана по метода на полустуденото изтичане на метала на специални преси с вибриращ инструмент или чрез развалцовка със сачма.

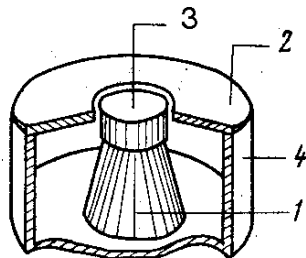
Работната въздушна междина се оформя между сърцето и стената на централния отвор на горната полюсна наставка (ГПН). Тя се характеризира с широчина  $\delta = D_2 - D_1$ , височина  $h_\delta$ , равна на височината на ГПН и обем

$$V_\delta = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)h_\delta, \text{ наречен работен въздушен обем.}$$

При този вид магнитни системи коефициентът на използване на магнитния поток  $\sigma$  достига стойност 0,4.

Както вече беше казано в гл.9.3.1, материалът на магнитопровода не трябва да бъде наситен в никой от своите участъци, защото ако ненаситеният магнитно мек материал

оказва малко съпротивление на магнитния поток, след достигане на индукцията на насищане той рязко увеличава своето магнитно



Фиг.9.14

съпротивление, като при това магнитната

индукция се увеличава незначително. При този

вид магнитна система най-голяма плътност на магнитния поток се получава в мястото, където

сърцето се съединява с долната полюсна наставка (ДПН) и съответно там опасността от насищане е

най-голяма. За това при възможност този участък се удебелява, или цялата ДПН се прави по-

дебела, което е по-неудачно решение, понеже води до излишен разход на метал и утежняване на

конструкцията.

#### Магнитни системи с централен лят магнит-

конструкцията на такава магнитна система е показана на фиг.9.14. Тук магнитът 1 е лят, обикновено от сплав "Алнико", а горна полюсна наставка 2, сърцето 3 и магнитопроводът 4 са изработени от магнитно мек материал, като диаметърът на сърцето е по-голям или в краен случай равен на този на магнита. Когато това не е възможно, сърцето се

изработва със стъпаловидна форма, но това довежда до значително намаляване на коефициента

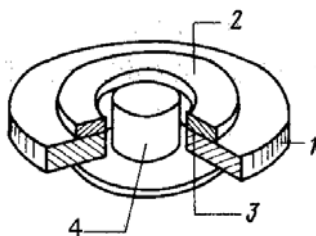
на използване на магнитния поток. Магнитопроводът обикновено е един детайл,

изработен на преса, като в някои случаи, когато съществува опасност от насищане на дъното, той

се изработва от тръба с отделно набито, по-дебело дъно. Максималният коефициент на

използване на магнитния поток при тази конструкция е  $\sigma = 0,59$ , а при стъпаловидно сърце-

до 0,4.



Фиг.9.15

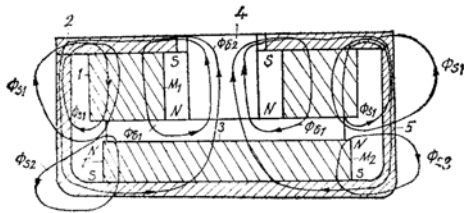
**Магнитни системи с пръстеновиден оксиден магнит** – типична конструкция на такава магнитна система е показана на фиг.9.15.

Трябва да се има предвид, че оксидните магнити запазват по-малко енергия в единица обем от лятите, което довежда до необходимостта от по-голяма маса на магнита за създаване на един и същи магнитен поток във въздушната междина. Оптимален режим

187

на този вид магнитни системи се получава при пропорция на магнита, при която височината е значително по-малка в сравнение с диаметъра му. Максималната стойност на  $\sigma$  е 0,3 до 0,35.

Основното предимство на системите с оксидни магнити е ниската им цена и малката височина в сравнение с тези на системите с лят магнит. Недостатъци са по-ниската стойност на  $\sigma$  и загубата на магнитните свойства при ниски температури при което под минус  $50^\circ$  индукцията във въздушната междина намалява с 15-20%.



Фиг.9.16

Понякога, например в телевизионните приемници, е необходимо разсеяния магнитен поток да се сведе до минимум. За такива случаи е разработена магнитна система със специална конструкция, показана на фиг.9.16. В нея се използват два оксидни магнита M1 (позиция 4) и M2 (позиция 5). Магнитът M1 заедно с ДПН със сърце (1) и ГПН (2) образува една обикновена магнитна

система с оксиден магнит. Разсеяния магнитен поток  $\Phi_{s1}$  на M1 се затваря през чашковидния магнитопровод (3) и частично през въздуха извън него. Работния магнитен поток на M2 съвпада по посока с този на M1 и увеличава работната индукция във въздушната междина, но е противоположен на разсеяния поток  $\Phi_{s1}$ , при което неговия разсеян магнитен поток  $\Phi_{s2}$  също е противоположен на  $\Phi_{s1}$ . В резултат на алгебричното сумиране на двата разсеяни потока, общия разсеян поток има пренебрежимо малка стойност.

При оразмеряването на магнитната система, за да се получи максимална стойност на магнитната индукция във въздушната междина е необходимо коефициентите  $\delta$  и  $\tau$  да бъдат колкото може по големи, а  $I_M, S_M, I_{BM}, S_{BM}$  трябва да бъдат така определени, че желаната стойност на магнитната индукция във въздушната междина да се получи при минимален обем на магнита. Тук е възможно решаването на две задачи:

1) По дадени размери и материал на магнита и индукция във въздушната междина да се намерят размерите на въздушната междина при които постоянния магнит ще работи в оптималната си работна точка. При тази постановка на задачата имаме дадени  $I_M, S_M, B_{Mopt}, H_{Mopt}$  или  $B_M = F(H_M), B_{BM}$ , а търсим  $l_B$  и  $S_B$ . Оптималната стойност на общата проводимост може да се определи по следния начин:

$$\Phi_M = B_{Mopt} S_M = H_{Mopt} I_M G_{opt} \quad (9.89)$$

$$G_{opt} = \frac{B_{Mopt} S_M}{H_{Mopt} I_M}$$

Като заместим в израза за коефициента на използване на магнитния поток (формула 9.66), ще получим:

$$\sigma = \frac{\Phi_{BM}}{\Phi_M} = \frac{H_{BM} I_{BM} G_{BM}}{H_{Mopt} I_M G_{opt}} \quad (9.90)$$

Но по определение коефициентът на използване на магнитодвижещата сила е:

$$\tau = \frac{H_{BM} I_{BM}}{H_{Mopt} I_M} \quad (9.91)$$

Следователно проводимостта на въздушната междина е:

$$G_{BM} = \frac{\sigma}{\tau} G_{opt.} \quad (9.92)$$

а широчината на въздушната междина е:

$$l_{BM} = \tau \frac{H_{Mopt} I_M}{H_{BM}} = \tau \frac{\mu_0 H_{Mopt} I_M}{B_{BM}} \quad (9.93)$$

За площта на въздушната междина получаваме:

$$S_{BM} = \frac{G_{BM} l_{BM}}{\mu_0} \quad (9.94)$$

2) По дадени размери на въздушната междина, материал на постоянния магнит и индукция във въздушната междина, да намерим размерите на магнита за получаване на оптималната работна точка.

Ако преработим формула 7.92 и вземайки пред вид формула 7.94 ще получим:

$$G_{opt.} = \frac{\tau}{\sigma} G_{BM} = \frac{\tau \mu_0 S_{BM}}{\sigma l_{BM}} \quad (9.95)$$

За дължината на магнита от формула 7.63 получаваме:

$$l_M = \frac{H_{BM} l_{BM}}{H_{Mopt} \tau} = \frac{B_{BM} l_{BM}}{\mu_0 H_{Mopt} \tau} \quad (9.96)$$

а площта на сечението му се получава от израза:

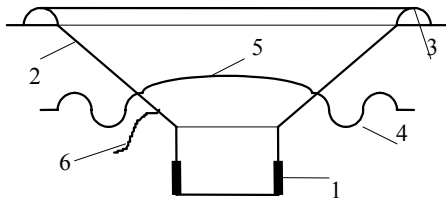
$$S_M = \frac{H_{Mopt} l_M G_{opt.}}{B_{Mopt}} \quad (9.98)$$

Определените по този начин размери на магнита и въздушната междина са ориентировъчни, понеже стойностите на коефициентите  $\tau, \sigma$  се изменят в широк диапазон -  $\tau = 0,9 - 1$ , а  $\sigma = 0,2 - 0,7$ . Точното оразмеряване става или с помощта на компютър, или по метода на приближението, при който първоначално стойностите на коефициентите се приемат произволно, след което се изработва магнитна система по получените данни, измерват се нейните параметри, коригират се стойностите на коефициентите и наново се изчисляват размерите на магнитната система.

**Трептящата система** се състои от звукова бобина 1, мембрана 2, гънка 3, трептилка (центрираща шайба) 4, шапка 5 и изводи 6 (фиг.9.17).

Звуковата бобина конструктивно влиза във възела трептяща система, а функционално в звеното електромеханичен преобразувател и представлява свързващият елемент между звената електромеханичен преобразувател и механо-акустичен преобразувател (мембраната).

Изходни данни за оразмеряването на звуковата бобина са електрическата мощност на високоговорителя, номиналното му електрическо съпротивление и коефициентът на електромеханична връзка. При оразмеряването на звуковата бобина на болшинството високоговорители електрическата мощност се приема равна на паспортната мощност. Само при разработката на специална апаратура, като концертни



Фиг. 9.17

високоговорители и др. тя се умножава по някакъв коефициент на претоварване, който обикновенно е равен на 1,5-2 и тогава тя става равна на максималната дълговременна мощност, но това довежда до увеличаване на габаритите и масата на високоговорителите.

