

Инж. Стойчо Иванов Христов

# **ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА**

СОФИЯ  
1998 ГОД.

## ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА

Електронните компоненти на съвременните озвучителни системи със своята елементна база и схемотехнически решения са достигнали високо ниво на съвършенство, което им позволява да обработват електрическите сигнали от звуковия спектър без забележими изкривявания. За съжаление, същото не може да се каже за последното звено в тези системи, а именно електроакустичния преобразувател (високоговорител или озвучително тяло).

Озвучителните тела представляват електроакустични преобразуватели, състоящи се от един или няколко високоговорителя, които възпроизвеждат различни честотни диапазони, акустична кутия и разделителен филтър. Предназначени са за възпроизвеждане на музикални и говорни програми, като качеството на възпроизвеждане обикновено е по-високо от това при високоговорителите в друго акустично оформление (кутия на радиоапарат или телевизор и др.). Подобряването на качествените показатели на Озвучителните тела може да се постигне чрез подобряване на показателите на отделните им елементи, изброени по-горе - високоговорителите, кутията и филтъра.

Качествен скок в развитието на Озвучителните тела представлява разделянето на звуковия обхват на под обхвати, които се възпроизвеждат от отделни високоговорители, специално конструирани така, че да възпроизвеждат само една определена част от целия спектър, но това възпроизвеждане да бъде с високо качество. При това разделянето на входящия електрически сигнал на под обхвати и подаването на всеки под обхват на съответния високоговорител става с помощта на електрическия разделителен филтър. От параметрите на този филтър до голяма степен зависи равномерността на амплитудно честотната характеристика на озвучителното тяло. В зависимост от броя ленти, на които се разделя звуковия обхват, Озвучителните тела биват двулентови, три лентови и четири лентови, като последните биват такива, при които на две части е разделена високочестотната лента (система със супертуитер), и такива, при които е разделена нискочестотната лента (система със суббас излъчвател).

Влиянието на акустичното оформление (кутията) се изразява в получаването на една или друга долна гранична честота. Дълго време озвучителните тела са произвеждани само със затворен обем. В последно време, благодарение на теоретичните постановки, направени от Новак, Смол, Тиле, Бенсон и др., кутията и високоговорителя се разглеждат в неразривна връзка като единна система. В резултат на това все по-широко приложение намират озвучителните тела с бас рефлекс и тези с пасивна мембрана, както и теснолентовите нискочестотни излъчватели, при които възпроизвеждането на ниските честоти става със значително по-висок КПД и това прави възможно постигането на значително по-ниска долна гранична честота. Разбира се, тук също има ограничения и не може да се получи много ниска долна гранична честота, ако нискочестотният високоговорител има висока резонансна честота. За да се намали честотата на резонанса на високоговорителя се използва специално окачване на трептящата им система с много голяма гъвкавост, магнитната система се прави с висока индукция на магнитната поле във въздушната междина, което позволява да се увеличи масата (и от там да се намали резонансната честота), без да се намали чувствителността, регулира се качественият фактор до неговата оптимална стойност и т.н. Въпреки постигнатите успехи, възпроизвеждането на ниските честоти с добро ниво продължава да бъде не докрай решен проблем в конструирането на озвучителните тела и високоговорителите.

Нека най-напред разгледаме по-подробно основните параметри на озвучителните тела.

Техническите параметри на озвучителните тела биват входни и изходни. Тъй като озвучителните тела 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 озвучителните тела са свързани с някои специфични геометрични понятия:

Работен център на озвучителното тяло се нарича точката, от която се измерва разстоянието между него и измервателния микрофон или слушателя. Обикновено за такъв се приема геометричния център на симетрия на лицевата площ на озвучителното тяло, ако производителя не е указал изрично мястото на работния център.

Работна ос на озвучителното тяло е правата, минаваща през работния му център в направление на преимущественото му излъчване.

Електрическите характеристики на озвучителните тела са:

Пълно входно електрическо съпротивление (входен електрически импеданс)  $Z_{вх}$  на озвучителното тяло. 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:

$$Z_{BX} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} \quad (1)$$

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



Fig. 1

Зависимостта на входния електрически импеданс от честотата се нарича импедансна характеристика на озвучителното тяло. Типичната импедансна характеристика на озвучително тяло с най-разпространения тип високоговорители - електродинамичния, е показана на фиг. 1.

Номиналното пълно входно електрическо съпротивление (номинален импеданс) е стойността на активното съпротивление, с което се замества озвучителното тяло при измерване на електрическата мощност, която то 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 озвучително тяло. 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 озвучителното тяло се претоварва и неговите нелинейни изкривявания рязко нарастват.

Резонансна честота. По принцип, този параметър не е електрически, тъй като при тази честота настъпва резонанс на механичните елементи на трептящата система на високоговорителя и акустичните елементи на кутията, но чрез приведеното съпротивление той оказва влияние на електрическата страна на озвучителното тяло. Резонансната честота се дефинира като честотата, за която входният импеданс получава своя най-нисък честотен максимум. Стойността на резонансната честота зависи от масата и гъвкавостта на трептящата система на високоговорителя и от гъвкавостта на обема въздух в кутията, както и от елементите на басрефлекса. За високоговорител без акустично оформяне тя е :

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

Тази дефиниция е валидна за високоговорителите, при които звеното електромеханичен преобразувател е преобразувател-двигател от индуктивен тип, докато при преобразувателите от капацитивен тип стойността на входното електрическо съпротивление при резонанс придобива своя най-нисък честотен 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:

$$Q = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{m}{c}} = \frac{w_0 m}{r} = \frac{1}{w_0 c r} \quad (3)$$

Тук  $c$  и  $r$  е означено съпротивлението на общите механични загуби в трептящата система на високоговорителя, което включва механичните загуби и внесените активни загуби, като и загубите в обема. Поради това така определения качествен фактор се нарича пълен или тотален.

Електрическа мощност - това представлява мощността, която се разсейва върху активно съпротивление със стойност равна на модула на номиналния импеданс на озвучителното тяло, когато върху него е подадено напрежение, равно на напрежението върху входните клеми на озвучителното тяло. Съгласно това определение, електрическата мощност е равна на:

$$P_E = \frac{U_{BX}^2}{|Z_{НОМ}|} \quad (4)$$

Паспортна мощност - тя е мярка за устойчивост на озвучителното тяло на електромеханично въздействие и характеризира устойчивостта на прегряване и механичната здравина на неговите елементи - високоговорители и филтър - 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 озвучителното тяло и се проверява от

производителя при типови и периодични изпитвания, като за целта на озвучителното тяло се подава гореспоменатия шумов сигнал със заложената мощност и се оставя да работи в продължение на 100 часа, след което се измерват неговите параметри. То трябва да ги е запазило, и да не проявява ефекти на звънтене, хриптене и т.н., които биха попречили на нормалното му функциониране. Ефективната мощност на шумовия сигнал, която озвучителното тяло все още издържа при тези условия, е неговата паспортна мощност. На английски тази мощност се нарича *power handling capacity* и тя е мощността, която обикновено се обявява за озвучителните тела и служи за съгласуването им с крайния усилвател. Понякога с рекламна цел някои фирми обявяват музикалната мощност, която е по-голяма от паспортната, но както ще видим по-надолу не може да се използва при съгласуването на озвучителното тяло и крайния усилвател.

Номинална мощност - обявява се от производителя и представлява мощност, равна на номиналната изходна мощност на усилвателя, с който озвучителното тяло 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 озвучителното тяло 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 нискочестотният високоговорител на озвучителното тяло и се дефинира като максималната синусоидална мощност за честота от номиналния честотен обхват, но под 250Hz, 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 озвучителното тяло създава звуково налягане с определена стойност на определено разстояние от работния си център по работната си ос. Тя е свързана с чувствителността на озвучителното тяло и се използва при измерването на някои параметри като коефициент на хармонични изкривявания и др., и при някои изпитвания на озвучителните тела главно от Hi-Fi клас. Тя има различна стойност не само за озвучителните тела 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 озвучителното тяло издържа без да настъпят необратими механични повреди след 10 цикъла при режим редуващи се 1min въздействие на електрическия сигнал следвано от 2min изключено състояние. Максималната дълговременна мощност е винаги по-голяма от паспортната мощност на озвучителното тяло.

Максимална кратковременна мощност - представлява електрическата мощност на специален шумов сигнал в определен честотен обхват, която озвучителното тяло издържа, без да настъпят необратими механични повреди след 60 цикъла при режим 1s въздействие на електрическия сигнал, следвано от 1min 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.

Електроакустичните характеристики на озвучителните тела определят озвучителното тяло 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 създаването от озвучителното тяло 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 клемми. 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 озвучителното тяло се определя в пространство, за което са изпълнени условията за съществуване на 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

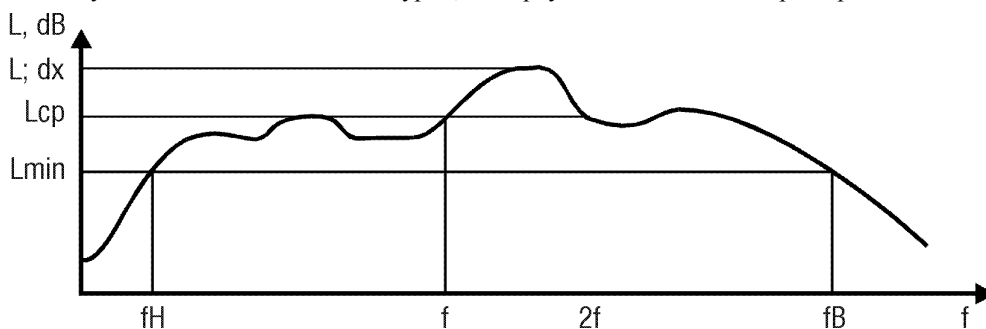


Fig. 2

интерференциите между пряката и отразена звукови вълни. Самото снемане на честотната характеристика става, като на входните клеми на високоговорителя се подава синусоидален 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 озвучителното тяло 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. Примерна честотна характеристика на озвучително тяло, снета с помощта на синусоидален сигнал в условията на свободно звуково поле е показана на фиг.2.

Ефективен обхват на възпроизвеждане - това е честотния обхват в който озвучителното тяло 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 4000Hz, или обхвата от 250 до 5000Hz. Допустимата стойност на понижаване на звуковото налягане е различна за различните категории озвучителни тела, като за тези от категория Hi-Fi е 8dB, а при говорителите за обща употреба е от 10 до 14dB. Някои фирми с рекламна цел приемат понижаване с 20 и повече dB, при което така определенения ефективен честотен обхват се разширява, като с това се преследва рекламна цел. За това при сравняване на две озвучителни тела 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 озвучителни тела, 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 озвучителни тела 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:

$$M = L_{MAX} - L_{MIN} \quad (5)$$

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 озвучителни тела за обща употреба неравномерност-та не надвишава 12dB. За озвучителните тела 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:

$$\begin{aligned} M_1 &= L_{MAX} - L_{CP} \\ M_2 &= L_{CP} - L_{MIN} \quad (6) \end{aligned}$$

$$M = M_1 + M_2$$

На фиг.3 е показана характеристика на озвучително тяло от клас Hi-Fi, на която са означени  $L_{MAX}$ ,  $L_{MIN}$ ,  $L_{CP}$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ .

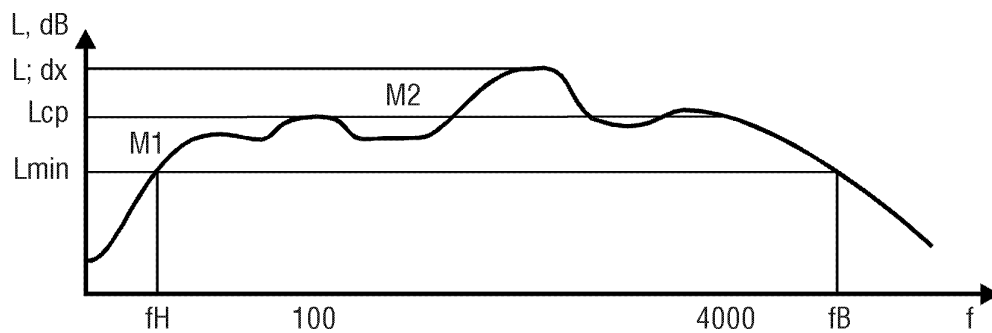


Fig. 3

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

$$p_{cp} = \sqrt{\frac{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots + p_n^2}{n}}, \quad (7)$$

където:

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

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

Чувствителност - представлява отношението на създаваното от озвучителното тяло звуково налягане  $p$  на разстояние  $1m$  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:

$$A = \frac{p}{\sqrt{P_E}} \cdot \frac{r}{r_0}, Pa / \sqrt{W} \quad (8)$$

където:

$A$  - чувствителност, ;

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

$r_0$  - реперно разстояние, обикновено  $1m$ .

Така определената чувствителност се отнася за една честота, или ако на озвучителното тяло е подаден розов шум с определен честотен обхват, определената чувствителност се отнася за този обхват (обикновено една терца или една октава). При сравняване на две озвучителни тела, по-чувствително е това от тях, което 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 озвучителното тяло за определен честотен обхват на  $1m$  от работния център по работната ос, към корен квадратен от стойността на подаваната електрическа мощност:

$$A_x = \frac{p_{cp}}{\sqrt{P_E}}. \quad (9)$$

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  $1m$  при подаване на електрическа мощност  $1W$ . 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. Резултатът 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) 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.