С помощта на зададената стойност на електрическата мощност се определя масата на проводника на звуковата бобина:

$$m_{\text{пр.}} = \frac{P_{\text{п}} \gamma}{j^2 \rho_{\text{ел.}}} \quad (9.99)$$

и нейния обем по метал:

$$V_{\text{пр.}} = \frac{m_{\text{пр.}}}{\gamma} \quad (9.100)$$

Тук  $\gamma$  е плътността на материала на проводника, от който е навита бобината, като за медта  $\gamma = 8,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , а за алуминия  $\gamma = 2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_{\text{ел.}}$  е относителното електрическо съпротивление на материала на проводника, като за медта е  $\rho_{\text{ел.}} = 1,75 \cdot 10^{-8} \Omega/\text{m}$ , а за алуминия  $\rho_{\text{ел.}} = 3 \cdot 10^{-8} \Omega/\text{m}$ , а  $j$  е плътността на тока в проводника. Тъй като условията за охлаждане на звуковата бобина са сравнително добри, за което спомага близостта до масивните метални детайли ГПН и сърце, плътността на тока се приема в границите от 40 до 90  $\text{A/mm}^2$  при нискочестотните високоговорители, от 80 до 120  $\text{A/mm}^2$  при високочестотните и от 50 до 100  $\text{A/mm}^2$  при широколентовите високоговорители.

Стойността на номиналния импеданс се избира от стандартния ред 4, 8, 16, 25, 50  $\Omega$ , като в битовата апаратура обикновенно се използват високоговорители с импеданс 4 или 8  $\Omega$ . Активното съпротивление на звуковата бобина е по-малко от номиналния импеданс, като това намаляване е различно за високоговорителите, възпроизвеждащи различни честоти, като за нискочестотните е 10%, за високочестотните около 20% и за широколентовите -15%.

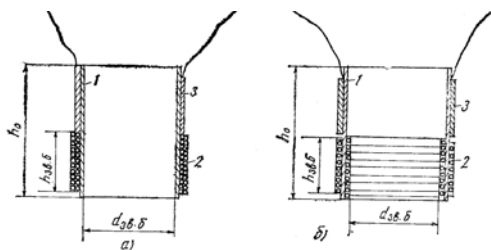
След определяне на активното съпротивление на звуковата бобина се определя дължината и диаметъра на проводника по формулите:

$$l_{\text{пр.}} = \sqrt{\frac{R_c V_{\text{пр.}}}{\rho}} \quad (9.101)$$

и

$$d_{\text{пр.}} = \sqrt[4]{\frac{16 \rho V_{\text{пр.}}}{\pi^2 R_c}}$$

След определяне на тези величини избираме стандартен диаметър на проводника и, знаейки диаметъра на сърцето, определяме броя навивки. След това се избира броя слоеве на бобината, който винаги трябва да е четно число (в противен случай изводите ще се окажат в противоположните краища на бобината и единият от тях няма как да се свърже към изводните клеми). По тези данни определяме дебелината на намотката, която е  $b_{\text{нам.}} = N \cdot d_{\text{из.}}$ , като  $N$  е броя слоеве, а  $d_{\text{из.}}$  е диаметъра на проводника с



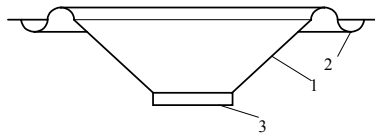
Фиг.9.18

изолацията и площта на страничната повърхност на бобината  $S_6 = \frac{V_{\text{пр.}}}{k_{\text{зап.}} \cdot b_{\text{нам.}}}$ ,

където  $k_{\text{зап.}}$  е коефициент на запълване на намотката с проводник, зависещ от формата на сечението на проводника.

Основата, върху която се навива проводника най-често е хартия, но при мощните високоговорители, особено нискочестотни, за основа се използва алуминиево фолио. Навиването на проводника върху основата обикновено е едностранно (фиг.9.18-а), но понякога с цел по-добро охлаждане се прилага двустранно навиване (фиг.9.18-б). За увеличаване на механичната здравина на звуковата бобина върху тази част на основата, върху която няма навит проводник се подлепва допълнително с един или няколко слоя хартия, наречени укрепител и точно с тази си част се залепва към мембраната.

Мембраната, както неколккратно беше споменато, представлява звеното механо-акустичен преобразувател, а при високоговорителите с директно излъчване съчетава в себе си и звеното акустична излъчваща антена. За това от нейните качества до голяма степен зависят качествата на високоговорителя.



Фиг.9.19

Все още най-често използвания материал, от който се изработват мембраните е целулозата, въпреки, че все по-често се използват и други материали, като пластмаса (модифицирани полистирол и полипропилен, поликарбонат и др.),

армирани материали (включително и с въглеродни нишки, взаимствани от космическите технологии), а при високо-честотните и рупорни високоговорители и при някои модели с плоска мембрана - и метал (дуралуминий или титанови сплави). Причината целулозата да бъде все още основния материал за изработка на мембрани е ниската цена, добре отработената технология и подходящите качества, като здравина, механични загуби и др.

При най-разпространените високоговорители - конусните, както показва и названието, мембраната 1 има формата на конус (фиг.9.19), понеже тази форма дава възможност да се получи по-голяма твърдост на конструкцията при еднаква маса. При това, образуващата на конуса винаги е криволинейна с цел да се изтласкат към по-високите честоти параметричните колебания, на които ще се спрем по-късно при разглеждането на изкривяванията, причинявани от мембраната. Основата на конуса бива окръжност или елипса. При елиптичните високоговорители е възможно получаването на по-широк ефективен честотен обхват благодарение на факта, че условията за получаване на локални резонанси са различни по различните посоки спрямо осите на елипсата, но изработката на инструмента за отливане и пресоване на този вид мембрани е много по-сложна и скъпа от тази на кръглите мембрани. Независимо от формата на основата, към върха на конуса мембраната винаги има кръгла форма, завършваща с цилиндрична част 3, наречена шийка, като вътрешния диаметър на шийката е равен на външния диаметър на звуковата бобина и точно по тази повърхност се извършва залепването на двата възела един към друг.

Гънката е закрепена към основата на конуса. Предназначението на гънката е да осигури свободното (в определени граници на преместването) движение на мембраната по посока на оста, като едновременно с това не ѝ позволява да се движи в посока, перпендикулярна на оста на високоговорителя, при което шпунтата би се трила в детайлите на магнитната система. За да изпълнява тази си функция, гънката представлява



Фиг.9.20

детайл с концентрични гофри с различно сечение (фиг.9.20). Обикновено при широколентовите, средночестотните и в повечето случаи при високочестотните

високоговорители тя се изработва едновременно с мембраната и е неразделна част от нея. При нискочестотните високоговорители, поради специфичните изисквания, гънката почти винаги е отделен детайл, залепен към мембраната. В този случай тя се изработва от материали с големи механични загуби като гума, гумиран плат или различни пластмаси. Гъвкавостта на окачването на кръгли мембрани се определя с израза:

$$c_m = \frac{(1 - \sigma^2)b^3}{\pi E \Delta_r^2 (b + D) \alpha_1 \alpha_2} \quad (9.102)$$

където  $\sigma = 0,25$  до  $0,3$  - коефициент на Пуасон

$E$  - модул на еластичността

$b$  - широчина на гънките

$\Delta_r$  - дебелина на гънките

$\alpha_1$  - коефициент, зависещ от формата на гънките. Неговата стойност е 1 при плоска гънка, 2 при трапецовидна, 3 при трионообразна и 4 при синусоидална форма на гънката.

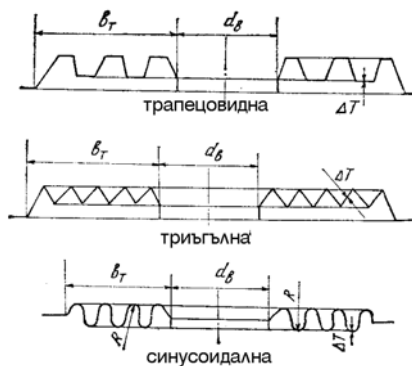
$\alpha_2$  - коефициент, зависещ от отношението на височината на гънката към дължината на една гънка. Той се изменя от 1 до 4,2 при изменение на горе споменатото отношение от 0 до 0,4.

Гъвкавостта намалява с увеличаването на височината на гънките и на дължината на една гънка. При това се увеличава амплитудата, в границите на която гъвкавостта не зависи от отклонението

Увеличаването на гъвкавостта може да стане по два начина - като се увеличи широчината на гънките  $b$  или като се намали тяхната дебелина. Увеличаването на широчината на гънките довежда до намаляване на площта на излъчване, защото самите гънки на една определена честота изпадат в резонанс и излъчват в противофаза с конуса на мембраната, в резултат на което за тази честота в честотната характеристика на високоговорителя се появява дълбок провал. Освен това излъчения от гънките звук съдържа значително количество хармоници. За това трябва да се избягва прекомерното увеличаване на широчината на гънките, а увеличаването на гъвкавостта да става главно за сметка на намаляване на тяхната дебелина. Тук също не бива да се прекалява, защото при създаването на рязка промяна на дебелината на материала вълната на огъване, разпространяваща се по конуса на мембраната ще се отразява от границата между двете дебелини, при което се получава излъчване в противофаза и като следствие - отново падина в честотната характеристика. - *Шапка* - служи за предпазване на работната въздушна междина на магнитната система от попадане на чужди тела. Особено опасни са попадналите там железни стружки, които се задържат от магнитното поле и изваждането им

е много трудно, а в някои случаи дори невъзможно. При движение на шпуната, тези чужди тела се трият в нея и в детайлите на магнитната система, предизвиквайки нежелани звуци.

Обиктено шапката е изработена от импрегниран плат, по технологията по която се изработват и трептилките. Целта е да не се затваря между шапката и сърцето на магнитната системи обем от въздух, който ще се прояви като гъвкавост и ще измени резонансната честота на високоговорителя. В някои случаи (главно при нискочестотни високоговорители) шапката се изработва от целулоза по



Фиг.9.21

технологията на изработка на мембраната, и в редки случаи - от пластмаса или алуминий.

Шапката оказва влияние и върху възпроизвеждането на високите честоти.