При сравняване на озвучителни тела 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 озвучителните тела - представлява зависимостта на звуковото налягане, създавано от озвучителното тяло 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. За озвучителните тела обикновено се снима честотната характеристика под ъгъл  $\pm 15^\circ$  спрямо работната ос и се сравнява с тази по работната ос.

Акустична мощност - представлява средната по време мощност на излъчвания от озвучителното тяло 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 озвучителното тяло.

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

Коефициент на полезно действие-представ- лява отношението на излъчената от озвучителното тяло акустична мощност  $P_{ak}$  към подаваната електрическа мощност  $P_E$  за честота  $f$ :

$$\eta = \frac{P_{ak}}{P_E}. \quad (10)$$

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

Нелинейни изкривявания - както вече казахме, озвучителното тяло 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 спектралните 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 озвучителното тяло 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.

Итермодуляционни изкривявания - представляват изкривявания, породени от взаимодействието между сигнали с различни честоти, подадени едновременно на входа на озвучителното тяло. 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 озвучителното тяло 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  $nf$  и общото звуково налягане:

$$d_{hn} = \frac{p_n}{p}. \quad (11)$$

Коефициентът на хармонични изкривявания за конкретно озвучително тяло 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  $n \geq 2$ :

$$d_n = \sqrt{d_{h2}^2 + d_{h3}^2 + d_{h4}^2 + \dots} = \frac{\sqrt{p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 + \dots}}{p}. \quad (12)$$

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 озвучителното тяло 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:

$$d_{i2} = \frac{p_{(f_2-f_1)} + p_{(f_2+f_1)}}{p_{f_2}} \quad (13)$$

$$d_{i3} = \frac{p_{(f_2-2f_1)} + p_{(f_2+2f_1)}}{p_{f_2}}$$

Сумарният коефициент на интермодуляционни изкривявания се определя от израза:

$$d_i = \sqrt{d_{i2}^2 + d_{i3}^2} \quad (14)$$

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 ва-

жна 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 7ms за честотите около 100Hz и 0.2ms при по-високите честоти. При озвучителните тела върху преходните процеси оказва влияние намалената присъединена маса, както и гъвкавостта на обема въздух, затворен в акустичното оформление.

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

В зависимост от електроакустичните си параметри, озвучителните тела биват такива за широка употреба и озвучителни тела от клас Hi-Fi (с висока върност на възпроизвеждането). За да бъде едно озвучително тяло от клас Hi-Fi, неговия ефективен честотен обхват не трябва да бъде по-тесен от 50Hz-12.5kHz при неравномерност минус 8 плюс 4dB спрямо средната чувствителност, а неговите нелинейни изкривявания трябва да бъдат по-малки от 3% за честотите от 200Hz до 1kHz, да бъдат под линията свързваща 3% при 1kHz с 1% при 2kHz и да бъдат по-ниски от 1% за честотите от 2 до 8kHz.

При оразмеряването на озвучителните тела се използват главно следните четири параметъра на високоговорителя:

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. Означава се с  $V_{as}$ .

Качествен фактор - тоталния (пълнен) качествен фактор се дефинира както при озвучителните тела. Означава се с  $Q_t$ .

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 прекъснатата електрическа верига. Ако са известни поотделно механичните и електрическите загуби, то:

$$Q_M = \frac{\omega_0 m}{r_M} = \frac{1}{\omega_0 c r_M} = \frac{1}{r_M} \sqrt{\frac{m}{c}}. \quad (15)$$

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

$$Q_E = \frac{\omega_0 m}{r_{BH}} = \frac{1}{\omega_0 c r_{BH}} = \frac{1}{r_{BH}} \sqrt{\frac{m}{c}}. \quad (16)$$

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

$$Q_t = \frac{Q_M Q_E}{Q_M + Q_E}. \quad (17)$$

Резонансна честота - дефинира се както при озвучителното тяло. Означава се с  $f_s$ .

Ефективна излъчваща площ на високоговорителя - обикновено съвпада с площта на мембраната без гънката. Означава се с  $S_{eff}$ .

Нека разгледаме работата на един високоговорител и да изясним необходимостта от поставянето му върху кутия.

Когато един високоговорител с директно излъчване работи, той създава в пространството две звукови вълни - едната с предната страна на мембраната си, а другата - с нейната задна страна. Тези две звукови вълни са в противофаза, защото когато мембраната се движи напред, с предната си страна тя създава съгъстяване на въздуха, а със задната си страна в същия момент създава разреждане. Когато излъчването на предната и задна звукови вълни става в една и съща област на пространството, във всяка точка на това пространство звуковото налягане представлява алгебричната сума от двете вълни, и когато те са противофазни се изваждат (получава се така нареченото акустично късо съединение), в резултат на което звуковото налягане има минимална стойност или е равно на нула. Когато размерите на високоговорителя станат сравними с половината от дължината на вълната за излъчваното колебание, разликата в пътищата на предната и задна звукови вълни довежда до допълнително дефазиране на  $180^\circ$ , т.е. общото дефазиране става  $360^\circ$  или двете вълни са във фаза. При това резултантното звуково налягане се удвоява, или нараства с 6dB. При ново нарастване на честотата, когато разликата в пътищата стане равна на дължината на вълната на звуковото колебание отново двете вълни са в противофаза и общото звуково налягане става равно на нула и т.н. с редуващи се минимума и максимуми. За избягването на този ефект се прилагат няколко метода.

Първият метод изисква разделянето на пространството на две части с помощта на безкрайна твърда преграда (екран), в отвор на която е монтиран високоговорителя така, че с предната си част да излъчва в едното полупространство, а със задната си част - в другото полу-пространство. Това решение наистина би пре-



махнало акустичното късо съединение, но за съжаление в природата няма безкрайни екрани, и всеки реален такъв има крайни размери. Все пак, ако тези размери могат да бъдат направени достатъчно големи, така, че задната звукова вълна да изминава толкова дълъг път, че да затихне почти напълно, целта би била постигната. Такава възможност, обаче, се удава рядко (например, в киното).

Разновидност на този метод е използването на отворена отзад кутия (както при радиоприемниците и телевизионните приемници). В този случай акустичното късо съединение остава за най-ниските честоти, а за по-високите честоти се получават описаните по-горе минимума и максимуми. За намаляване на дълбочината на минимумите и височината на максимумите високоговорителят се монтира асиметрично на челната повърхност на кутията. При това задната звукова вълна изминава различен път, в зависимост от това от къде минава и пристига в точката на слушане с различни фази, а това довежда до известно намаляване на неравномерността на честотната характеристика.

Монтирането на високоговорителя върху затворена кутия на пръв поглед кардинално решава въпроса с акустичното късо съединение. Наистина, ако стените на кутията са достатъчно твърди, задната звукова вълна не може да проникне във външното пространство и условия за съществуване на акустично късо съединение не съществуват. За сметка на това, обаче, затворения обем със своята гъвкавост участва в трептящата система на високоговорителя, повишавайки неговата резонансна честота, а както е известно ефективността на излъчване на високоговорителя под резонансната честота е много ниска. Това довежда до повишаване на долната гранична честота на ефективния честотен обхват на озвучителното тяло със затворен обем.

Известно понижаване на долната гранична честота може да постигне с помощта на така нареченото акустично оформление с фазоинвертор или бас-рефлекс. Названието фазоинвертор доста точно отговаря на принципа на действие на този вид озвучителни тела. При тях задното излъчване на високоговорителя за най-ниските честоти се дефазира на  $180^\circ$  (инвертира се) с помощта на акустична система, включваща гъвкавостта на обема на тялото и масата на въздуха в една тръба, свързваща обема на тялото и околното пространство (фиг.4). При това звуковото налягане на предната и задната полуълна се сумира и довежда до повишаване на ефективността на преобразуване за тези честоти. За по-високите честоти, където дефазирането е различно от  $180^\circ$ , акустичното съпротивление на тръбата е достатъчно голямо и задната вълна не може да проникне в околното пространство и да увеличи неравномерността на честотната характеристика. Подобен е принципът на действие на озвучителните тела с пасивна мембрана, като при тях дефазирането и излъчването на задната звукова вълна в околното пространство става с помощта на специална мембрана, подобна на тази на високоговорителя, но без звуковата бобина, центриращата шайба и магнитната система. Ефективността на пасивната мембрана е по-ниска от тази на фазоинвертора, но параметрите и се регулират в по-широки граници и не съществува опасност от появата на призвуци, дължащи се на завихрянето на въздуха в тръбата. В замяна на това пасивната мембрана е критична по отношение на точността на изработка и за това може да бъде реализирана само в условията на добър завод.

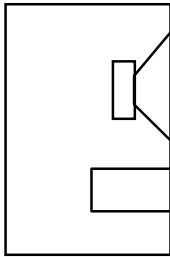


Fig. 4

Дефазирането на задната вълна и нейното излъчване във фаза с предната се използва и при озвучителните тела с акустичен лабиринт. При тях дефазирането става за сметка на удължаване на пътя на задната вълна с помощта на нагъната тръба или специално оформяне на корпуса. За съжаление, акустичният лабиринт пропуска и звуковите вълни с по-висока честота, за които условието за дефазиране на  $180^\circ$  не е спазено. Това довежда до повишаване на неравномерността на честотната характеристика.

Нека разгледаме по-подробно теорията на озвучителните тела с фазоинвертор. Трябва да се отбележи, че тази теория включва и озвучителните тела със затворен обем като частен случай.

Както вече казахме, честотната характеристика на озвучителното тяло представлява зависимостта на създаваното звуково налягане от честотата на входния сигнал. В областта на ниските честоти, където може да се приеме, че мембраната се движи като бутало, и че насочеността на излъчване практически не зависи от честотата, осевата честотна характеристика съвпада с честотната характеристика на коефициента на полезно действие на системата.

Акустичната мощност на всеки един излъчвател се определя от обемната скорост  $J_{об}$  на неговата повърхност и от активната съставка на съпротивлението на излъчване  $R_{изл}$ :

$$P_{а\acute{e}} = |S_{\dot{a}}|^2 R_{\acute{e}\acute{c}\acute{e}} \quad (18)$$

Обемната скорост представлява произведението на колебателната скорост и площта на излъчвателя:

$$S_{\dot{a}} = vS \quad (19)$$

Съпротивлението на излъчване  $R_{изл}$  зависи от свойствата на средата, в която се излъчва звуковата вълна, и от свойствата на акустичното оформление на високоговорителя. За разглежданото акустично оформление - фазоинвертор - съпротивлението на излъчване на високоговорителя и фазоинверсията отвор е:

$$R_{\dot{e}c\dot{e}} = \frac{\pi f^2 \rho}{c}, (20)$$

където:

- f - честота на излъчваното звуково колебание;
- c - скорост на звука;
- ρ - плътност на въздуха.

Тъй като обемната скорост на изхода на фазоинвертора  $J_{обф.и.}$  се създава от тилната страна на мембраната на високоговорителя, тя има обратен знак спрямо обемната скорост на предната повърхност на мембраната  $J_{обм.}$ . Като вземем предвид това, акустичната мощност, излъчвана от озвучителното тяло с фазоинвертор е:

$$P_{\dot{a}\dot{e}} = \frac{\pi f^2 \rho}{c} \left| \vartheta_{\dot{a}\dot{e}} - \vartheta_{\dot{a}\dot{e}.} \right|^2 (21)$$

Ако за източник на сигнал служи усилвател на мощност с изходно напрежение на празен ход  $E_g$  и изходно съпротивление  $R_i$ , то входната електрическа мощност на озвучителното тяло е:

$$P_{\dot{a}\dot{e}} = \frac{E_g^2}{(R_e + R_i)^2} R_e (22)$$

тук  $R_e$  е постояннотокоовото съпротивление на звуковата бобина на високоговорителя.

Като вземем пред вид (21) и (22), за коефициента на полезно действие ще получим:

$$\eta = \frac{P_{\dot{a}\dot{e}}}{P_{\dot{a}\dot{e}}} = \frac{\pi f^2 \rho (R_e + R_i)^2}{c E_g^2 R_e} \left| \vartheta_{\dot{a}\dot{e}} - \vartheta_{\dot{a}\dot{e}.} \right|^2 (23)$$

Следователно, за да намерим честотната характеристика на озвучителното тяло, трябва да определим обемните скорости  $J_{обм.}$  и  $J_{обф.и.}$ . Това може да стане с помощта на електрическата заместваща схема на озвучителното тяло, която в опростен вид е показана на фиг.5. Тъй като се интересуваме от

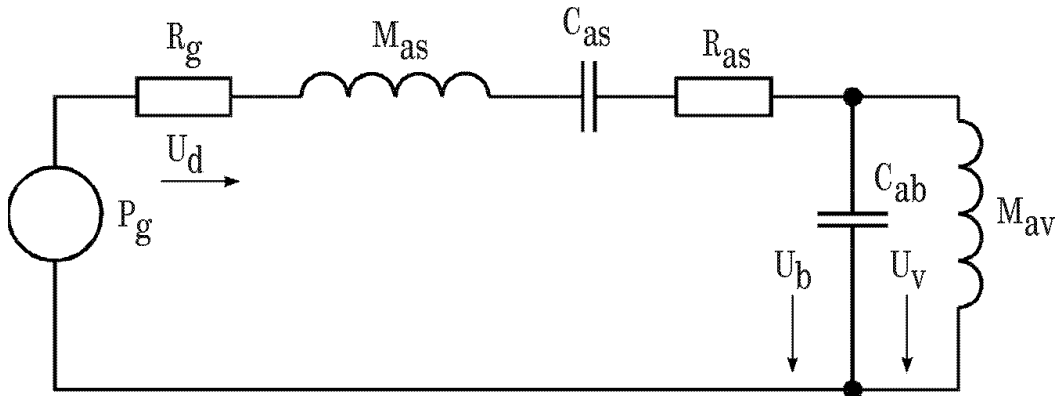


Fig. 5

акустичния изход на озвучителното тяло, в заместващата схема фигурират акустичните елементи. Така например, захранващия усилвател на мощност е преобразуван в генератор на звуково налягане с изходна величина  $p_g$ :

$$p_g = \frac{E_g B l}{(R_i + R_e) S_M} (24)$$

Тук  $B$  е индукцията във въздушната междина на магнитната система;  $l$  е дължината на проводника на звуковата бобина, обхванат от магнитните силови линии;  $S_M$  е площта на мембраната.