*Трептилка (центрираща шайба)* - Предназначението на този детайл е да не позволи движение на шпунтата в радиално направление, като при това се запази възможността за осово движение с максимална възможна амплитуда. Основно изискване към трептилките е да не се проявява зависимост на съпротивлението, оказвано от трептилката, от амплитудата на изместване от равновесното състояние. Друго изискване към трептилката е, да не оказва съпротивление на преминаващият въздух, за да не се получава затворен обем между нея и долната част на шасито, който би се проявил като гъвкавост и би увеличил резонансната честота на трептящата система аналогично на влиянието на шапката. В някои по-стари високоговорители се срещат трептилки тип "паяк". Те са изработени от тънък текстолит или гетинакс и имат прорези във формата на част от окръжност, които се разминават. Характеризират се с много голямо съпротивление за радиалните измествания, но са сравнително твърди и не позволяват много голям ход в осово направление, поради което в по-новите високоговорители практически не се използват. Понастоящем се прилагат главно трептилки, изработени от специален плат, напоен с фенолформалдехидна (бакелитова) смола, които след пресоване и изпичане добиват формата на гофрирана, достатъчно въздухопропусклива мембрана (фиг.9.21). Формата и височината на гофрите, както и външният диаметър на трептилката оказват голямо влияние върху параметрите на високоговорителя, като за нея може да бъде приложена формула 9.102.

Платът, от който се изработват трептилките е памучен или копринен, като той трябва да бъде уравновесен-т.е.посоката на усукване на нишките и в основата и във вътъка трябва да се редува-например, две нишки усукани наляво, съседните две-усукани надясно и т.н. Редуването може да става и през една нишка. Такава структура на плата позволява да не се получават вътрешни напрежения в трептилката и тя да не се измъта след изпичане. Освен това, за да може платът да се разтяга при пресоването на трептилката без да се къса, той трябва да бъде силно усукан - от 1500 до 2000 сука на метър.

*Изводи* - служат за осъществяване на електрическа връзка между звуковата bobина и входните клеми на високоговорителя. Надеждността на високоговорителя и неговата паспортна мощност са пряко свързани с конструкцията на изводите. Обикновено проводникът се състои от определен брой усукани мишурени нишки, представляващи тънък меден проводник, увит около копринена нишка. Тази конструкция позволява многократни огъвания без прекъсване на медния проводник. Все пак, при преминаването на проводника през мембраната той трябва да бъде добре закрепен, защото ако това не е сторено огъването в тази точка става под остър ъгъл и това може да доведе до прекъсване на електрическата връзка. Този дефект може да се появи и вследствие на втвърдяване на гъвкавия проводник поради пропиването му с флюс при спояването или с лепило при залепването към мембраната и се открива много трудно. Причината е, че се прекъсва само медния проводник, а коприненият конец остава цял и на пръв поглед проводника изглежда здрав. В последно време при мощните високоговорители се използва гъвкав проводник, представляващ оплетка, подобна на ширмовката на микрофонните проводници.

Дължината на гъвкавия проводник трябва да се подбере така, че образуваната хлабина да бъде достатъчна за свободното движение на мембраната, но при това да не може проводника да се удрия мембраната или трептилката и да предизвика нежелан звук.



При някои средночестотни и особено високочестотни високоговорители, където амплитудата на колебание е малка, се използва изведен проводник във вид на гъвкава метална лента, при който не съществува опасност от допълнително втвърдяване от пропиване с флюкс или лепило и това довежда до по-висока надеждност на високоговорителя.

**Шаси** – върху него се закрепват всички останали възли, както и изводните уши. Основно изискване към него е да бъде достатъчно здраво и да не се огъва под тежестта на магнитната система и при закрепването на високоговорителя към кутията. Шаситата за високоговорители с диаметър до 200 mm обикновено се изработват от листов стомана чрез изтегляне и шанцоване. При високоговорители с по-големи размери шасито се отлива от алуминиеви сплави. Решаващо условие за конструкцията на шасито е теглото на магнитната система.

9.3.2.1.2. Фактори, определящи основните показатели на електродинамичните високоговорители.

**-фактори, от които зависи чувствителността на високоговорителите.**

Коефициентът на полезно действие на високоговорителите, както знаем, се определя по формула 9.88., която след заместване добива вида:

$$\eta = \frac{1,2\rho_s}{\pi c_0} \cdot \frac{B_{BM} V_{np}}{\rho_{ел}} \cdot \left( \frac{S}{m_d} \right)^2 = \frac{1,2\rho_s B_{BM}^2 S^2}{\pi c_0 \rho_{ел} \rho_m} \cdot \frac{m_{зв.б.}}{(m_m + m_R + m_{зв.б.})^2} \quad (9.103)$$

Тук  $\rho_m$  е относителното тегло на материала на проводника, от който е навита звуковата бобина.

$m_m$  е масата на мембраната,

$m_R$  е присъединената маса въздух

$m_{зв.б.}$  е масата на проводника на звуковата бобина.

Тази формула се състои от три множителя. Първият множител се състои от константи, на които не можем да влияем, и за това няма да се занимаваме сега с тях. Вторият множител отразява ефективността на преобразуване в звеното електромеханичен преобразувател и в него участвуват параметри на магнитната система и на звуковата бобина. Вижда се, че за да се увеличи ефективността на преобразуване в това звено и от там-чувствителността на високоговорителя, трябва да се увеличи индукцията във въздушната междина и обема на медта в работния въздушен обем, а да се намали специфичното електрическо съпротивление на проводника, от който е навита шпуплата.

Магнитната индукция може да се увеличи, като се увеличи коефициентът на използваемост на магнита, като се увеличи неговият обем, или като се използва магнит с по-голяма енергия в единица обем. При един и същи магнитен поток  $F_{вм.}$ , индукцията е обратно пропорционална на площта на въздушната междина, определена от нейната височина и от средния диаметър. Но намаляването на тази площ би означавало намаляване на обема на въздушната междина и от там – на обема на проводника, което от своя страна намалява чувствителността. За това трябва да се увеличава магнитния поток чрез намаляване на неговото разсейване, намаляване на магнитното съпротивление на магнитопровода чрез избягване на паразитните въздушни междини по пътя, (например от много дебел слой лепило между детайлите на магнитната система и магнита или недобре припасвани и набити сърце и ДПН), както и чрез разумно намаляване на широчината на въздушната междина така, че това намаляване да не доведе до необходимост от намаляване на сечението на проводника или затруднения при центроването на трептящата система.

Увеличаването на обема на проводника  $V_{пр}$  може да стане чрез използването на профилиран проводник с правоъгълно сечение. Това обаче довежда до затруднения при навиването на звуковата бобина и нейното оскъпяване и за това се прилага в специални случаи.

Третият множител отразява влиянието на механо - акустичният преобразувател, като  $S$  е площта на излъчване на мембраната, която приблизително представлява площта на мембраната без гънката, а  $m_d$  е динамичната маса на трептящата система, съставена от масата на мембраната плюс присъединената маса въздух, зависеща от площта на мембраната и масата на звуковата бобина. Може да се докаже, че при равни други условия коефициентът на полезно действие има максимум при съотношение на масите:

$$\frac{m_{зв.б}}{m_m + m_R} = 1 \quad (9.104)$$

Трябва да отбележим, че това условие може да се спази само при нискочестотните високоговорители, докато при останалите видове високоговорители-ширококолентови, средночестотни и високочестотни спазването му би довело до влошаване на възпроизвеждането на средните и високи честоти поради увеличаване на масата на мембраната. За това при тях това отношение има стойност 0,1 до 0,2.

Площта на излъчване  $S$  оказва влияние върху насочеността на излъчване на високоговорителя и не може да бъде увеличавана произволно. Увеличаването на отношението  $S/m_d$  при определена площ  $S$  може да стане чрез намаляване на масата на мембраната или звуковата бобина. Намаляването на масата на мембраната при неизменна площ означава намаляване на нейната дебелина и от там - нейната здравина и твърдост, което веднага ограничава тази възможност, като единственият път е търсенето на нови материали, съчетаващи по-голяма твърдост и здравина при малка дебелина и големи механични загуби.

Намаляването на масата на звуковата бобина става чрез заместването на медния проводник с алуминиев. Трябва да се има пред вид, че това не води автоматично до увеличаване на чувствителността на високоговорителя. Като вземем пред вид стойностите на относителното електрическо съпротивление и относителното тегло на двата материала, които са:

$$\rho_{m,Al} = 2,65 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}; \rho_{ен,Al} = 2,87 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$$

$$\rho_{m,Cu} = 8,9 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}; \rho_{ен,Cu} = 1,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$$

можем да определим отношението на коефициентите на полезно действие при звукова бобина от мед и алуминий. Като вземем пред вид, че при еднакъв обем на звуковите бобини е в сила отношението  $m_{зв.б,Al} = 0,3m_{зв.б,Cu}$

можем да получим израз за отношението на коефициентите на полезно действие при меден и алуминиев проводник, зависещ само от израза

$\frac{m_{зв.б,Cu}}{m_m + m_R}$ . Може да се докаже, че ако този израз е по-малък от 0,4, по

изгодно е да се използва меден проводник, а когато това отношение стане по-голямо от 0,4, по изгодно е да се използва алуминиев проводник.

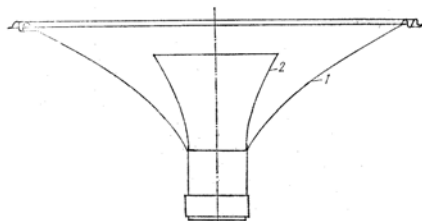
Коефициентът на полезно действие при съвременните електродинамични високоговорители с директно излъчване има стойност от 0,5 до 5%.

**-фактори, от които зависи честотният обхват на високоговорителите .**

Долната гранична честота на високоговорителя се определя основно от неговата резонансна честота и качественият фактор. Съгласно формула 9.48 върху резонансната честота влияние оказват присъединената маса въздух, масата на трептящата система и гъвкавостта на окачването. Както вече знаем, присъединената маса въздух зависи от площта на мембраната, а масата на трептящата система представлява сумата от масата на мембраната и звуковата бобина. На пръв поглед е все едно, дали ще увеличаваме масата или гъвкавостта, за да намалим резонансната честота. На практика обаче не е така, понеже при увеличаване на масата се намалява чувствителността, при това за разширяване на обхвата с една октава КПД се намалява 16 пъти, и се увеличава качественият фактор, като последното води до увеличаване на неравномерността на честотната характеристика и влошаване на преходните процеси. При това долната гранична честота не се намалява чувствително.