Тази формула се отнася за озвучително тяло с електродинамичен нискочестотен високоговорител, но почти всички съвременни нискочестотни високоговорители са от този тип.

Сумата от вътрешното съпротивление на генератора и активното съпротивление на звуковата бобина, трансформирана в акустичен аналог е:

$$Z_a = \frac{B^2 l^2}{(R_i + R_e) S_M^2} (25)$$

Опростяването на заместващата схема се изразява в следното:

- Акустичните маси на подвижната система на високоговорителя, на присъединената маса въздух от предната и задна страна на мембраната са обединени в една -  $M_{as}$ .

- Акустичните съпротивления на излъчване на мембраната и басрефлекса са изпуснати поради малката си стойност, обусловена от малкия коефициент на полезно действие на високоговорителите с директно излъчване, който е в границите на 0.1-4%.

- Акустичната маса на въздуха във фазоинверторния проход и присъединената маса въздух близо до изходния отвор също са обединени в една -  $M_{av}$ .

- Не са взети пред вид активните съпротивления на загубите в тръбата, в евентуални процепи в кутията и в самата кутия, поради малката им стойност.

Останалите елементи на схемата са:

-  $c_{as}$  е акустичната гъвкавост на окачването на трептящата система на високоговорителя.

-  $R_{as}$  е активното съпротивление на загубите в трептящата система на високоговорителя.

-  $c_{ab}$  е акустичната гъвкавост на въздуха в кутията.

Ако определим интересующите ни обемни скорости (отговарящи на съответните токове в електрическия еквивалент) от така получената заместваща схема и ги заместим в (6), можем да получим израза за КПД:

$$\eta = \left( \frac{\rho}{4\pi c} \right) \left( \frac{B^2 I^2}{R_e M_{as} S_M^2} \right) \left[ \frac{1}{1 + y_1 \left( \frac{f_s}{f} \right)^2 + y_2 \left( \frac{f_s}{f} \right)^4 + y_3 \left( \frac{f_s}{f} \right)^6 + y_4 \left( \frac{f_s}{f} \right)^8} \right] \quad (26)$$

Тук  $f_s$  е резонансната честота на високоговорителя в свободно пространство.

Коефициентите  $y_1, y_2, y_3, y_4$  се дефинират от изразите:

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{1}{Q_t^2} - 2 - 2 \frac{V_{as}}{V} - 2 \left( \frac{f_b}{f_s} \right)^2; \\ y_2 &= \left( 1 + \frac{V_{as}}{V} \right)^2 + \left( \frac{f_b}{f_s} \right)^2 \left[ 4 + 2 \frac{V_{as}}{V} + \left( \frac{f_b}{f_s} \right)^2 - \frac{2}{Q_t^2} \right]; \\ y_3 &= \left( \frac{f_b}{f_s} \right) \left[ \frac{1}{Q_t^2} \left( \frac{f_b}{f_s} \right)^2 - 2 - 2 \frac{V_{as}}{V} - 2 \left( \frac{f_b}{f_s} \right)^2 \right]; \\ y_4 &= \left( \frac{f_b}{f_s} \right)^4 \end{aligned} \quad (27)$$

Тук означенията са следните:

$f_b$  - резонансна честота на басрефлекса - т.е. честотата на която масата на въздуха в тръбата резонира с гъвкавостта на обема на кутията.

$f_s$  - резонансна честота на високоговорителя - т.е. честотата, на която масата на трептящата система резонира с гъвкавостта на окачването. Този параметър обикновено се дава в справочниците, или може да бъде определен от импедансната характеристика на високоговорителя в свободно пространство.

$Q_t$  - общ (тотален) качествен фактор на високоговорителя, представляващ отношението на реактивната част на акустичното съпротивление на високоговорителя при резонанс към общото му активно съпротивление. Дава се справочниците.

$V$  - вътрешния свободен обем на кутията.

$V_{as}$  - въздушният обем, чиято гъвкавост е равна на гъвкавостта на окачването на високоговорителя. Също може да бъде намерен в справочниците.

$$V_{as} = \rho c^2 C_{as} \quad (28)$$

Ако не се интересуваме от абсолютната стойност на КПД, а само от неговата честотна характеристика, то нейната форма се определя от последния множител на израза (26). Той съвпада с израза за честотната зависимост на пропускането на високочестотен филтър от 4-ти ред, което позволява при анализа на честотната характеристика на озвучителното тяло с басрефлекс да ползуваме изводите, известни от електротехниката. От там е известно, че формата на честотната характеристика зависи от стойността на коефициентите  $y$ . Например, ако всички коефициенти  $y$  са равни на 0, КПД щеше да бъде константа, не зависеща от честотата. В действителност това не може да бъде изпълнено, защото системата уравнения има

само три променливи -  $Q_t, V_{as}/V$  и  $f_b/f_s$  (тези величини са наречени променливи в смисъл, че могат да се избират или регулират при конструирането и изработката на озвучителното тяло). При изменението на тези три величини е възможно чрез подбор на стойностите на  $y_1, y_2, y_3$  и  $y_4$  да се формира практически всякаква форма на честотната характеристика, с изключение на честотната независимост. В областта на най-ниските честоти, където  $f_s/f > 1$  честотната характеристика на озвучителното тяло се определя от стойностите на коефициентите пред по-високите степени на това отношение, докато в областта на ефективния честотен обхват, където  $f_s/f < 1$ , формата на честотната характеристика зависи главно от  $y_1$ . Максимално гладка се нарича честотната характеристика, в чийто аналитичен израз болшинството от коефициентите  $y$  е равно на 0, включително и  $y_1$ . Между множеството възможни характеристики, най-голям практически интерес представляват гладките и почти гладки характеристики, съответстващи на филтрите от типа квази-Бътъруърд от втори и трети ред, и тези на Бътъруърд и Чебишев от четвърти ред.

**Характеристиката, гладка с точност до втори ред** има аналитичен израз от вида:

$$\eta_0(f) = \frac{1}{1 + y_2 \left(\frac{f_s}{f}\right)^4 + y_3 \left(\frac{f_s}{f}\right)^6 + y_4 \left(\frac{f_s}{f}\right)^8} \quad (29)$$

Тук коефициентът  $y_1=0$ . Това условие може да се изпълни за всеки високоговорител, чийто  $Q$  - фактор е по-малък от 0.707. Освен това, параметрите на високоговорителя трябва да удовлетворяват следното условие:

$$\frac{1}{2Q_t^2} = 1 + \frac{V_{as}}{V} + \left(\frac{f_b}{f_s}\right)^2 \quad (30)$$

От този тип е честотна характеристика на озвучително тяло със затворен обем. Тъй като за този тип озвучителни тела отношението  $f_b/f_s=0$ , изразът за честотната характеристика се опростява допълнително и добива вида:

$$\eta_0(f) = \frac{1}{1 + y_2 \left(\frac{f_s}{f}\right)^4} \quad (31)$$

Долната гранична честота, при която КПД на високоговорителя спада два пъти (3dB) спрямо своята асимптотична стойност е:

$$f_3 = f_s \sqrt{1 + \frac{V_{as}}{V}} \quad (32)$$

**Характеристиката от типа квази-Бътъруърд** се описва от уравнението:

$$\eta_0(f) = \frac{1}{1 + y_3 \left(\frac{f_s}{f}\right)^6 + y_4 \left(\frac{f_s}{f}\right)^8} \quad (33)$$

Тук на нула са равни коефициентите  $y_1$  и  $y_2$ . Решение на това уравнение съществува при  $Q_t < 0.563$ . В зависимост от избраните променливи параметри могат да се получат различни коефициенти  $y_3$  и  $y_4$  и следователно цяло семейство характеристики от типа Бътъруърд от трети ред. Обща особеност на тези характеристики е гладката, без пикове и провали форма на честотната характеристика в целия разглеждан честотен обхват и факта, че долната гранична честота и честотата на настройка на басрефлекса лежат над резонансната честота на високоговорителя.

**Характеристиката от типа Бътъруърд от четвърта степен** има следния аналитичен израз:

$$\eta_0(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f_s}{f}\right)^8} \quad (34)$$

Този израз се получава при условие, че  $y_1 = y_2 = y_3 = 0$ . Това условие може да се изпълни само при една комбинация от стойности на параметрите:

$$Q_t = 0.383; V_{as}/V = 1.414; f_b/f_s = 1$$

При това долната гранична честота съвпада с резонансната честота на високоговорителя и с честотата на настройка на басрефлекса.

Този тип честотна характеристика е максимално гладка и се получава тогава, когато  $Q$ -факторът на високоговорителя е равен на 0.383, обемът на кутията е 1.414 пъти по-голям от обема, еквивалентен на гъвкавостта на високоговорителя и басрефлексният проход е така подбран по дължина и диаметър, че

неговата резонансна честота съвместно с обема е равна на резонансната честота на високоговорителя в свободно пространство.

**Характеристиката на Чебишев от четвърти ред** се получава, когато коефициентите  $y_1$  и  $y_3$  са отрицателни, а  $y_2$  и  $y_4$  са положителни. Тези условия могат да бъдат изпълнени при  $Q_t > 0.383$ ;  $f_b < f_s$ ;  $V_{as}/V < 1.414$ .

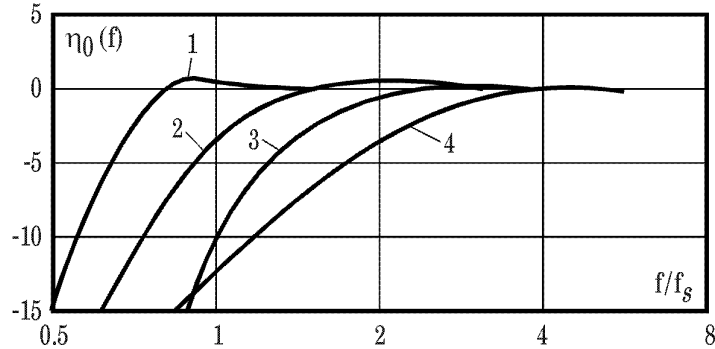


Fig. 6

Този тип характеристики също са семейство и се характеризират с малък отскок в ефективния честотен обхват, като при това долната гранична честота и честотата на настройка на басрефлекса лежат под резонансната честота на високоговорителя в свободно пространство. На фиг.6 са показани примерни характеристики от четирите типа. Освен разглежданите честотни характеристики могат да бъдат реализирани и други типове, включително и съответстващи на

филтри на Бътървърд и Чебишев от по-висок ред чрез включването последователно на озвучителното тяло, представляващо филтър от четвърти ред на още един електрически филтър.

**Абсолютната стойност на КПД** се получава, като вземем пред вид, че за ефективния честотен обхват, множителя, определящ честотната характеристика практически е равен на 1. Тогава :

$$\eta = \frac{\rho}{4\pi c R_e M_{as} S_M^2} B^2 I^2 \quad (35)$$

Ако преработим израза, определяйки акустичната маса и коефициента на електромеханична връзка и означавайки  $V_{as}/V = a$ , а  $c f_3/f_s = b$  ще получим:

$$\eta = \frac{2\pi^2 f_3^3 V \alpha}{c^3 Q_t \beta^3} \quad (36)$$

Вижда се, че КПД на озвучителното тяло е право пропорционален на обема на кутията и на куба на долната гранична честота. Следователно, ако при един и същ обем разширим ефективния честотен обхват с една октава надолу, КПД на озвучителното тяло ще се намали с 9dB. При намаляване на обема на кутията два пъти при запазване на същата долна гранична честота, КПД на озвучителното тяло се намалява два пъти. Това означава, че по какъвто и начин да се решава задачата за намаляване на обема на озвучителното тяло, в крайна сметка за поддържането на една и съща излъчвана акустична мощност при една и съща долна гранична честота, входната мощност се увеличава толкова пъти, колкото се намалява обема на кутията.

Оразмеряването на фазоинвертора се основава на определянето на акустичната маса на въздуха в тръбата, която заедно с гъвкавостта на въздуха във вътрешния обем на кутията резонира на честота  $f_b$ . Отношението на дължината на тръбата към площта на входния отвор може да бъде определено от следната формула:

$$\frac{L_v}{S_v} = \frac{3097}{f_b^2 V} \quad (37)$$

Размерността на величините е:  $f_b$  - в Hz;  $V$  -  $m^3$ ;  $L_v/S_v$  - в 1/m.

Практически дължината на тръбата е малко по-малка от определената по формула (37), защото в нея се включват и присъединените маси въздух от двете страни на тръбата и за това от тази стойност трябва да се извади поправката:

$$\Delta L = 1,7 \sqrt{\frac{S_v}{\pi}} \quad (38)$$

Площта на тръбата не може да бъде много малка, защото от една страна се намалява ефективността на фазоинвертора, а от друга страна е възможна появата на призвучи като свистене и фучене, вследствие на завихрянето на въздуха. За това обикновено площта  $S_V$  за проход с кръгло сечение се приема да бъде от 0.25 до 1 от ефективната площ на мембраната на високоговорителя (последната обикновено е близка до площта на мембраната без гънката). Стремежът е площта на тръбата да се направи колкото е

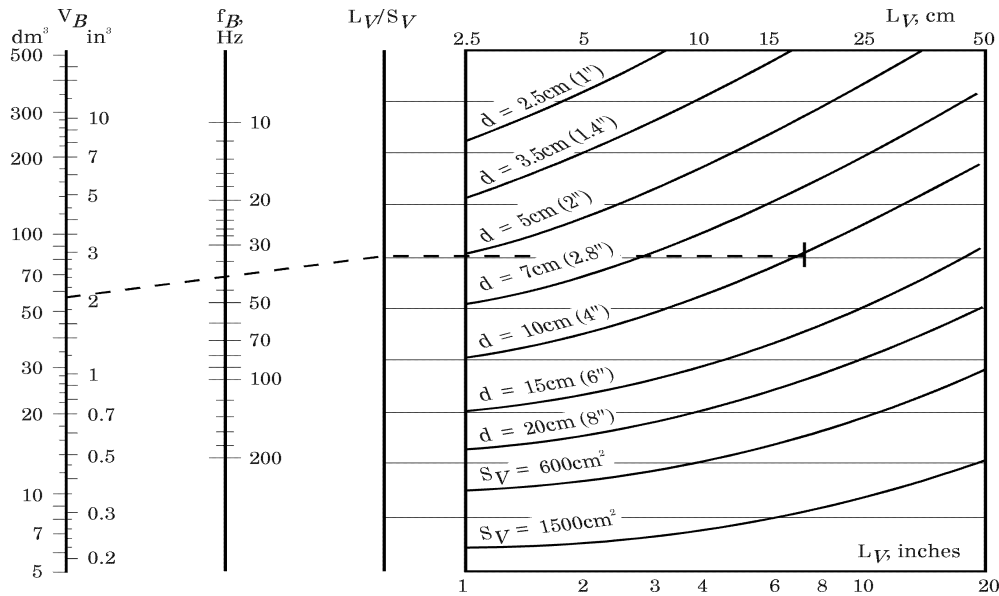


Fig. 7

възможно по-близка до горната граница, но трябва да се има пред вид, че с увеличаването на площта трябва да се увеличава и дължината, за да се запази отношението  $L_V/S_V$ . Освен това, прекалено дългата тръба в горната част на нискочестотния обхват престава да се държи като система със съсредоточени параметри, което може да доведе до увеличаването на неравномерността на честотната характеристика.

Формата на сечението на басрефлексия проход оказва влияние върху присъединената маса въздух и от там върху неговата дължина, което води до необходимост от прилагането на корекционни коефициенти на формата. Колкото повече формата на сечението се различава от кръг или квадрат, толкова по-голяма е необходимата корекция. При форма на сечението с много голямо отношение на страните се увеличава и опасността от завихряне на въздуха, за която беше споменато по-горе. За това проход с такава форма на сечението се използва много рядко, само тогава, когато няма друга възможност. Освен по формулите, оразмеряването на басрефлексия тръба може да стане с помощта на номограмата от фиг. 7

Качественият фактор на фазоинвертора зависи от активните загуби вътре в кутията. Изведените до тук формули се отнасят за акустично оформление без загуби, при което качествения фактор би бил равен на безкрайност. Такъв идеален случай в практиката не съществува. Освен това, ако в кутията няма звукопоглъщащ материал, който увеличава загубите в обема, има опасност от получаването на стоящи вълни. Това би предизвикало подчертаване на някои честоти. От друга страна, поставянето на голямо количество звукопоглъщащ материал довежда до “предемфане” на обема и известно намаляване на ефекта от басрефлекса.

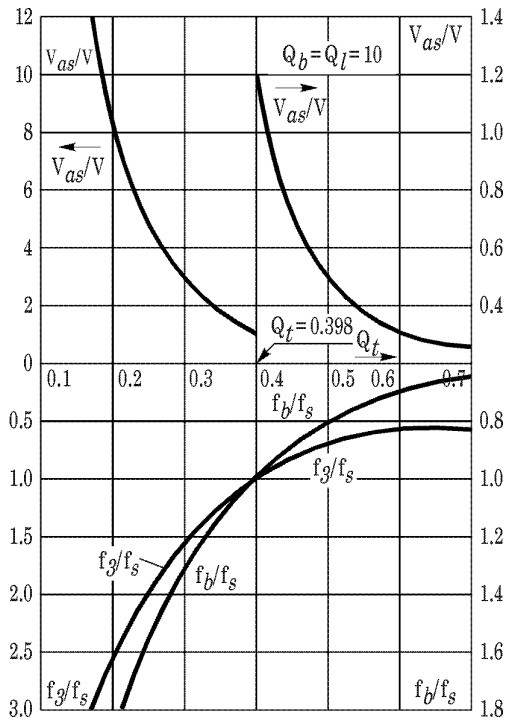


Fig. 8

По горе беше споменато, че при демпфането на обема се намалява качественият фактор на басрефлекса и бяха дадени номограми при стойности на  $Q_b$  5 и 10 (не трябва да се смесва качественият фактор на басрефлекса с качествения фактор на високоговорителя). Качественият фактор на басрефлекса зависи от загубите в акустичното оформление (кутията). Най-голям дял в тези загуби има триенето в процеди и отвори в стените на кутията. За това при изработката на последната трябва да се обърща особено внимание на доброто уплътняване. За проверка на уплътняването трябва да се запуши добре басрефлексия отвор и при натискане на мембраната на нискочестотния високоговорител трябва да се усеща съпротивлението на въздуха в обема, а при освобождаването и тя трябва да се връща бавно. Дори и при най-прецизно изпълнение на кутията все пак остават утечки на въздуха през мембраната на високоговорителя- при някои високоговорители има отвори в шапката (куполообразната средна част на мембраната, защитаваща въздушната междина на магнитната система от попадане на прах и други замърсители), при други се получава утечка от недобро залепване на гънка или шапка и т.н. В зависимост от качеството на изпълнение  $Q_b$  се движи от 3 до 30, при което за добре изпълнените кутии тази стойност е от 10 до 30, а при запълване на обема с вата спада до 5.

Начини за регулиране на качествения фактор

Както се вижда от изложеното по-горе, твърде често при конструирането на озвучителните тела се налага регулирането на качествения фактор на високоговорителите. Връзката между тоталния качествения фактор  $Q_t$ , механичния качествения фактор  $Q_M$  и електрическият  $Q_E$  се дава от изразът:

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_M} + \frac{R_E}{Q_E(R_E + R_G)} \quad (39)$$

Тук  $R_E$  представлява активното съпротивление на проводника, от който е навита звуковата bobина,

$R_G$  е вътрешното съпротивление на генератора.

Вижда се, че има два подхода за регулиране на качествения фактор.

Първият подход се състои в промяната на механичните загуби в трептящата система на високоговорителя. Най-често се налага намаляването на качествения

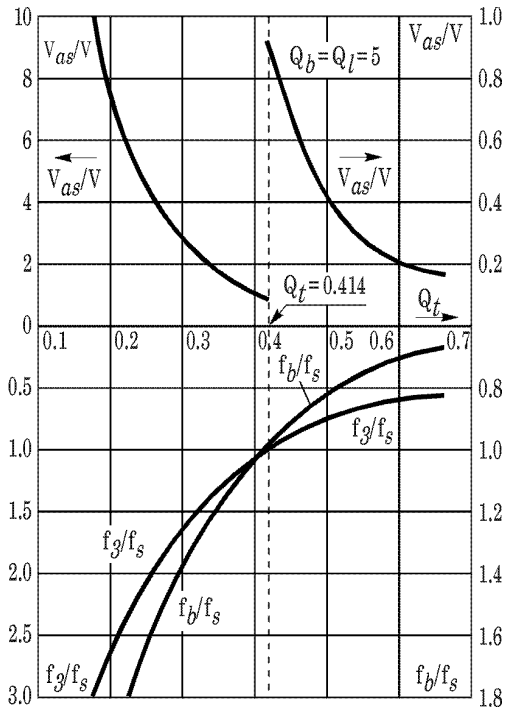


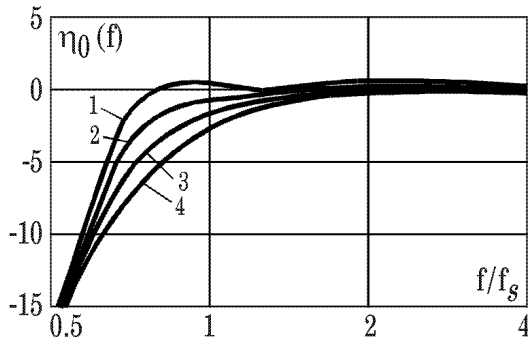
Fig. 9

фактор. Това може да стане или чрез обработка на окачването (главно гънката) със специални обмазки, или чрез поставянето в близост до мембраната на така наречения "панел за акустично съпротивление". Първият начин не позволява много широк диапазон на регулиране на качественият фактор, понеже довежда и до намаляване на чувствителността. Предимството му е, че едновременно с намаляване на качественият фактор намалява и изкривяванията, внасяни от високоговорителя, но пък той не позволява връщане към първоначалното положение, ако се окаже, че не е постигнат необходимият ефект. Вторият начин изисква поставянето колкото може по-близко до мембраната на високоговорителя от задната и страна на полупропусклива преграда, създаваща допълнително акустично съпротивление при движението на мембраната. Практически това става, като се закрият отворите в шасито с перфориран лист от пластмаса, алуминий или друг подобен материал. Отворите на перфорацията трябва да бъдат колкото е възможно по-ситни. Допълнително демпване се постига чрез поставянето върху листа на един или няколко слоя тъкан. Недостатък на този метод е известно повишаване на резонансната честота на високоговорителя, както и невъзможността предварително да се изчисли промяната на качественият фактор, при което се налага експериментално да се търси оптималната перфорация или демпващ материал.

Вторият подход за регулиране на качественият фактор се базира на силното влияние на изходното съпротивление на усилвателя върху него. Този начин е универсален и позволява регулиране на качественият фактор в широки граници. Недостатък на метода е, че регулирането е валидно само при работа на конкретен високоговорител с точно определен усилвател, т.е. той е приложим главно при активните озвучителни тела.

Необходимото изходно съпротивление на усилвателя се определя по формулата:

$$R_E + R_E \left[ \frac{Q_t Q_M}{(Q_M - Q_t) Q_E} - 1 \right] \quad (40)$$



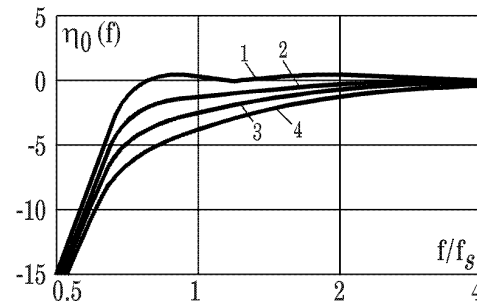
Различни процепни загуби:

1.  $Q_t = \text{безкрайност}$
2.  $Q_t = 10$
3.  $Q_t = 5$
4.  $Q_t = 3$

Основни параметри на озвучителното тяло:

$$Q_t = 0,5; V_{AS}/V = 0,61; f_b/f_s = 0,76$$

**Fig. 10-a**



Различни загуби в кутията

1.  $Q_{ab} = \text{безкрайност}$
2.  $Q_{ab} = 10$
3.  $Q_{ab} = 5$
4.  $Q_{ab} = 3$

Основните параметри са както при фиг.

10-a

**Fig. 10-b**

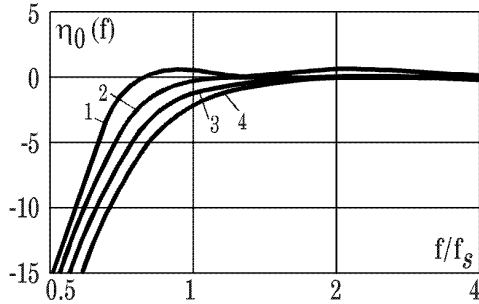
Тук  $Q_M$  и  $Q_E$  са измерените значения, а  $Q_t$  е необходимата стойност на качественият фактор на високоговорителя.