Много по-добри резултати се получават при увеличаване на гъвкавостта на окачване на трептящата система. Тя се състои от гъвкавост на гънката и гъвкавост на трептилката. При стремежа да се намали резонансната честота трябва да се увеличава по-малката от тях. По принцип гъвкавостта не влияе върху чувствителността на високоговорителя, а с нейното увеличаване се намалява качественият фактор. Това от своя страна довежда до намаляване на неравномерността на честотната характеристика и намаляване на стръмността на срязване под резонансната честота, което допринася за по-доброто звучене на високоговорителя. В случай, че качественият фактор на високоговорителя е достатъчно нисък и неговото намаляване е нежелателно, а трябва да се намали резонансната честота, се прибегва до едновременно увеличаване на гъвкавостта и масата, или с увеличаването на гъвкавостта се намаляват активните загуби. Трябва да се има пред вид, че и в двата случая се намалява чувствителността на високоговорителя.

Ефективното излъчване на високите честоти изисква почти противоположни качества от мембраната на високоговорителя-нейната маса трябва да бъде колкото е възможно по-малка, а твърдостта-колкото е възможно по-голяма. Както беше споменато, над граничната честота, за която мембраната трепти като бутало, отделни участъци на мембраната започват да трептят с различна амплитуда и, което е по-лошо-с различна фаза. Най-високите честоти, които високоговорителят ефективно преобразува, се излъчват от самия връх на конусната мембрана и за това той трябва да бъде лек и твърд, като за целта стръмността на конуса в този участък се прави голяма, и понякога се втвърдява допълнително чрез импрегниране с различни лакове. Увеличаването на горната гранична честота може да стане и с помощта на технологични фактори, като например увеличаване на степента на смилане на целулозата, използвана за отливане на мембраната или използването на по-твърди сортове целулоза, което спомага мембраната да бъде по-твърда при същата дебелина и маса.



Фиг.9.22

За да се улесни изключването на участъците, по-близки до гънката при излъчването на високи честоти и по този начин да се намали колебаещата се маса за тези честоти и да се подобри тяхното излъчване, по образуващата на мембраната се оформят концентрични гънки. Изключването на широките участъци на мембраната при колебание с висока честота

спомога и за намаляване на противофазното излъчване на тези участъци и от там-до намаляване на неравномерността на честотната характеристика.

Друг начин за повишаването на горната гранична честота е използването на така наречения високочестотен конус, представляващ допълнителна малка конусообразна мембранка, закрепена непосредствено за шпунтата (фиг.9.22) и излъчваща само в областта на високите честоти. Тази мембрана трябва да бъде много лека и твърда. Тъй като горният и ръб е свободен, за да не се деформира той трябва да бъде подсилен с обърнат ръб.

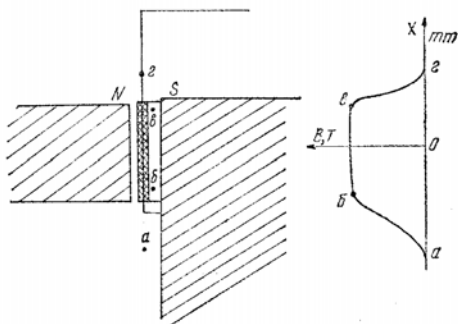
**Фактори, определящи нелинейните изкривявания на високоговорителите.**

а) Изкривявания, породени от нелинейността на окачването на трептящата система.

Както знаем, гъвкавостта представлява зависимостта на преместването  $x$  от приложената сила  $F$ . При големи премествания тази зависимост престава да бъде линейна, а при по-големите приложени сили на същите нараствания съответствуват по-малки нараствания на преместването. В резултат на това гъвкавостта намалява с увеличаване на преместването, в резултат на което движението на трептящата система не следва законът, по който се изменя приложената сила-появяват се нелинейни изкривявания. Ако гъвкавостта се изменя по един и същи начин при изместване нагоре и надолу на трептящата система спрямо равновесното положение, ще се появят само нечетни хармоници на приложения синусоидален сигнал. Ако това изменение е различно, ще се появят както четни, така и нечетни хармонични. Появата на четни хармоници често е признак за неправилно залепване на трептилката към мембраната, при което трябва те да се разлепят и да се нагласи мембраната и трептилката така, че гънките на първата да лежат в една равнина. Такъв дефект може да се прояви и при втвърдяването на последната гънка поради пропиването и с лепило при залепването към шасито. Тъй като амплитудата на колебание е най-голяма за ниските честоти, там и изкривяванията, дължащи се на тази причина ще бъдат най-големи, като това особено ще се прояви при резонансната честота.

б). Изкривявания, породени от неравномерността на магнитното поле.

За да бъде линейна връзката между протичащият през звуковата бобина ток  $i$  и електродинамичната сила  $F$  при движението на бобината, трябва магнитното поле да бъде равномерно. Това не може да бъде изпълнено при големи амплитуди на колебание на трептящата система. Разпределението на магнитната индукция  $B$  във функция на разстоянието  $x$  по посока на движението на звуковата бобина е показана на фиг.9.23. Вижда се, че индукцията има постоянна стойност само между точките б и в



Фиг.9.23

От точка б към точка а индукцията намалява по-плавно, а от точка в към т.с-по стръмно. Очевидно електродинамичната сила ще зависи от мястото, в което се намира звуковата бобина при своето трептене поради зависимостта на  $B$  (т.е. коефициентът на електромеханична връзка) от това местоположение, дори ако токът през нея остава постоянен. Това довежда до изкривяване на формата на колебание на мембраната, свързано с появата на висши хармонични на сигнала. Точна

математическа зависимост между амплитудата на колебание и нивото на висшите хармонични не е известна, но е установено, че то нараства с

амплитудата на трептене, а последната е максимална в областта около резонансната честота и следователно този вид изкривявания са максимални в този честотен обхват.

Намаляването на тези изкривявания може да бъде постигнато по няколко начина:

- Като се направи височината на звуковата бобина да бъде по-малка от височината на работната въздушна междина. Това е приложимо, когато трептящата система трепти със сравнително малки амплитуди, защото в противен случай дебелината на ГПН трябва да бъде много голяма, или тя трябва да има сложна форма. Следователно, това решение може да се прилага за средночестотни и височестотни високоговорители.

Допълнително предимство при използването му в този случай е по-малката маса на звуковата бобина. Недостатък е по-малкият коефициент на електромеханична връзка, поради това, че само част от магнитния поток взаимодейства с протичащия през проводника на бобината ток, а голяма част от него остава неизползувана.

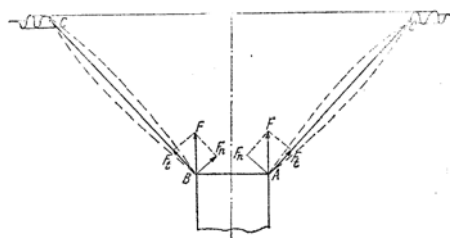
Като се направи височината на звуковата бобина да бъде значително по-голяма от височината на работната въздушна междина така, че при максимална амплитуда на колебание пак да обхваща целия магнитен поток и  $B_l$  да бъде постоянна величина. При това нелинейните изкривявания ще бъдат постоянни.

При използване на дългата звукова бобина в нискочестотните високоговорители, допълнително предимство е увеличаването на масата на трептящата система, вследствие на което се намалява резонансната честота и от там-долната гранична честота. Непрекъснатото обхващане на целия магнитен поток също спомага за възпроизвеждането на ниските честоти. Следователно, това решение е подходящо предимно за нискочестотни и широколентови високоговорители, като за височестотни и средночестотни увеличената маса на трептящата система води до понижаване на горната гранична честота и прави това решение неприложимо.

Основен недостатък на това решение е намаляването на КПД поради факта, че само част от протичащия през звуковата бобина ток взаимодейства с магнитното поле, както и поради увеличаването на масата на трептящата система.

#### в) Изкривявания, породени от параметрично възбуждане на конуса на мембраната.

Електродинамичната сила  $F$ , която се поражда в звеното електромеханичен преобразувател е приложена в мястото на залепване на звуковата бобина и мембраната (Фиг.9.24). Тази сила се разлага на две сили- $F_n$  и  $F_t$ . Силата  $F_n$  се стреми да разклати конуса като махало, докато силата  $F_t$  се стреми да го изкълчи и когато стане достатъчно голяма и честотата и е два пъти по-голяма от една от собствените



Фиг.9.24

честоти на напречни колебания на конуса, възникват напречни колебания (пунктирната линия). При това честотата на трептене на конуса е два пъти по-ниска от честотата на приложения сигнал и в резултат се появява сигнал, който се нарича субхармоник. Човешкото ухо е много чувствително към този вид изкривявания, защото долавя субхармоници дори с ниво 60 dB по-ниско от това на основния сигнал, които дори оказват маскиращо влияние на основния сигнал и са особено дразнещи. Освен това такива трептения се получават в честотния обхват от 500 до 4000 Hz, където човешкото ухо е най-чувствително.

За избягването на този вид изкривявания се използват мембрани с криволинейна образуваща, при които честотата на напречните трептения на мембраната е равна на честотата на основния сигнал.

г) Изкривявания, породени от локални резонансни явления на мембраната.

Както беше казано по-горе, над една определена честота  $f_{кр}$  мембраната на високоговорителя престава да трепти като бутало, а отделни участъци от нея започват да трептят с различна фаза и амплитуда вследствие на локалните резонанси, като за различни честоти резонират различни участъци на мембраната. Това не означава, че за всяка честота трепти определен участък на мембраната, а обикновено, при добре конструирани мембрани се проявяват не повече от 4 до 5 локални резонанса, разположени през октава и излъчващи в честотна лента с широчина също една октава. За целта е необходимо отделните резониращи области да имат нисък качествено-фактор. Гънките от своя страна също проявяват резонанс, който довежда до значителни нелинейни изкривявания. За избягване на това гънките се правят с големи активни загуби. Останалата повърхност на мембраната също трябва да има големи загуби за избягване на локалните резонанси, но това обикновено се постига с мерки, намаляващи чувствителността или ограничаващи честотния диапазон отгоре, и затова трябва да се търси разумен компромис.