Тогава, когато необходимата стойност на изходното съпротивление на усилвателя е по-голяма от неговата стойност, задачата се решава чрез просто свързване последователно на високоговорителя на резистор с необходимата стойност. Когато се използват високоговорители с голяма стойност на качественият фактор (това се получава, когато магнитната система е слаба), необходимата корекция е към намаляване на  $Q_t$ . Такава корекция може да бъде реализирана с помощта на усилвател с отрицателно изходно съпротивление. Като имаме пред вид, че съпротивлението на високоговорителя за целия работен честотен обхват обикновено не е по-ниско от постояннотоковото съпротивление на звуковата бобина  $R_E$ , можем да кажем, че условието за стабилна работа на усилвателя е:

$$R_E + R_G > 0 \quad (41)$$



Необходимата стойност на  $R_G < 0$  се постига чрез прилагането на положителна обратна връзка по ток (обратна връзка, при която върнатото на входа напрежение е пропорционално на изходния ток). За целта последователно на високоговорителя към маса се свързва малко съпротивление и пада на напрежение върху него се подава на входа на усилвателя в качеството на напрежение на обратна връзка.



Различни загуби в тръбата:

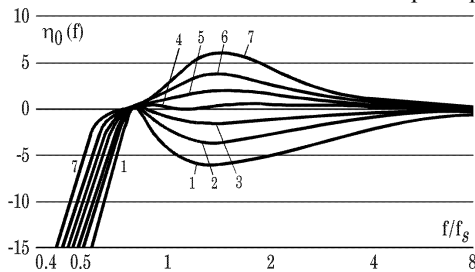
1.  $Q_p$ =безкрайност
2.  $Q_p=10$
3.  $Q_p=5$
4.  $Q_p=3$

Основните параметри са както при фигури 10-а и 10-б

**Fig. 10-в**

1.  $V_{AS}/V=1,22$ ; 2.  $V_{AS}/V=0,913$ ; 3.  $V_{AS}/V=0,74$ ; 4.  $V_{AS}/V=0,61$ ; 5.  $V_{AS}/V=0,51$ ; 6.  $V_{AS}/V=0,417$ ; 7.  $V_{AS}/V=0,305$

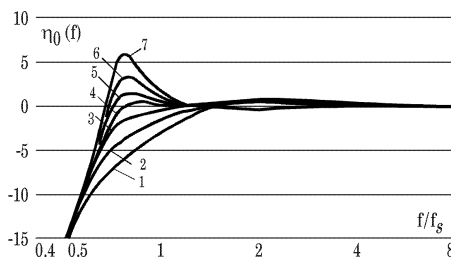
Зависимостта на честотната характеристика на озвучителното тяло от стойността на отношението



1.  $Q_i=0,25$ ; 2.  $Q_i=0,33$ ; 3.  $Q_i=0,416$ ; 4.  $Q_i=0,5$ ;
5.  $Q_i=0,6$ ; 6.  $Q_i=0,75$ ; 7.  $Q_i=1$

Основни параметри на озвучителното тяло:  
 $Q_b$ =безкрайност;  $V_{AS}/V=0,61$ ;  $f_b/f_s=0,78$

**Fig. 11**



1.  $V_{AS}/V=1,22$ ; 2.  $V_{AS}/V=0,913$ ; 3.  $V_{AS}/V=0,74$ ;
4.  $V_{AS}/V=0,61$ ; 5.  $V_{AS}/V=0,51$ ; 6.  $V_{AS}/V=0,417$ ;
7.  $V_{AS}/V=0,305$

Основни параметри на озвучителното тяло:  
 $Q_b$ =безкрайност;  $Q_i=0,5$ ;  $f_b/f_s=0,78$

**Fig. 12**

монтиран в една от основите на цилиндъра. Честотната характеристика е много неравномерна, с обща неравномерност 11 dB. Характерно за нея е наличието на остри пикове и провали, които свидетелстват за силни интерференции между преките звукови вълни и отразените, като основно влияние има острия ръб с форма на окръжност.

Нека разгледаме как се отразява на честотната характеристика неоптималното съотношение на параметрите. Такова неоптимално съотношение може да се получи поради неточно измерване на някои параметри, неточности при изработката или когато се използва готова кутия без напасване към конкретния високоговорител. На фиг. 10 (а, б и в) е показано как се изменя честотната характеристика при  $Q_b$  различно от номиналната стойност, която в случая е безкрайност. На фиг. 11 е показано влиянието на неспазването на номиналната стойност на  $Q_t$ , като номиналната стойност е 0.5. Вижда се, че увеличаването или намаляването на  $Q_t$  спрямо номиналната стойност води до появата на пик или провал в честотната характеристика.

На фиг. 12 е показано влиянието на неспазването на оптималния обем (или съотношението  $V_{AS}/V$ ), като оптималното отношение е 0.61.

$f_b/f_s$  е показана на фиг. 13. Тук на кривата 1 отговаря отношение  $f_b/f_s=0,52$ ; 2.  $f_b/f_s=0,65$ ; 3.  $f_b/f_s=0,78$ ; 4.  $f_b/f_s=0,935$ ; 5.  $f_b/f_s=1,17$ , като основните параметри са  $Q_b$ =безкрайност,  $Q_i=0,5$ ;  $V_{AS}/V=0,61$ ;  $f_b/f_s=0,78$ .

Оразмеряването на озвучително тяло със затворен обем може да бъде направено с помощта на номограмата показана на фиг. 14. Начинът на работа с нея е подобен на този при номограмите от фиг. 8 и 9. Частичното запълване на обема на кутията (до 20%) със звукопоглъщащ материал (обикновено полиестерна вата) спомага за подтискането на стоящите вълни, които биха довели до повишаване на неравномерността на честотната характеристика. Освен това, поради изменянето на закона за свиването и разреждане на въздуха в звукопоглъщащия материал се получава увеличаване на ефективния обем на кутията, което довежда до понижаване

на долната гранична честота при същия обем. Прекомерното запълване на обема довежда до обратния ефект - намаляване на ефективния обем поради изместването на въздуха от звукопоглъщащия материал при едновременното повишаване на активните загуби.

Външната форма на кутията оказва съществено влияние върху хода на честотната характеристика на озвучителното тяло в областта на ниските честоти. Изследванията на Хари Олсон, който е изследвал 12 вида акустични оформления, като е използвал малък по диаметър излъчвател, за да бъде насочен в обхвата от 100 до 4000 Hz, са дали следните резултати:

- Сферична кутия. Честотната характеристика е плавна, без остри върхове и падени и с обща неравномерност в рамките на 5 dB.

- Цилиндрична кутия, като излъчвателя е

- Цилиндрична кутия, при която високоговорителя е монтиран в средата на околната повърхнина. Честотната характеристика е значително по-платка с обща неравномерност 6 dB.

- Кутия - паралелепипед, като високоговорителя е монтиран несиметрично върху една от поголемите стени. Честотната характеристика е с обща неравномерност е около 7 dB. Характерно е наличието на един максимум в областта около 300 Hz и следващи го няколко минимума и максимума с неголямо ниво.

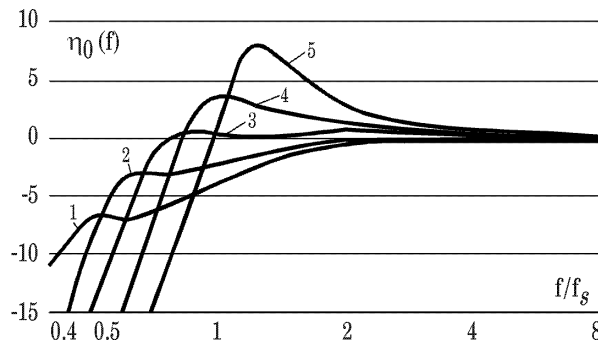


Fig. 13

- Кутия - паралелепипед със силно скосени предни ръбове. Честотната характеристика е доста гладка, без силно изразени минимума и максимума. Честотната характеристика на пирамидата е малко по-добра от тази на паралелепипеда със силно скосени ръбове.

От казаното следва, че най-подходяща форма за озвучително тяло е сферичната, чиято неравномерност е около 5 dB. За съжаление, тази форма изисква сложна технология за изработването

е, което я оскъпява. За това най-голямо разпространение е получила третата по качества в това отношение форма, а именно паралелепипеда, при който високоговорителят е разположен извън центъра на симетрия на лицевата стена. Тази форма на кутията представлява разумен компромис между технологичност на изработката и качествени показатели. В последно време, с развитието на технологията все по-често на пазара се появяват озвучителни тела с форма на цилиндър (кръгов или елиптичен), на който високоговорителя е монтиран на околната повърхнина. Това е едно решение, което е почти толкова добро, колкото и сферата (разликата в неравномерностите на озвучителните тела с двете форми е в границите на 1dB). Най-неуспешна за озвучително тяло е формата на цилиндър, като високоговорителя е разположен на основата на цилиндъра. Също неуспешна е и кубичната форма с говорител, разположен в центъра на симетрия на една от стените.

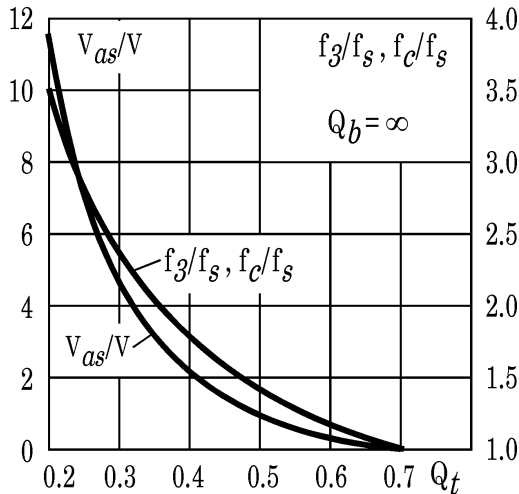


Fig. 14

Освен това, експериментално е доказано, че човешкото ухо различава наличието на резонансни явления, дори когато нивото на излъчвания при това звук е с 20 dB по-ниско от основния, излъчван в момента звук. Тези резонанси се получават главно при появата на стоящи вълни, условие за което е наличието на паралелни стени, отдалечени на нечетен брой полуълни за даденото колебание. Това обуславя по-доброто звучене на кутиите със сферична, пирамидална и цилиндрична с не плоски или неупоредени основи форма.

Формата на озвучителното тяло оказва съществено влияние и върху неравномерността на честотната характеристика в областта на високите честоти. Причина за това е отражението на звука от ръбовете и други елементи на лицевата повърхност на кутията тогава, когато техните размери станат съизмерими с дължината на звуковата вълна. Поради разликата в изминатия път, пряката и отразената вълна пристигат в точката, където е разположен слушателя с различна фаза и при сумирането си довеждат до увеличаване или намаляване на нивото на звука в тази точка и по този начин влияят върху неравномерността на честотната характеристика. За намаляване на този вреден ефект се избягва оформянето на остри ръбове по кутията и лицевите елементи като решетки, рингове и др.

Материалът, от който е изработена кутията също оказва влияние върху честотната характеристика, вследствие на неговата по-голяма или по-малка звукопроницаемост. Тя зависи от дебелината на стената, от механичните загуби в материала и от неговата склонност да се разтрептява и да изпада в резонанс на определени честоти, като при това излъчва звук с произволна фаза. При сумирането на този звук с излъчвания директно от високоговорителя се получава, както и в предния случай, увеличаване или намаляване на нивото на звука в точката на слушане.

Във връзка с това стремейт да се използва за изработка на кутията материал като музикална дървесина е вреден поради факта, че собствените резонанси на такива материал само увеличават неравномерността на честотната характеристика. При някои по-люксови озвучителни тела се използват материали като мрамор, керамика и др., които съчетават голяма твърдост с добри механични загуби, но са твърде скъпи и трудни за обработка. Най-успешен материал за изработка на кутии за озвучителни тела, съчетаващ достатъчна

твърдост и механични загуби с прилична цена са плоскостите от дървесни частици (ПДЧ) или така наречения талашит. Сглобяването на кутиите от този материал става най-често с помощта на сглобката наречена "нут и перо" или с помощта на чуждо парче, при което трябва да се обърне внимание на доброто залепване и уплътняване на сглобките. При озвучителни тела със сравнително малка мощност е възможно кутията да се изработи от пластмаса, като за предпочитане е вътрешните слоеве на пластмасата да бъдат разпенени. В любителски условия би могла да бъде използвана многослойна конструкция тип "сандвич", като външния слой е твърд и плътен (например, полистирол) и задава външния вид на озвучителното тяло, вътрешния слой е гъвкав с повишени загуби (например, линолеум), а по средата се намира слой от разпенена пластмаса (например, пенополиуретан).

Както вече беше казано, качествените показатели на озвучителните тела зависят до голяма степен от избора на високоговорители, които в озвучителните тела, в зависимост от възпроизвеждания честотен обхват, биват нискочестотни, средночестотни и високочестотни.

В зависимост от принципа на електромеханичното преобразуване високоговорителите биват:

- електромагнитни - при тях преобразуването на енергията от електрическа в механична на звуковите колебания става вследствие на взаимодействието на магнитното поле на постоянен магнит и котва от магнитно мек материал, която се намагнитва вследствие на протичането на променливия ток със звукова честота през бобина, навита около котвата. Поради своите недостатъци този вид високоговорители сега почти не намират приложение;

- електродинамични - при този вид високоговорители преобразуването на енергията става вследствие на взаимодействието на магнитното поле на постоянен магнит и магнитното поле на звуковата бобина, възникващо при протичането през нея на променливия входен ток. Поради своята технологичност, устойчивост на претоварване и ниска цена този вид високоговорители са най-разпространени в момента. На този принцип се конструират високоговорители за работа във всички честотни обхвати - както нискочестотни, така и средночестотни и високочестотни. Разновидност на електродинамичните високоговорители са и лентовите електродинамични високоговорители, които поради малката маса на трептящата си система и произтичащите от това кратки преходни процеси, както и поради това, че силата е приложена върху цялата лентичка и в резултат тя трепти като едно цяло, без противофазни участъци, се характеризират с много добро звучене. Най-съществения им недостатък е факта, че не издържат дори краткотрайни претоварвания, което води до необходимостта от прилагане на бързодействаща защита. Те се използват изключително като високочестотни високоговорители;

- електростатични - техният принцип на действие се базира на силата, възникваща между пластините на зареден кондензатор при промяна на напрежението върху пластините. При това едната от пластините е масивна и остава неподвижна, докато другата представлява тънка мембрана и под действието на възникналата сила се задвижва, създавайки съгъстяване или разреждане на въздуха, т.е. звукова вълна. Тъй като силата е приложена равномерно върху цялата повърхност на мембраната, този вид високоговорители се характеризират с широк честотен диапазон на буталното движение на мембраната и в резултат на това - гладка честотна характеристика в същия този честотен диапазон. Въпреки добрите си качества, не са намерили широко приложение поради нуждата от високоволново поляризиране, особено при нискочестотните електростатични високоговорители;

- пиезоелектрическите високоговорители работят, използвайки обратния пиезоефект, открит от братята Пиер и Жюлио Кюри. Този ефект се изразява във възникването на механично напрежение и свързано с него преместване при подаване на електрическо напрежение върху някои кристали в направление, успоредно на определени техни кристалографски оси. От природните кристали, притежаващи пиезо-свойства, най-разпространен е кварцът, но поради ниските стойности на пиезо-модула, от който зависи чувствителността му като електромеханичен преобразувател, той не намира приложение в пиезоелектрическите високоговорители. В съвременните пиезоелектрически високоговорители намират приложение главно пиезокерамичните биморфни елементи и високополимерните пиезофолия, като високоговорителите, използващи последните по звучене се доближават до лентовите и електростатичните, но без техните недостатъци. Пиезоелектрическите високоговорители с биморфен елемент имат допълнителното предимство, че могат да бъдат включени в озвучителното тяло без филтър. Този вид високоговорители (с биморфен пиезокерамичен елемент) имат характерно звучене, което не всички слушатели харесват. Пиезоговорителите се използват изключително само като високочестотни.

Подбора на високоговорители става най-напред по паспортна мощност. Този вид мощност е мярка за надеждността на високоговорителите и методиката за нейната проверка е такава, че независимо от това, дали високоговорителя е нискочестотен, средночестотен или високочестотен, неговата паспортна мощност трябва да бъде равна на паспортната мощност на озвучителното тяло. Трябва да се отбележи, че ако в озвучителното тяло средночестотните и високочестотни високоговорители се използват в честотна лента, потясна от обявената от производителя за дадения високоговорител, мощността, която му се подава може да бъде по-висока, като нейната стойност може да бъде определена с помощта на стандартната крива на статистическото разпределение на мощностите по честота при възпроизвеждането на усреднена говорна и музикална програма (така наречената IEC - крива).

Обикновено нискочестотните високоговорители възпроизвеждат честотния обхват от долна гранична честота до 2...4kHz. В случаите, когато озвучителното тяло е трилентово, средночестотният високоговорител поема част от тази лента и тогава е достатъчно нискочестотният високоговорител да възпроизвежда честотите до 500...800Hz. Във всички случаи тези високоговорители са освободени от необходимостта да възпроизвеждат високите честоти, а в някои случаи и средните, като в замяна на това са повишени изискванията към възпроизвеждането на ниските честоти, а това изисква ниска резонансна честота. Те се изработват с по-дебела мембрана, чийто материал има повече активни загуби, а гънката обикновено е отделно изработена и е от гума, гумиран плат или други подобни материали, което спомага за намаляване на нелинейните изкривявания. Формата на гънката се подбира с оглед получаването на голяма гъвкавост на окачването с цел получаването на ниска долна гранична честота при запазване на добра чувствителност. Освен това, конструкцията на високоговорителя трябва да позволява голям работен ход на мембраната без това да довежда до повишаване на изкривяванията.

Паспортната мощност на този вид високоговорители практически съвпада с тяхната максимална синусоидална мощност, защото върхът на ИЕС - кривата се пада в този честотен диапазон, на честота 270Hz.

Средночестотните високоговорители трябва да възпроизвеждат честотния диапазон от 500-800Hz до 4-5, рядко до 8kHz. При тях изискването е в работния честотен обхват да имат неравномерност на честотната характеристика по-малка от 4dB. За намаляване на насочеността на излъчването, диаметърът на този вид високоговорители е не по-голям от 130mm, като често те са куполни с още по-малък диаметър. Тяхната максимална синусоидална мощност е 40 до 60% от паспортната им мощност.

Високочестотните високоговорители възпроизвеждат честотната лента от 2kHz до горната гранична честота. Пак с цел намаляване на насочеността на излъчване техният диаметър е малък, те все по-рядко биват конусни, а обикновено са куполни, понякога лентови и при някои типове пиезоелектрически високоговорители от високополимерно пиезофолио, с цилиндрична излъчваща повърхност. Максималната им синусоидална мощност е около 20% от паспортната им мощност.

#### **Теснолентови суббасови високоговорителни системи**

С появяването на цифровия звукозапис възникна необходимостта от компактни високоговорителни системи, възпроизвеждащи качествено най-нискочестотния звуков обхват. В описаните по-рано озвучителни тела с басрефлекс и със затворен обем, нискочестотният високоговорител възпроизвежда сравнително широка честотна лента, при което максималната акустична мощност на системата се ограничава от максималната възможна амплитуда на мембраната на високоговорителя, при която той възпроизвежда сигнала с допустими нелинейни изкривявания. Тази максимална амплитуда се получава при най-ниските честоти, защото за излъчването на една и съща акустична мощност амплитудата нараства обратно пропорционално на честотата.

Увеличаването на нелинейните изкривявания при увеличаване на амплитудата на колебание на мембраната се дължи главно на две причини:

-Нелинейността на окачването на трептящата система на високоговорителя, което се изразява в това, че при големи амплитуди силата на противодействието на еластичните елементи-гънка и центрираща шайба - се увеличава или което значи че гъвкавостта на окачването проявява зависимост от амплитудата, вследствие на което за едно и също нарастване на приложената сила, отместването на мембраната е много по-голямо при ниските амплитуди, отколкото при големите.

-Неравномерното разпределение на напрегнатостта на магнитното поле извън работната въздушна междина, вследствие на което при големи амплитуди звуковата bobина попада в поле с по-малка напрегнатост. Очевидно това довежда до зависимост на коефициента на електромеханична връзка  $B_l$  ( $B$  е напрегнатостта на магнитната индукция, а  $l$  е дължината на проводника, обхванат от магнитните силови линии) от амплитудата и от там и получената електродинамична сила  $F=Bli$  ( $i$  е силата на тока, протичащ през проводника на звуковата bobина) зависи от тази амплитуда.

В определени граници увеличаването на изкривяванията при повишаване на излъчваната акустична мощност може да бъде намалено чрез използването на високоговорители с по-голяма площ на мембраната. Това е така, защото КПД на високоговорителя е право пропорционално на квадрата на площта на мембраната, което води до съответното намаляване на амплитудата на колебание на мембраната за една и съща излъчвана акустична мощност. За съжаление, по-голямата площ на мембраната увеличава и обема, еквивалентен на гъвкавостта на мембраната. Последният по дефиниция представлява затворения обем, който възбуждан през площ, равна на площта на мембраната би имал същата гъвкавост, както окачването на високоговорителя. Това увеличаване на  $V_{as}$  води до увеличаване на необходимия обем и следователно до по-големи габарити на озвучителното тяло, необходими за постигане на същата долна гранична честота.

В последно време, благодарение на появилите се нови теоретични разработки стана възможно конструирането на теснолентови суббас излъчватели, които възпроизвеждат ниските честоти с много по-малки изкривявания поради на по-малкия ход на мембраната. Това се получава благодарение на използването на един или няколко Хелмхолцови резонатора, поставени пред и зад мембраната на високоговорителя, което дава усилване на звука  $Q$ -пъти за честотата на настройка на тези резонатори ( $Q$  е качественият фактор на резонатора). Някои от тези системи притежават естествено ограничаване за по-

високи честоти. Това естествено ограничаване позволява използването на електрически разделителни филтри с по-малка стръмност, а те въвеждат по-малки фазови изкривявания. От друга страна, акустичният филтър намалява изкривяванията на системата, защото обикновеният електрически филтър не пропуска изкривяванията на усилвателя, но не може да повлияе на изкривяванията, породени след него т.е. тези на високоговорителя, докато акустичният филтър, обхващайки и акустичната част, премахва и евентуални изкривявания, породени от високоговорителя.

Работата на повечето такива системи зависи изключително от параметрите на високоговорителя и кутията. Чувствителността към вариациите на параметрите се увеличава в зависимост от разряда на цялата система, като за системите от по-висок ред леки отклонения в стойностите на тези параметри могат да предизвикат големи промени в работата на цялата система.

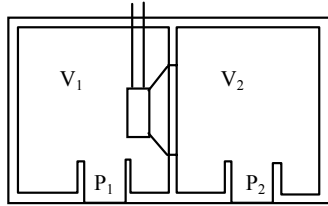


Fig.15

Нека разгледаме обобщения чертеж на такъв излъчвател, даден на фиг.15. Всички други разновидности могат да бъдат получени от тази конфигурация. Трябва да отбележим, че акустичните изходи могат да бъдат както тръби (така са показани на чертежа), така и пасивни мембрани, без това да се отрази на изводите. Еквивалентната схема на този излъчвател е показана на фиг.16.

Тази схема е смесена-в нея има електрическа част, механична част и акустична част, както и два трансформатора, извършващи съответните преходи - от токове и напрежения в механични скорости и сили и от там-в акустични скорости и звуково налягане.

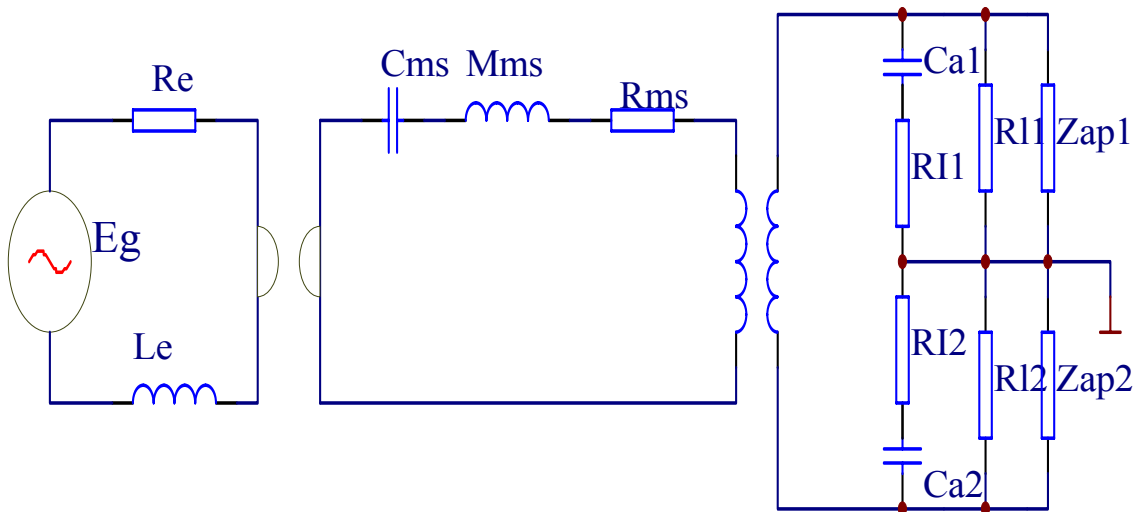


Fig.16

Тъй като ние се интересуваме от акустичните резултати, ще превърнем всички елементи в акустични анализи. Получената схема е показана на фиг. 17, като акустичната част от предната схема не търпи промени и е означена с обобщен акустичен импеданс  $Z_a$ , който ще бъде дефиниран при различните случаи на настоящото разглеждане, като винаги ще пренебрегваме неговите съставки, дължащи се на утечка (неуплътняване) на обемите, както и загубите от триене вътре в тях, при което ще приемаме, че  $R_{L1}=R_{L2}=\infty$  и  $R_{I1}=R_{I2}=0$ . Освен това, при тази схема е пренебрегната индуктивността на звуковата бобина, тъй като тя е с много малка стойност и практически не оказва влияние при разглежданите ниски честоти. При горното преобразуване захранващия генератор на напрежение е преобразуван в еквивалентен генератор на звуково налягане със стойност:

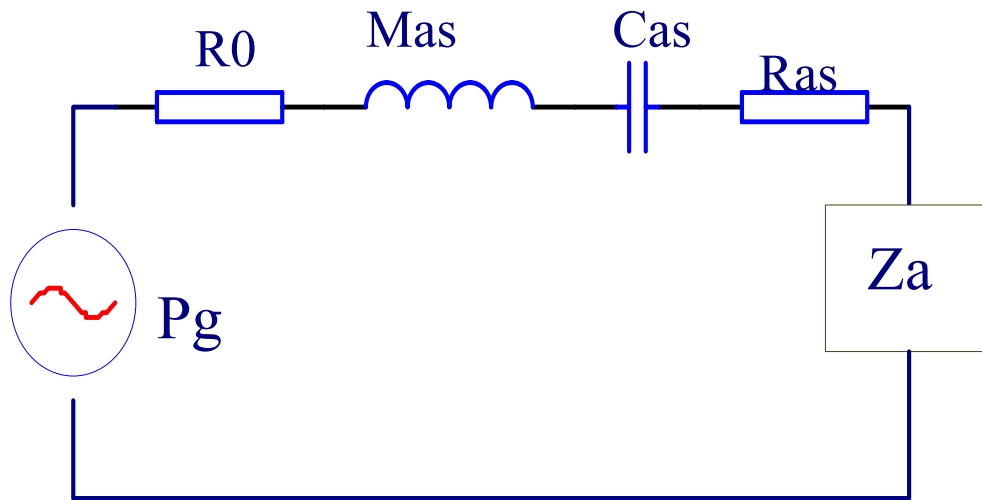


Fig.17

$$P_g = \frac{E_g B I}{(R_g + R_E) S_0} \quad (42)$$

Съответно електрическото активно съпротивление, образувано от последователно свързаните изходно съпротивление на захранващия усилвател и активното съпротивление на звуковата бобина е преобразувано в акустично активно съпротивление:

$$R_0 = \frac{B^2 I^2}{(R_g + R_E) S_0^2} \quad (43)$$

Тук  $S_0$  е площта на мембраната на високоговорителя  
 $R_g$  е изходното съпротивление на усилвателя,  
 $R_E$  е постояннотоковото съпротивление на звуковата бобина.