д) Изкривявания, породени от Доплеров ефект.

Този вид изкривявания се получават главно при широколентовите високоговорители, на които се подават едновременно сигнали и с ниски, и с високи честоти. В такъв случай, мембраната, извършвайки движение с голяма амплитуда при възпроизвеждането на ниските честоти, представлява движещ се източник на високите честоти. При това, вследствие на ефекта на Доплер, слушателят ще възприема последните с по-висока или по-ниска честота в зависимост от посоката на движението на мембраната в дадения момент, т.е. ще се появи ефект на честотна модулация на високите честоти с периода на ниските и в спектъра на сигнала ще присъстват честоти, които не са кратни на основните. По своя спектрален състав Доплеровите изкривявания са подобни на интермодулационните, но за разлика от тях се получават независимо от нелинейността на преобразуването-последното може да бъде абсолютно линейно и въпреки това Доплерови изкривявания да съществуват.

Единственият начин за избягването на този вид преобразуване е разделянето на сигнала на отделни ленти за ниските и средни честоти, които да се възпроизведат от отделни високоговорители. При това на нискочестотния високоговорител трябва да се подава честота, не по-висока от граничната, до която той трепти като бутало.

**Фактори, определящи насочеността на високоговорителя.**

Геометричните размери на високоговорителя са единствените фактори, определящи неговата насоченост. Както беше казано, при плоско бутало насочеността зависи от отношението на диаметъра на мембраната към дължината на вълната. При конусните високоговорители насочеността зависи и от ъгъла при върха на конуса, като с намаляване на ъгъла при върха насочеността се увеличава, както и от материала, от който е изработена мембраната. За намаляване на насочеността, мембраната на високоговорителя трябва да бъде колкото е възможно по-плоска и с по-малки размери.

**Фактори, определящи качественият фактор и продължителността на преходните процеси на високоговорителите.**

Качественият фактор  $Q$  на един електродинамичен високоговорител зависи от неговата маса, гъвкавост и активно съпротивление:

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{m}{c}}}{\frac{B^2 I^2}{R + R_i} + r_{\text{тр.с.}} + \Gamma_R} \quad (9.105)$$

Съпротивлението на излъчване  $\Gamma_R$  за даден високоговорител е постоянна величина, върху която стойност не може да се влияе.

Съпротивлението на активните загуби на трептящата система  $\Gamma_{\text{тр.с.}}$  се определя от загубите в трептилката, които не са големи и не могат да се увеличат значително, и загуби в мембраната и гънката, които бяха разгледани по горе.

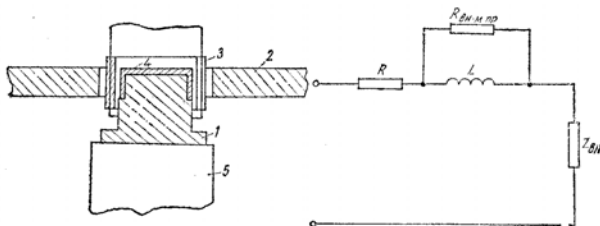
Внесеното съпротивление  $\frac{B^2 I^2}{R + R_i}$  отразява влиянието на електрическата страна на високоговорителя върху механичната. Ако механичната система се намира в движение и се прекрати действието на електрическият сигнал, движението продължава още определено време поради инертността на трептящата система. Ако не съществуваше внесеното съпротивление, това движение щеше да продължи до превръщането на запасената механична енергия в топлина. Но при движението на звуковата bobина в магнитното поле в нея се индуцира електродвижещо напрежение  $e$ , а то предизвиква протичането на електрически ток  $i$  през затворената верига звукова bobина-изхода на усилвателя:

$$i = \frac{e}{R_i + R} \quad (9.106)$$

Посоката на тока е такава, че породената от него електродинамична сила е насочена обратно на посоката на трептене т.е. тя се противопоставя на трептенето и колкото е по-силен този ток, толкова по-бързо ще затихнат колебанията на трептящата система. Следователно, колкото по-малка е сумата от съпротивленията  $R + R_i$ , толкова по-бързо ще затихнат преходните процеси във високоговорителя. По-голямата стойност на индукцията във въздушната междина също води до по-бързо затихване на преходните процеси, понеже стойността на  $e$  зависи от  $B$ .

Понякога към изхода на усилвателя се включват по няколко високоговорителя. Когато параметрите на тези високоговорители са еднакви, няма значение дали те ще бъдат свързани паралелно или последователно. Когато обаче параметрите им са различни и по-специално, когато резонансните им честоти са различни, по-нисък качествено фактор се получава при паралелно свързване на високоговорителите.

От казаното до тук може да се направи изводът, че за получаването на кратки преходни процеси високоговорителят трябва да има големи механични загуби. Когато това е реализирано чрез увеличаването на



Фиг.9.25

чувствителността.

загубите в трептящата система, то води и до намаляване на чувствителността. Значително по-благоприятно е увеличаването на загубите чрез увеличаване на коефициента на електромеханична връзка (главно на индукцията във въздушната междина), понеже то довежда до увеличаване на

### **Влияние на меден пръстен върху показателите на високоговорителя.**

Входният електрически импеданс на електродинамичните високоговорители силно нараства с увеличаване на честотата, вследствие на което намалява консумираната от него мощност и от там-създаваното звуково налягане. Това от своя страна означава намаляване на горната гранична честота на високоговорителя, която е основен параметър за високочестотните и широколентови високоговорители.

Ходът на импедансната характеристика при високите честоти може да бъде коригиран с помощта на свързана на късо навивка, разположена в близост до звуковата bobина. Конструктивно най-често тя се оформя като меден пръстен или капачка 2, надянати върху сърцето на магнитната система в неговия горен край (фиг.9.25). При това положение разстоянието между звуковата bobина и този меден пръстен е около 0,1 до 0,2 mm. и магнитният поток, създаван от протичащия през звуковата bobина ток обхваща и медния пръстен и системата звукова bobина-меден пръстен може да се разглежда като трансформатор с вторична намотка, свързана на късо. Това внася в първичната намотка, чиято роля се изпълнява от звуковата bobина, на активни загуби, като при това внесено активно съпротивление се оказва свързано паралелно на индуктивността на звуковата bobина. При ниски честоти реактивното съпротивление на индуктивността има малка стойност и  $R_{вн.м.пр.}$  не оказва влияние върху входния импеданс на високоговорителя, докато при високи честоти реактивното съпротивление на бобината нараства и тогава се проявява шунтиращото действие на внесено от медния пръстен съпротивление, като за целта съпротивлението на пръстена трябва да бъде минимално. Дебелината му не трябва да надвишава 0,2-0,3 mm, защото твърде много ще се разшири работната магнитна междина и ще намали индукцията в нея, а от там и чувствителността на високоговорителя намалява с 0,5-1 dB.

Влиянието на медния пръстен върху параметрите на високоговорителя се изразява в разширяване на честотния обхват в областта на високите честоти.

Влиянието му върху усилвателя към който е свързан високоговорителя се изразява в това, че за високи честоти високоговорителят консумира по-голяма мощност, но в замяна на това товарът на усилвателя има по-слабо изразен реактивен характер, което е благоприятно.

### **9.3.3.РУПОРНИ ВИСОКОГОВОРИТЕЛИ**

Казаното по-горе за рупорите важи за така наречените широкогърли рупори, при които площта на гърлото на рупора е равна на площта на мембраната. По-често използван е другият тип рупорни високоговорители, така нареченият рупорен високоговорител с предрупорна камера. При него входното отворстие на рупора е с малка площ, но за сметка на това между него и мембраната е разположена така наречената предрупорна камера, която представлява акустичен трансформатор. Нейният коефициент на

трансформация е  $n = \frac{S_M}{S_0}$ , където  $S_M$  е площта на мембраната, а  $S_0$  е площта

на изходното отворстие. Този коефициент увеличава полезното съпротивление на товара върху мембраната.



Ако отражението от изхода на рупора е малко и  $\omega > \sqrt{2}\omega_{кр}$ , товарното съпротивление на рупора е  $\rho_0 c_0 S_0$ . При нормални размери на рупора това може да се изпълни при сравнително висока критична честота (от порядъка на 400-500 Hz).

За да се осигури честотна независимост на КПД е необходимо модулът на входното съпротивление на акустичната антена (т.е. системата предрупорна камера-рупор) да бъде честотно независимо в работния честотен обхват или поне да бъде слабо зависимо от честотата. Това изискване се изпълнява по различен начин за ниските и високите честоти. За високите честоти то е:

$$r_T = n^2 r_{ВХ} = r_{T0} = \sqrt{\frac{m_1}{c_k}} \quad (9.107)$$

От тук, замествайки  $r_{вх} \approx \rho_0 c_0 S_0$ , може да се намери оптималния коефициент на трансформация:

$$n^2 = \frac{r_{T0}}{\rho_0 c_0 S_0} = \frac{1}{\rho_0 c_0 S_0} \sqrt{\frac{m_1}{c_k}} \quad (9.108)$$

Когато е изпълнено това условие горната граница на ефективния честотен обхват е:

$$\omega_B = \sqrt{\frac{2}{m_1 c_k}} \quad (9.109)$$

Както се вижда от тази формула, ограничаващ фактор за ефективния честотен обхват от към високите честоти е гъвкавостта на въздуха в предрупорната камера, която трябва да бъде колкото е възможно по-малка. Като се има пред вид, че:

$$c_k = \frac{d_k}{\rho_0 c_0 S_M} \quad (9.110)$$

трябва да се намалява колкото е възможно височината на предрупорната камера. Разбира се при това трябва да се държи сметка за хода на мембраната, който е толкова по-голям, колкото по-ниска е възпроизведената честота.

При увеличаването на горната гранична честота над  $\omega_B = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{m_M c_k}}$  се намалява КПД на високоговорителя.

Ако приемем за долна гранична честотата:

$$\omega_H = \sqrt{2}\omega_{кр} \quad (9.111)$$

и като зададем допустима неравномерност на честотната характеристика  $M_H$ , то за гъвкавостта на окачването на мембраната ще получим:

$$c_1 = \frac{1}{\sqrt{2} r_H \omega_{кр} \sqrt{M_H^2 - 1}} \quad (9.112)$$

Коефициентът на полезно действие на рупорния високоговорител с предрупорна камера е:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{ел} \rho_m}{2B^2} \left(1 + \frac{m_M}{m_{зв.б}}\right) \omega_B} \quad (9.113)$$

Където  $\rho_{ел}$  е относителното електрическо съпротивление на материала на проводника, от който е навита звуковата бобина.

$\rho_m$  е относителното тегло на материала на проводника.

$B$  е индукцията във въздушната междина.

$m_M$  е масата на мембраната.

$m_{зв.б.}$  е масата на звуковата бобина.

От тук могат да бъдат направени следните изводи:

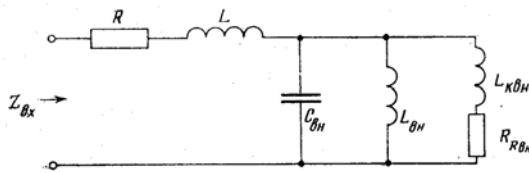
1. За навиване на звуковата бобина е по-изгодно да се използва алуминиев проводник, защото, както по-горе беше казано, за

медта  $\rho_{ел.} \rho_M = 7,6 \cdot 10^{-5} \frac{\Omega \cdot \text{kg}}{\text{m}^2}$ , а за алуминия  $\rho_{ел.} \rho_M = 16 \cdot 10^{-5} \frac{\Omega \cdot \text{kg}}{\text{m}^2}$

2. Магнитната индукция във въздушната междина трябва да бъде колкото е възможно по-голяма.

3. Масата на звуковата бобина трябва да бъде по-голяма от масата на мембраната.

4. Увеличаването на горната гранична честота е свързано с намаляване на КПД на рупорния високоговорител.

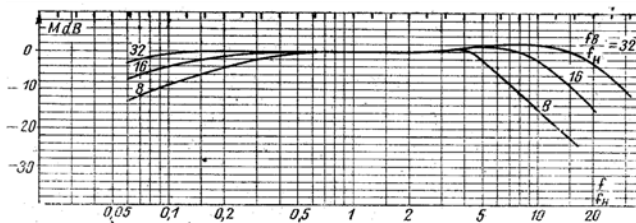


Фиг.9.26

Честотната характеристика на рупорния високоговорител се извежда от неговата заместваща схема, представена на фиг.9.26. При това за опростяване се приема, че рупорът е безкрайно дълъг и има много ниска критична честота и че предрупорната камера се състои само от гъвкавост. В

крайна сметка за неравномерността на честотната характеристика се получава изразът:

$$M_{дв} = -20 \lg \sqrt{\left[ 1 + 4 \frac{f_H^2}{f_B^2} \left( 1 - \frac{f^2}{f_H^2} \right) \right]^2 + 4 \frac{f_H^2}{f_B^2} \left( \frac{f}{f_H} - \frac{f_H}{f} \right)^2} \quad (9.114)$$



Фиг.9.27

Ако се начертаят серия характеристики за различно отношение  $f_B/f_H$ , (Фиг.9.27) могат да бъдат направени следните заключения:

1. Характерните честоти  $f_H$  и  $f_B$  не съвпадат с долната и горна гранични честоти на високоговорителя.

2. Честотата  $f_H$  се намира приблизително в средата на възпроизведения честотен обхват, а честотата  $f_B$  е извън него, ако приемем, че той се определя за неравномерност 3 dB.

3. Стръмността на спадане на честотната характеристика е 12dB/oct към високите честоти и 6 dB/oct към ниските честоти.

4. Неравномерността на честотната характеристика се дължи на критичната честота, крайните размери на изходящият отвор на рупора и на факта, че някои размери на предрупорната камера стават съизмерими с дължината на вълната.

Когато размерът на отвора е по-малък от оптималното, неравномерността на честотната характеристика се увеличава, но в нея се получава отскок, значително превишаващ средното ниво.

За да се намали общата дължина на рупора, често той се изработва във вид на вмъкнати една в друга секции (така наречения нагънат рупор), при което дължината се намалява толкова пъти, колкото е броя на секциите. Този вид рупори често се използват при рупорните

високоговорители за външно озвучаване и в рупорите за преносими мегафони.

#### 9.3.4. ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВИСОКОГОВОРители

В последно време беше "преоткрит" за производството на високоговорители пиезоелектрическият принцип на електромеханично преобразуване. Допълнен с нови материали и технологии, той позволи на редица водещи фирми да започнат производството на пиезоелектрически високочестотни високоговорители с много добри параметри при ниска цена, висока надеждност и малко тегло.

При този вид високоговорители звеното електромеханичен преобразувател е от пиезоелектрически тип и работата му се базира на обратния пиезоелектрически ефект, теоретически предсказан от Липман през 1881 година, а след това експериментално доказан от братята Кюри. Първите пиезоелектрически високоговорители са конструирани от Николсон през 1917 година на базата на кристали от сегнетова сол. Тези първи пиезоговорители поради своите недостатъци бързо са били изместени от електродинамичните високоговорители. Едва с появата на нови материали – пиезокерамиката и високополимерното пиезофолио и с разработването но по – свършени конструкции стана възможно възраждането на пиезоговорителите.

Пиезоефект, както и обратен пиезоефект не се проявяват в кристали или структури с център на симетрия. Естествен пиезоефект се проявява в някои кристали като кварц, турмалин, сегнетова сол и други, а изкуствен пиезоефект може да бъде създаден в някои диелектрици чрез създаването на пиезоелектрическа текстура т.е. полярна анизотропия (нееднаквост на свойствата в различни посоки спрямо посоката на кристалографските оси или на поляризация). Това става с помощта на специална обработка с електрическо поле, наречена поляризиране.

Зависимостта на свойствата на пиезоелектриците от посоката спрямо кристалографските оси или посоката на поляризиране довежда до това, че в най – общия случай на напълно несиметричен пиезоелектрик той може да има двадесет и една различни константи на еластичност, шест диелектрични проницаемости и осемнадесет пиезоелектрически константи. Реалните пиезоелектрици са симетрични и това довежда до значително намаляване броя на константите. Освен това, механичните свойства зависят от електрическото състояние на пиезоелектрика и обратното – електрическото му състояние зависи от механичните напрежения.

Важни параметри на пиезоелектриците са така наречените пиезоелектрически константи. За характеризиране на пиезосвойствата на даден материал най – често се използва пиезомодула, който се означава със символа  $d_{mi}$ , като с индексът  $m$  се означава посоката на електрическото поле. Той може да приема стойности от 1 до 3 и при това с 1 се означава посоката по оста  $x$ , с 2 – посоката по оста  $y$  а с 3 – посоката по оста  $z$ , която е прието да съвпада с главната кристалографска ос. С индексът  $i$  се означава компонентата на механическото напрежение или деформация. Този индекс може да приема стойности от 1 до 6, като с цифрите от 1 до 3 се означават компонентите по трите оси както по – горе, а с цифрите от 4 до 6 – компонентите на приплъзване в трите равнини. Пиезомодулът определя деформацията, възникваща в свободен пиезоелектрик при зададено приложено електрическо напрежение, или поляризацията за зададено механично напрежение при постоянна напрегнатост на електрическото поле. Измерва се в  $[m/V]$  или  $[C/N]$ .

Друга важна характеристика на пиезоелектрика е коефициентът на електромеханична връзка, който характеризира тяхната способност за електромеханично преобразуване. Квадратът на този коефициент е равен на плътността на изходната енергия към плътността на входната енергия, като при това не се държи сметка за диелектричните и механични загуби.

$$K_{mi} = \frac{d_{mi}}{\sqrt{\epsilon_{mm} \epsilon_0 S_{ii}^E}} \quad (9.115)$$

където:  $\epsilon_{mm}^{\sigma}$  – относителна диелектрична проницаемост на пиезоелектрика.

$\epsilon_0$  – диелектрична проницаемост на вакуума

$S_{ii}^E$  – константа на еластичност

Величината  $\frac{J_{mi}}{tg\delta}$  влиза в израза за електромеханичния коефициент на полезно действие на преобразувателя и колкото тя е по – голяма, толкова по – висок е КПД.

Най – 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 за приплъзване

Стойностите на  $K$  не могат да бъдат по – големи от единица и за известните материали се движат от няколко стотни за кварца до 0,8 – 0,9 за някои пиезополупроводници.

Пиезоелектричните материали могат да бъдат разделени на четири основни класа – естествени пиезоелектрици, пиезочерамични материали, пиезополупроводникови материали и високо полимерни пиезоматериали. От тях в пиезоговорителите сега намират приложение пиезочерамиките и високополимерни пиезоматериали.

Пиезочерамиките представляват поликристални сегнето-електрически материали. В процеса на производството в тях се образува доменна структура, в която електрическите диполи са произволно ориентирани в пространството. В това състояние сегнетокерamikата няма пиезоелектрически свойства. За да получи такива, тя се подлага на поляризиране. Това става, като нагретият над точката на Кюри образец се поставя в силно електрическо поле с напрегнатост няколко киловолта на сантиметър и температурата постепенно се намалява до стайна. В резултат на това в керamikата се извършва преориентиране на домените и тя добива пиезосвойства. При евентуално следващо нагриване отново до температури близки до точката на Кюри, пиезосвойствата необратимо изчезват.

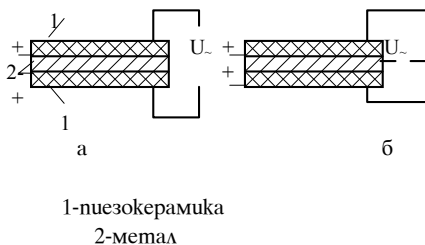
Един от първите пиезочерамични материали, намерил широко приложение е бариевият титанат ( $BaTiO_3$ ). Температурата на Кюри за този материал е около  $120^\circ$  и за това преобразуватели, изработени от него могат да бъдат използвани при температури до  $60^\circ C$ . Постепенно преобразувателите от бариев титанат отстъпват място на такива от оловен цирконат – титанат (ОЦТ) с химическа формула  $Pb(ZrTi)O_3$ . В Русия тези пиезочерамики се означават със съкращението ЦТС, а в САЩ и някои западни страни – PZT. Те се отличават с по – голяма чувствителност, по висока температура на Кюри и повишена стабилност на параметрите във времето. В последно време се използват и така наречените ниобатни керамики, които имат още по – висока температура на Кюри.