Системите могат да бъдат класифицирани в зависимост от реда на еквивалентния лентов филтър и по това дали са симетрични или несиметрични.

*Системи от четвърти ред*

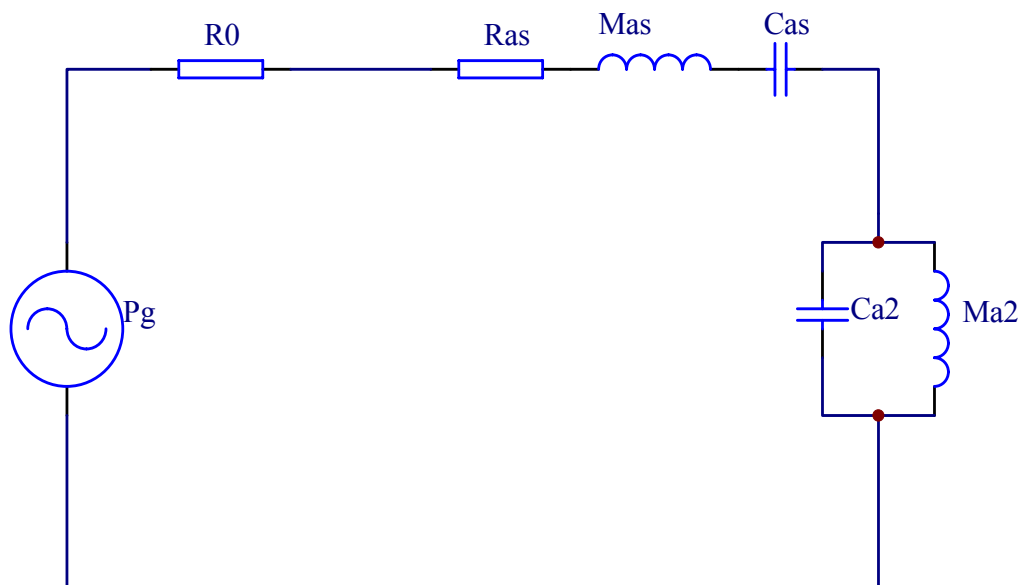


Fig.18

Системата от четвърти ред се получава от обобщената кутия, когато се затвори плътно задния акустичен изход. Еквивалентната схема, която отговаря на този случай е показана на фиг.18. Прави впечатление, че тази схема е идентична на схемата, отговаряща на обикновено озвучително тяло с бас рефлекс. Разликата между двете схеми е в това, че сега не се сумират предното и задно излъчване (задно просто няма, защото задния акустичен изход е затворен), а остава само предното. За по-голяма общност на разглеждането не обозначаваме елементите на задния обем отделно на схемата, а ги включваме в елементите на високоговорителя, като влиянието им върху параметрите на последния се изразява в намаляване на гъвкавостта на окачването му (гъвкавостта на затворения обем е последователно свързана с тази на окачването на високоговорителя). Това от своя страна довежда до промяна на резонансната честота и качественият фактор. Промяната на резонансната честота е :

$$\omega'_0 = \omega_0 \sqrt{\frac{V + V_{as}}{V}} \quad (44)$$

Тук  $\omega_0$  е кръговата резонансна честота на високоговорителя, монтиран върху заден обем  $V$ ,

$\omega'_0$  е кръговата резонансна честота на високоговорителя, монтиран на безкраен екран.

$V_{as}$  е обемът, еквивалентен на гъвкавостта на окачването на високоговорителя.

Промяната на качествения фактор се изразява в промяна на механичния такъв, като електрическият не се променя. Новият механичен качествен фактор е:

$$Q'_M = Q_M \sqrt{\frac{V + V_{as}}{V}} \quad (45)$$

Тогава новият тотален качествен фактор се определя по формулата:

$$Q'_t = \frac{Q'_M Q_E}{Q'_M + Q_E} \quad (46)$$

Функцията, описваща честотната характеристика на звуковото налягане е:

$$P_s = \frac{kAs^2}{Bs^4 + Cs^3 + Ds^2 + Es + 1} \quad (47)$$

Тук  $s=j\omega$  е комплексната честота, а коефициентите в уравнението са:

$$A = C_{as} P_g; B = T_s^2 T_2^2; C = \frac{T_2^2 T_s}{Q_t}; D = T_2^2 + T_{2s}^2 + T_s^2; E = \frac{T_s}{Q_t} \quad (48)$$

$$k = \frac{j\rho c}{2\pi f}; T_s^2 = C_{AS} M_{AS}; T_2^2 = C_{A2} M_{A2}; T_{2s}^2 = C_{AS} M_{A2}$$

$P_g$  и  $Q_t$  бяха дефинирани по-горе.

Напомняме, че:

$$P_g = \frac{E_g B l}{R_E S_D}; Q_t = \frac{T_s}{C_{AS} R_{AT}}; R_{AT} = R_{AS} + R_0; R_0 = \frac{(Bl)^2}{(R_E + R_g) S_D^2}$$

За да се изпълни условието за максимално плоска характеристика приравняваме на нула всички коефициенти в знаменателя с изключение на този пред най-високата степен на честотата и като решим получената система уравнения получаваме:

$$T_s = T_2; Q_t = 0,38; M_{A2} = 1,414 M_{AS} \quad (49)$$

При максимално гладките характеристики за кутиите от този тип се получава максимално усилване при минимална широчина на пропусканата лента. При промяна на качествения фактор произведението усилване-широчина на лентата остава постоянно. Особено е, че при увеличаване на качествения фактор на високоговорителя се намалява усилването, при което се разширява честотната лента на пропускане, а също така се увеличава и неравномерността в тази лента, като при увеличаване на  $Q_t$  до 1,25 неравномерността в лентата на пропускане достига 3 dB. Увеличаването на качествения фактор при необходимост може да стане най-лесно чрез увеличаване на  $R_g$ . Подобно разширяване на честотната лента при намаляване на чувствителността се получава и при увеличаване на масата на въздуха в тръбата на акустичния вход при запазване на времеконстантата на предния обем (за целта този обем трябва да се намалява при увеличаване на масата на въздуха в тръбата).

Интересно е, че в тръбата се получава резонанс, (подобен на този в тръбите на орган) на честота, по-висока от лентата на пропускане, което повдига нивото на излъчвания на тази честота звук, като понякога неговото ниво е само със 7 dB по-ниско от това в лентата на пропускане. Това явление може да се избегне при използването на пасивна мембрана вместо тръба, или чрез използването на електрически филтър.

Демпфането на предния обем довежда до увеличаването на неравномерността в лентата на пропускане без да даде никакви предимства и затова трябва да се избягва.

*Системи от пети ред.* Такава система се получава, когато последователно на високоговорителя се включи електрически елемент индуктивност. След преобразуването и в акустичен елемент, тя се превръща в гъвкавост. Еквивалентната схема на такава система е показана на фиг.19, където гъвкавостта, еквивалентна на елемента индуктивност е означена като  $c_0$ .

Системата от пети ред се характеризира с наклон на срязване от трети ред за нискочестотния филтър (той оформя срязването от към високите честоти) и типичния за затворена кутия наклон от втори ред за високочестотния филтър (оформящ срязването от към ниските честоти). Така получената честотна характеристика е несиметрична. За отбелязване е, че срязването от трети ред се получава с помощта на електрическа схема само от първи ред.

Функцията на честотната характеристика на системата е:

$$P_{(s)} = \frac{kAs^2}{Bs^5 + Cs^4 + Ds^3 + Es^2 + Fs + 1} \quad (50) \quad \text{Където:}$$

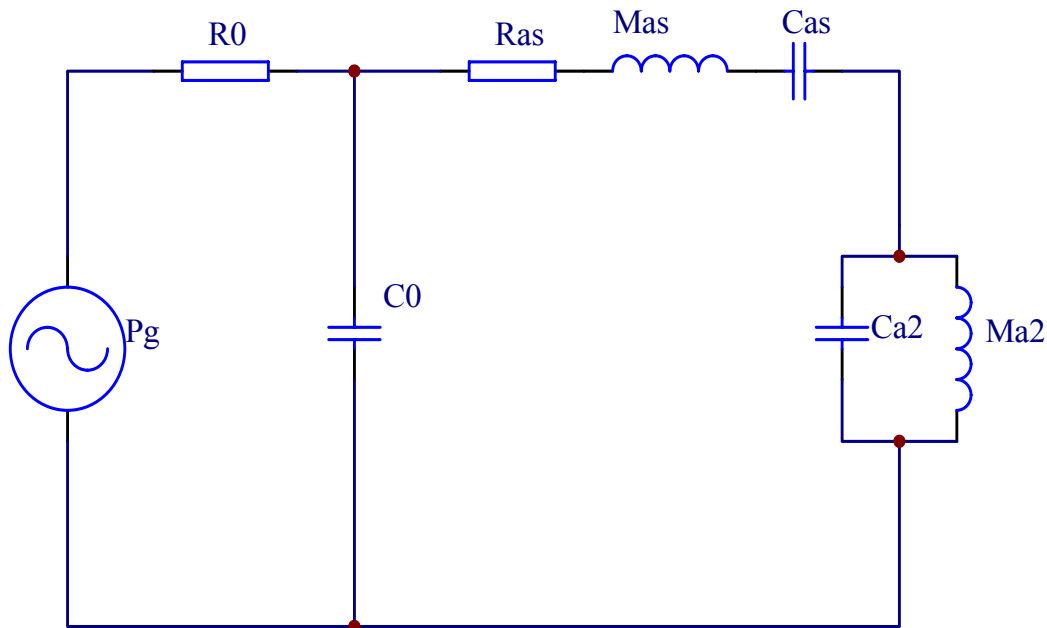
$$A = C_{AS}P_g; B = T_S^2T_2^2T_0'; C = T_S^2T_2^2 + \frac{T_2^2T_0'T_S}{Q_M}$$

$$D = T_S^2T_0' + \frac{T_2^2T_S}{Q_E} + T_2^2T_0' + T_{2S}^2T_0' + \frac{T_2^2T_S}{Q_M} \quad (51)$$

$$E = \frac{T_0'T_S}{Q_M} + T_S^2 + T_2^2 + T_{2S}^2; F = \frac{T_S}{Q_E} + T_0' + \frac{T_S}{Q_M}$$

Освен това:

$$C_0 = \frac{S_D^2 L_E}{(BI)^2}; T_0' = C_0 R_0; Q_E = \frac{T_S}{C_{AS} R_0}; Q_M = \frac{T_S}{C_{AS} R_{AS}} \quad (52)$$



**Fig.19**

Като решим системата от коефициенти за да получим характеристика, съответстваща на Бътървурт, получаваме:

$$T_0' = 0,19T_S; Q_E = 0,55; T_2 = 0,69T_S; M_{A2} = 0,52M_{AS} \quad (53)$$

И тук при увеличаване на качествения фактор на високоговорителя се забелязва намаляване на усилването и разширяване на лентата на пропускане. За разлика от четвърторедните системи отсъства "органният" резонанс на тръбата на акустичния изход. При намаляване на предния обем и едновременно



запазване на стойността на  $T_2$  (увеличава се  $T_{2S}$ ) се забелязва увеличаване на широчината на пропусканата честотна лента при едновременно намаляване на чувствителността, като при намаляване на предния обем с 66% спрямо изчисления за Бътървъртова характеристика лентата се разширява до малко повече от две октави като чувствителността спада с близо 10 dB.

*Системи от шести ред*

Има два вида системи от шести ред-симетрична (наклон и на нискочестотния и на високочестотния филтри е от трети ред) и несиметрична(четвърти ред наклон за високочестотния филтър и втори ред за нискочестотния).

Симетричната система от шести ред се получава от системата от пети ред чрез добавяне на кондензатор последователно на високоговорителя. Този кондензатор при преобразуването на схемата в акустичен аналог се превръща в маса, при това паралелно свързана на елементите на високоговорителя и гъвкавостта, съответстваща на индуктивността от системата от пети ред. Така получената еквивалентната схема на симетрична система от шести ред е дадена на фиг.20.