Другият клас пиезоматериали, които намират приложение в пиезоговорителите е този на високополимерните пиезоматериали, чиито

типични представители са поливинилденфлуорида (PVDF) и поливинилфлуоридрида (PVF). Те представляват полукристални високополимерни материали, състоящи се от кристални ламели, примесени с области от аморфна фаза. Дължината на молекулата е около 0,5 микрона, а дебелината на ламелата – около  $10^{-8}$  м, поради което всяка молекула се оказва многократно нагъната вътре в ламелата. Високополимерните материали се използват във вид на тънки фолия.

Както вече беше казано, изотропният материал не може да проявява пиезоелектрически свойства. За създаване на анизотропия високополимерните материали се подлагат на специална обработка, която има много общи черти с поляризирането на пиезокерамиката. За целта материала се нагрява до температура, по висока от температурата на остъкляване, след което се прилага високо напрежение – десетки киловолта на милиметър. Едновременно фолиото се разтяга едноосно или двуосно, което довежда до ориентиране на ламелите перпендикулярно на посоката на разтягане. Следва охлаждане до стайна температура, след което обработката е завършена. При едноосно разтягане силно се увеличава  $d_{31}$ , а  $d_{32}$  намалява. При двупосочно разтягане се увеличават и двата пиезомодула, но в по малка степен, отколкото  $d_{32}$  при едноосното разтягане. Така например за моноориентирани фолия е получена стойност на  $d_{31} = 20 \left[ \frac{\text{pC}}{\text{N}} \right]$  а за биориентирани фолия са измерени  $d_{31} = 10 \left[ \frac{\text{pC}}{\text{N}} \right]$  и  $d_{32} = 10 \left[ \frac{\text{pC}}{\text{N}} \right]$ .

Пиезокерамичните електроакустични преобразуватели, представляващи монолитно тяло (призма или цилиндър) са акустически "твърди" и нямат добро импедансно съгласуване с въздушната среда. За това този вид преобразуватели се използват главно като ултразвукови такива за работа в течност или в твърдо тяло. За излъчване на звукови вълни във въздушна среда са по-подходящи така наречените биморфни преобразуватели, които трептят на огъване. При този вид колебания скоростта на звука е значително по ниска, а амплитудата на колебанията – по-голяма. В резултат на по-доброто съгласуване с въздушната среда КПД на този вид преобразуватели е значително по висок.



Фиг.9.28

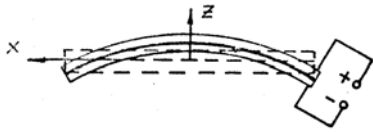
Биморфният преобразувател

представлява тънка пластина, съставена от две пиезокерамични пластини, твърдо залепени една за друга, както е показано на фиг.9.16. Понякога за коригиране на механичните характеристики на биморфа между пиезокерамичните пластини е залепена метална такава. Знаците "+" и "-" показват посоката на поляризиране на пиезокерамиката. Залепените по този начин пиезопластини се оказват свързани механически насрещно, а електрически могат да бъдат свързани паралелно (фиг.9.28-а) или последователно (фиг.9.28-б). В пиезоговорителите обикновено се използва конструкцията, показана на фиг.9.28-а поради по-ниския електрически импеданс.

Принципът на действие на биморфния преобразувател е следният:

Поради факта, че пиезопластините са свързани механически насрещно, при подаване на напрежение с определена полярност едната пластина се стреми да увеличи размера си по направление **x**, а другата се

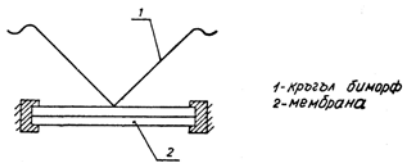
стреми да го намали. В резултат се получава огъване на пластината, подобно на паничка (Фиг.9.29). При промяна на полярността на подаваното напрежение, пластината се огъва в обратна посока.



Фиг.9.29

Понякога се използват така наречените "пасивни" биморфи, които представляват също две пластини, залепени една за друга, но едната от тях е от пиезоматериал, а другата е от метал, обикновено бронз или месинг. При това диаметрите на двете пластини могат да бъдат еднакви, или този на металната пластина да бъде по-голям. Принципът на действие е подобен на принципът на "активния" биморф с тази разлика, че когато пиезопластината изменя диаметъра си, металната пластина не го изменя и ефекта на огъване е два пъти по-слаб.

При колебанието на биморфния вибратор се оформят зони с противофазно излъчване. Противофазното излъчване предизвиква акустично



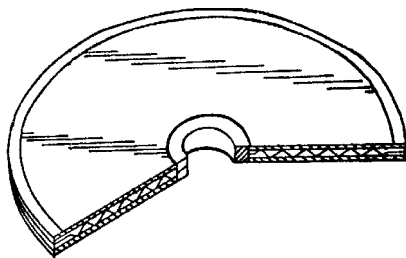
Фиг.9.30

късо съединение, което силно намалява коефициента на полезно действие на елемента като излъчвател. За избягване на това явление, както и за допълнително съгласуване с въздушната среда в пиезоговорителите биморфа се комбинира с допълнителна мембрана, най-често хартиена (фиг.9.30). Пак за увеличаване

на КПД пиезоговорителите често се комплектоват с рупор, който за високите честоти има малки размери.

Друга особеност на биморфния елемент е сравнително високият качествен фактор, който води до значителна неравномерност на честотната характеристика. За избягване на този недостатък са предложени голям брой технически решения - залепване на демпфаш материал върху биморфа, използването на няколко биморфа и мембрани, чиито резонансни честоти са така подбрани, че се разполагат равномерно в номиналния честотен обхват и оформят честотна характеристика с малка неравномерност, използването на специален биморф и др.

Например, пиезо говорителя на фирмата "Моторола", който намира доста широко приложение поради добрите си параметри има следното устройство (фиг.9.31):



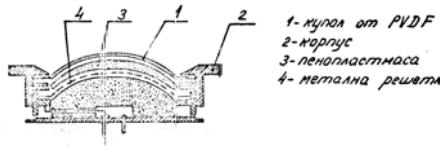
Фиг.9.31

Биморфният вибратор на този високоговорител е съставен от две пиезокерамични с дебелина 0,1 мм и диаметър 23 мм, между които е залепена специална гофрирана метална пластина. Пластината спомага за намаляване на резонансните пикове в честотната характеристика, без значително намаляване на чувствителността. Освен

това, за допълнително изглаждане на честотната характеристика върху долната страна на биморфа е залепен демпфаш елемент от специална гума. Общата дебелина на вибратора без демпфашия елемент е 0,5 мм.

Биморфният вибратор е залепен за конусна хартиена мембрана, пред която е оформена предрупорна камера. Отнемането на звуковото налягане от нея става през 6 радиални процепа, което премахва влиянието на радиалните резонанси на камерата. Рупорът също е със специална форма и обединява действието на шестте процепа. Неравномерността на амплитудно-честотната му характеристика в честотния обхват от 5 до 20 kHz е от порядъка на 4 dB и е без остри пикове и провали. Коефициентът на

хармонични изкривявания е под 1%. При подаване на клемите на високоговорителя на напрежение 2,8V, което отговаря на 1W за импеданс 8Ω средното звуково налягане в същия честотен обхват е равно на 93dB на разстояние 1m по оста на високоговорителя. Особено в случая е това, че импедансът на последния е подобен на импеданса на кондензатор със стойност около 0,15μF и възлиза на 2kΩ при 1kHz и около 100Ω на 20kHz, което показва, че КПД е значително по-голям от този на другите типове високоговорители. Друго предимство на този високоговорител е и факта, че за честоти под 5kHz спадането на звуковото налягане е плавно със стръмност 14 dB/oct. Това дава възможност той да



Фиг 9 33

бъде използван без разделителен филтър в озвучителни тела с мощност до 100 - 150W. Все пак, поради по-дългите си преходни процеси този високоговорител има характерен звук, който не се харесва на всички слушатели.

Високоговорителите с използване на високополимерно пиезофолио могат да бъдат разделени на два основни вида - пиезоговорители с едноосно ориентирано (моноориентирано) фолио, при които излъчващата повърхност е цилиндър или част от цилиндър, и пиезоговорители с двуосно ориентирано (биориентирано) фолио, при които излъчващата повърхност е част от сфера.



Фиг.9.32

Представителите на първия вид (фиг.9.32) конструктивно представляват ивица от моноориентирано високополимерно пиезофолио, което е метализирано и посоката на ориентране е по дължината на ивицата. Последната е опъната около цилиндър от пенопластмаса, поддържан от метален перфориран скелет. Метализираните повърхности са свързани към съгласуващ трансформатор с преводно отношение от 1:5 до 1:12, служещ за импедансно съгласуване. При подаване на променливо напрежение и ивицата започва да пулсира по дължина с честотата на подаваното напрежение. Поради малката маса на ивицата (около 100 милиграма) чувствителността е сравнима с тази на лентовите високоговорители при също така гладка честотна характеристика.

Характеристиката на насоченост е несиметрична по отношение на широчина и височина.

Вторият вид високоговорители (фиг.9.33) представляват купол, изтеглен от биориентирано фолио, като формата му се поддържа от пенопластмаса, положена върху метален перфориран купол. Параметрите му са подобни на тези на високоговорителя от моно ориентирано фолио, като чувствителността му е малко по висока, а характеристиката на насоченост е симетрична.

Пиезоелектрическите високоговорители намират приложение изключително само като високочестотни поради невъзможността да се получи голяма амплитуда на колебание на електромеханичният преобразувател.

### 9.3.5.ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИ ВИСОКОГОВОРИТЕЛИ

Този вид високоговорители се характеризират с това, че звеното електромеханичен преобразувател е от електростатичен тип. Както вече казахме, принципът на електромеханичното преобразуване при тези преобразуватели се базира на възникването на механична сила на привличане между плочите на зареден кондензатор. Големината на тази сила е:

$$F = \frac{Q^2}{2Cd} = \frac{\epsilon SU^2}{2d^2} \quad (9.116)$$

Тук  $Q$  е зарядът на кондензатора,

$C$  - капацитет

$d$  - разстоянието между електродите.

$\epsilon$  - диелектрична константа. За въздух  $\epsilon = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$

$S$  - площта на единият електрод

$U$  - напрежение между електродите

Когато между плочите на кондензатора е подадено само променливо напрежение, въздействащата сила е с удвоена честота, понеже силата не зависи от полярността на напрежението, а само от неговата големина и то на квадрат:

$$F = \frac{\epsilon SU_m^2 \sin^2 \omega t}{2d^2} = \frac{\epsilon SU_m^2}{4d^2} - \frac{\epsilon SU_m^2}{4d^2} \cos 2\omega t = F_0 - F_{2\omega} \quad (9.117)$$

За да се получи не изкривено преобразуване, върху електродите на електростатичният високоговорител се подава високо постоянно напрежение  $U_0$ , наречено поляризиращо. Тогава силата ще бъде:

$$F = \frac{\epsilon S}{2d^2} (U_0 + U_m \sin \omega t)^2 = \quad (9.118)$$

$$\frac{\epsilon S}{2d^2} \left( U_0^2 + \frac{U_m^2}{2} + 2U_0 U_m \sin \omega t - \frac{U_m^2}{2} \cos 2\omega t \right) = F_0 + F_{\omega} - F_{2\omega}$$

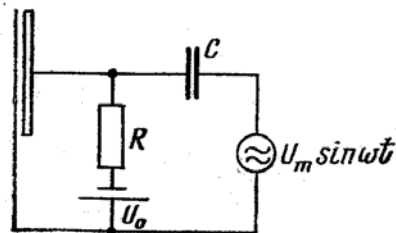
Вижда се, че между двата електрода действуват три сили, едната от които е постоянна, а другите две са променливи. Едната от променливите сили е с честотата на захранващото напрежение и е полезната сила, а другата е с удвоената честота на това напрежение и показва, че самият принцип на преобразуване е свързан с появата на втора хармонична. За да се намали относителната амплитуда на съставката с удвоена честота трябва амплитудата на съставката с честотата на сигнала да бъде много по-голяма от тази на съставката с удвоена честота т.е.:

$$2U_0 U_m \gg \frac{U_m^2}{2} \quad (9.119)$$

От това неравенство можем да получим условието за намаляване на втората хармонична:

$$U_0 \gg \frac{U_m}{4} \quad (9.120)$$

Или постоянното поляризиращо напрежение трябва да бъде значително по-голямо от амплитудата на променливото напрежение.

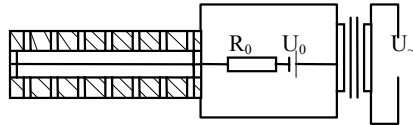


Фиг.9.34

Примерната конструкция и свързването на един едностранен електростатичен високоговорител е показана на фиг.9.34. При тази конструкция, поради наличието на постоянната сила се налага мембраната да бъде силно опъната, което довежда до повишаване на резонансната честота и за това този вид високоговорители се използват само като високочестотни. Допълнително предимство на



високочестотните високоговорители е малкият (от порядъка на микрометри) ход на мембраната, дори и при излъчване на значителни мощности. При някои високочестотни високоговорители дори е възможно за създаване на необходимата дистанция между мембраната и неподвижния електрод да се използват неравностите и чапльците, получени при обработката на последния. Мембраната е изработена от метализирано пластмасово фолио с дебелина около 25 микрометра, поради което нейната маса е много малка. Това позволява получаването на много кратки преходни процеси и в резултат високоговорителя звучи много добре.



Фиг. 9.35

За направата на нискочестотни кондензаторни високоговорители се използва така наречената двустранна или диференциална конструкция, показана на фиг.9.35. При нея мембраната се намира между двата неподвижни перфорирани електрода, като променливото напрежение се подава в противофаза на тях. В тази конструкция при липса на сигнал постоянните сили на привличане взаимно се

уравновесяват. Това, обаче, престава да бъде вярно при големи амплитуди на колебание, когато мембраната твърде много се отдалечава от единият електрод и се приближава до другия - получава се така нареченото електростатично "омекване" на мембраната. Получената "електрическа еластичност" е обратна по знак на механичната и системата е стабилна докато първата е по-малка по абсолютна стойност от втората. За да е стабилна системата трябва да е спазено неравенството  $x < 20d$ , където  $x$  е амплитудата на колебание, а  $d$  е разстоянието между мембраната и всеки един от неподвижните електроди. При известно разстояние можем да намерим критичното постоянно напрежение:

$$U_{0cr} = \sqrt{\frac{d^3}{2c\epsilon_0 S}} \quad (9.121)$$

Когато мембраната е включена директно към източника на поляризиращо постоянно напрежение с малко вътрешно съпротивление, електрическият ѝ товар се променя в зависимост от нейното положение спрямо неподвижните електроди (същото важи и когато електродът е само един). Следователно и силата се променя при промяната на разстоянието до неподвижния електрод, което е причина за появата на нелинейни изкривявания. За избягване на това явление последователно на захранващият източник се свързва голямо постоянно съпротивление  $R_0$ , което не позволява бърза промяна на заряда и мембраната работи в така нареченият режим на постоянен товар. При този режим силата е:

$$F = \epsilon \frac{S}{d^2} U_0 U_s \quad (9.122)$$

Освен това съпротивлението играе стабилизираща роля по отношение на електрическото "омекване", като честотата до която високоговорителя е стабилен е:

$$f \gg \frac{1}{2R_0 c} \quad (9.123)$$

Тук с отново е механичната гъвкавост на окачването на мембраната.

При нискочестотните високоговорители амплитудата на колебание е няколко десети от милиметъра, при което разстоянието между мембраната и неподвижните електроди е 4 до 8 mm. Това довежда до необходимостта от поляризиращо напрежение от над 10 kV и това представлява определено

неудобство. Друго неудобство представлява фактът, че поради електростатичното "омекване" на окачването на мембраната, тя все пак трябва да бъде силно опъната и това, съчетано с малката маса довежда до сравнително висока резонансна честота. Както знаем, ефективността на високоговорителя като излъчвател рязко спада за честоти под неговата резонансна честота. За да се избегне това противоречие обикновено изкуствено се увеличава масата на мембраната на нискочестотните високоговорители, което понижава резонансната честота за сметка на известно удължаване на преходните процеси.

За да определим от какво зависи чувствителността на кондензаторният високоговорител, нека се върнем към израза за излъчваната акустична мощност от плосък бутален излъчвател. За да можем да го използваме директно, ще приемем, че мембраната на електростатичния високоговорител има кръгла форма с диаметър  $D$ :

$$P_{\text{ср}} = \frac{\pi \rho_s}{32 c_0} \frac{F_m^2 D^4}{(m + m_R)^2} \quad (9.124)$$

Напомниме, че излъчваната акустична мощност може да се определи по този израз в честотния обхват между резонансната честота на мембраната и честотата, при която дължината на излъчваната звукова вълна стане съизмерима с размера на мембраната ( $D \approx \frac{\sqrt{2}}{\pi} \lambda$ ).

След като заместим в изразът 9.124 изразът за силата от 9.122, като пренебрегнем масата на мембрана, която е много по-малка от присъединената маса въздух, която е  $m_R = \frac{2}{3} \rho_s D^3$  и като вземем пред вид,

че  $D^2 = \frac{4}{\pi} S$ , получаваме:

$$P_{\text{ср}} = \frac{9\pi^2 \varepsilon^2}{512 \rho_s c_0} U_m^2 \frac{U_0^2 S}{d^4} = K \frac{U_0^2 S}{d^4} \quad (9.125)$$

От този израз се вижда, че когато амплитудата на променливото напрежение, подавано на високоговорителя е постоянна, излъчваната акустична мощност е пропорционална на множителя  $\frac{U_0^2 S}{d^4}$ . Комбинацията от стойности на тези параметри зависи от честотния обхват на високоговорителя и е резултат на необходимия компромис.

Нелинейните изкривявания на електростатичните високоговорители се появяват в резултат на принципа на действие и както вече казахме, за да бъдат намалени трябва да се спазват следните условия:

-амплитудата на променливото напрежение да бъде много по-малка от поляризиращото напрежение (формула 9.120).

-амплитудата на отклонение на мембраната да бъде много по-малка от разстоянието между нея и неподвижните електроди (или електрод) -  $x < 20d$ .

Ако тези две условия са изпълнени, нелинейните изкривявания при електростатичните високоговорители са много малки, понеже мембраната е много лека, а силата е приложена равномерно върху цялата площ при което се избягва появата на локални резонанси.

При високоговорителите, излъчващи широка честотна лента, за да се увеличи горната гранична честота, понякога високоговорителя се разделя на секции, които се свързват през съответните съпротивление, които са така подбрани, че при ниски честоти работят всички секции, а при високи честоти секциите постепенно се изключват така, че общият им размер е по-малък от дължината на вълната на най-високата излъчвана честота.

Предимствата на електростатичните високоговорители са:

- Равномерна честотна характеристика без резки пикове и провали.
- Малки нелинейни изкривявания
- Кратки преходни процеси

Основен техен недостатък е необходимостта от високо постоянно поляризиращо напрежение, което изисква допълнителен източник. Освен това при работа на високоговорителя на открито възниква опасността от възникване на неконтролируем разряд при повишаване на влажността, което може да го повреди. Освен това необходимостта от високо променливо напрежение довежда до необходимост от повишаващ трансформатор, който е източник на нелинейни изкривявания. Трансформаторът има и допълнителното неудобство, че работи на капацитивен товар. Тези две сериозни неудобства довеждат до това, че този вид високоговорители се използват доста рядко.