Изразът за честотната характеристика е:

$$P(s) = \frac{kAs^3}{Bs^6 + Cs^5 + Ds^4 + Es^3 + Fs^2 + Gs + 1} \quad (54)$$

Където:

$$A = \frac{C_{AS}Q_E P_g}{C_{AS}Q_0 T_0 P_g}; B = T_S^2 T_2^2 T_0^2; C = \frac{T_S^2 T_2^2 T_0}{Q_0} + \frac{T_0^2 T_2^2 T_S}{Q_M}$$

$$D = T_S^2 T_0^2 + T_{0S}^2 T_0^2 + T_2^2 T_{2S}^2 + T_2^2 T_S^2 + T_0^2 T_2^2 + \frac{T_2^2 T_S T_0 Q_0}{Q_M} \quad (55)$$

$$E = \frac{T_S^2 T_0}{Q_0} + \frac{T_{2S}^2 T_0}{Q_0} + \frac{T_0^2 T_S}{Q_M} + \frac{T_2^2 T_0}{Q_0} + \frac{T_2^2 T_S}{Q_M}$$

$$F = T_S^2 + T_2^2 + T_0^2 + T_{0S}^2 + T_{2S}^2 + \frac{T_S T_0 Q_0}{Q_M}; G = \frac{T_0}{Q_0} + \frac{T_S}{Q_M}$$

Освен това:

$$T_0^2 = C_0 L_0; L_0 = \frac{(Bl)^2 C_E}{S_D^2}; Q_0 = \frac{T_0}{C_E R_E}; T_{0S}^2 = C_{AS} L_0 \quad (56)$$

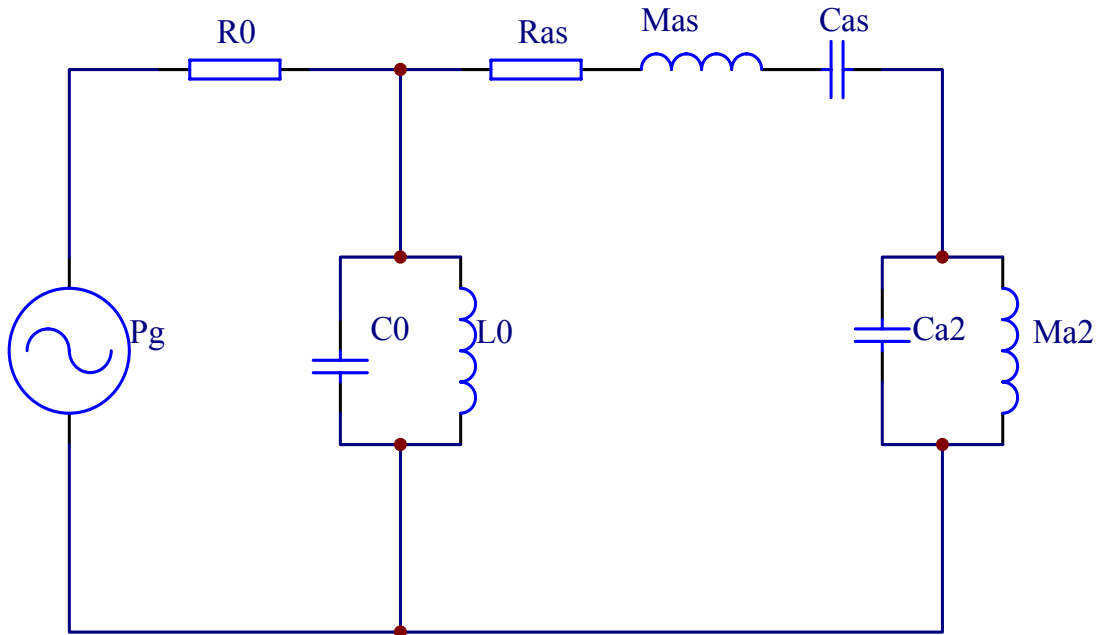


Fig.20

Като решим уравненията съгласно условията за характеристика на Бътървърт, получаваме:

$$T_0=T_2=T_S ; Q_0=0,26 ; T_{2S}=2,02T_S ; T_{0S}=0,6T_S \quad (57)$$

Интересен факт е отсъствието на качественият фактор на високоговорителя в горните условия. Неговото влияние се изразява само в нарастването на ефективността при нарастване на този качествен фактор.

При сравнение на честотната характеристика на високоговорителя, закрепен върху акустичен екран и характеристиката на излъчвателя, вижда се че на ниво минус 8 dB печалбата е приблизително една терца по-ниска долна гранична честота.

При тези системи производението  $L_0C_0$ ,  $T_0^2$ , настройката на предната кутия  $T_2^2$  са равни на резонанса на излъчвателя ( $T_S^2$ ).

Качественият фактор на електрическата схема  $Q_0$  оказва влияние върху широчината на пропусканата честотна лента и стръмността на склоновете на срязване, като при увеличаване на този качествен фактор се увеличават и двата параметъра. Оптимална стойност на  $Q_0$  е около 1.

Като се променя предния обем, при едновременно запазване на времеконстантата (увеличаване на  $M_{A2}$  и намаляване на  $C_{A2}$ ) се разширява честотната лента, намалява се чувствителността и се увеличава неравномерността, като при намаляване на обема с 50% спрямо определения за Бътърфуртова характеристика се получава разширяване с около една терца при намаляване на чувствителността с 10 dB и увеличаване на неравномерността с около 4 dB.

Обобщено, когато се увеличава  $Q_E$  на високоговорителя трябва да се увеличават  $T_{2S}^2$  и  $Q_0$  за да се компенсира.

Несиметричната система от шести ред се получава когато са отворени и двата акустични изхода-и предния, и задния. Тази система е много ефективна-осигурява с 6 dB повишаване на изходния сигнал при същата или по-малка амплитуда на колебание на мембраната.

Заместващата схема е показана на фиг.21, а изразът за честотната характеристика е:

$$P(s) = -iks(U_2 - U_1) = \frac{kAs^4}{Bs^6 + Cs^5 + Ds^4 + Es^3 + Fs^2 + Gs + 1} \quad (58)$$

Където:

$$A = (T_1^2 - T_2^2)C_{AS}P_g; B = T_S^2T_1^2T_2^2; C = \frac{T_1^2T_2^2T_S}{Q_t}$$

$$D = T_1^2T_2^2 + T_{1S}^2T_2^2 + T_1^2T_{2S}^2 + T_S^2T_2^2 + T_S^2T_1^2; E = \frac{T_1^2T_S}{Q_t} + \frac{T_2^2T_S}{Q_t} \quad (59)$$

$$F = T_S^2 + T_1^2 + T_2^2 + T_{1S}^2 + T_{2S}^2; G = \frac{T_S}{Q_t}$$

Освен това:

$$T_1^2 = C_{A1}M_{A1}; T_{1S}^2 = C_{AS}M_{A1} \quad (60)$$

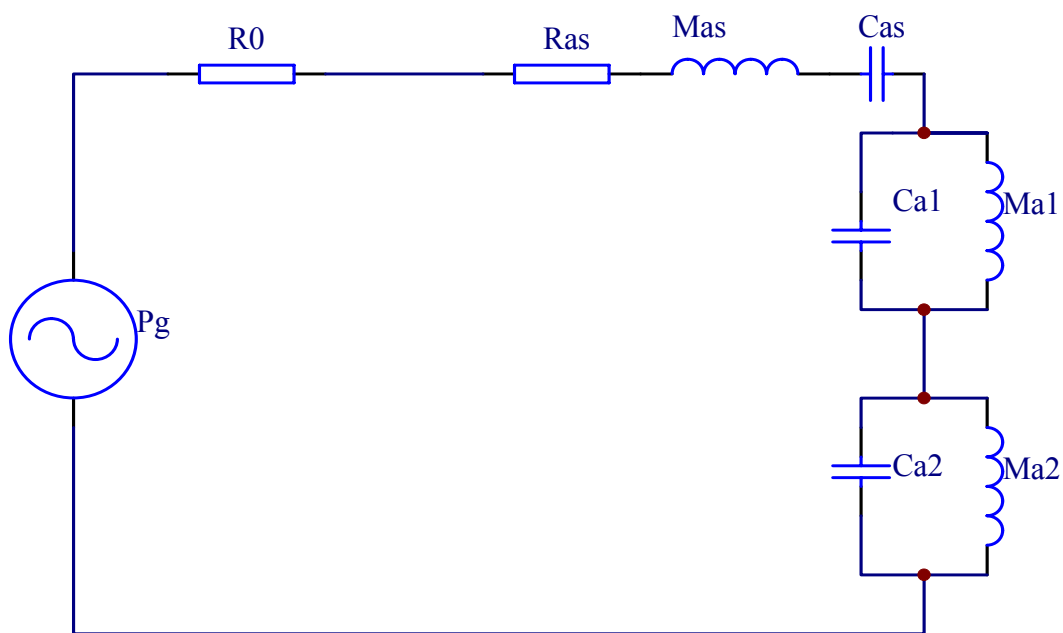


Fig.21

Тук също е възможно получаването на по-широка пропускана лента за сметка на чувствителността, но настройката е сравнително по-сложна, защото се постига чрез изменение на настройката на предната и задна кутии без изменение на масата на акустичните изходи (т.е.  $T_{1S}^2$  и  $T_{2S}^2 = \text{const.}$ ) Задният обем е увеличен, докато предния е намален и така произведението  $T_1 \cdot T_2 = \text{const.}$  Тази процедура не може да бъде повтаряна до безкрайност и широчината на пропусканата лента в този вид системи може да бъде увеличавана само до определена стойност.

*Системи от седми ред.*

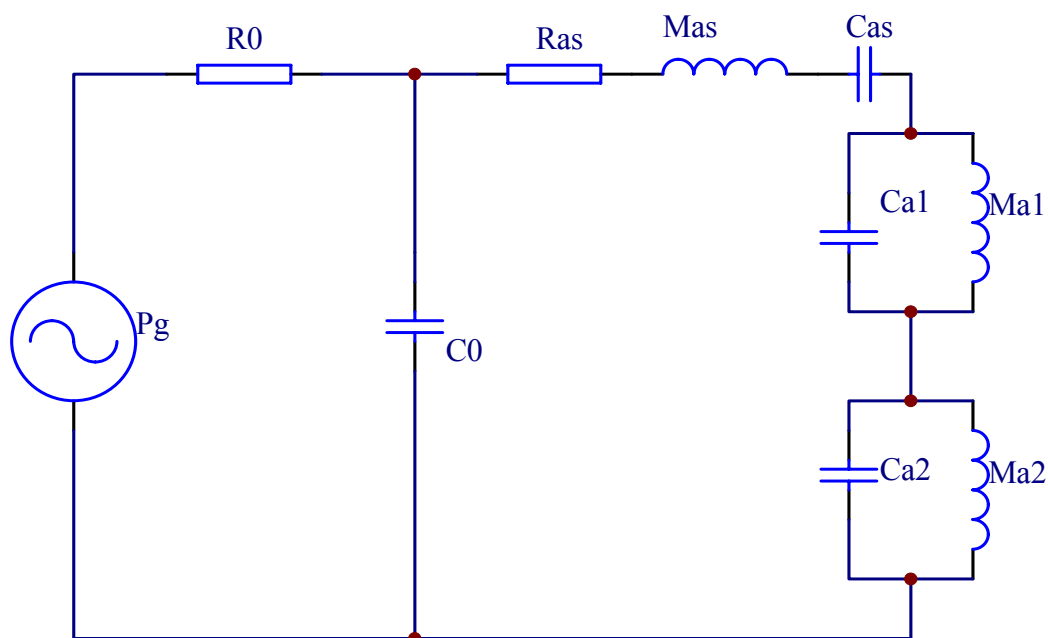


Fig.22

При двойно отворената система (несиметрична система от шести ред) е желателно да имаме стръмност от трети ред за склона на нискочестотния филтър по същите причини, както и при системата от четвърти ред -

“органичните” резонанси на акустичните изходи. Тук този проблем дори е по-сериозен поради наличието на две тръби. Изискваното затихване отново се осигурява с помощта на серийно свързана бобина. Заместващата схема е показана на фиг.22, а изразът на честотната характеристика е:

$$P(s) = \frac{kAs^4}{Bs^7 + Cs^6 + Ds^5 + Es^4 + Fs^3 + Gs^2 + Hs + 1} \quad (61)$$

Където:

$$\begin{aligned} A &= (T_1^2 + T_2^2)C_{AS}P_9; B = T_S^2T_1^2T_2^2T_0'; C = T_S^2T_1^2T_2^2 + \frac{T_1^2T_2^2T_S T_0'}{Q_M}; \\ D &= T_S^2T_1^2T_0' + T_S^2T_2^2T_0' + \frac{T_1^2T_2^2T_S}{Q_E} + T_1^2T_2^2T_0' + \frac{T_1^2T_2^2T_S}{Q_M} + T_{1S}^2T_2^2T_0' + T_1^2T_{2S}^2T_0'; \\ E &= T_S^2T_1^2 + T_S^2T_2^2 + T_1^2T_2^2 + T_{1S}^2T_2^2 + T_{2S}^2T_1^2 + \frac{T_1^2T_S T_0'}{Q_M} + \frac{T_2^2T_S T_0'}{Q_M}; \\ F &= \frac{T_1^2T_S}{Q_E} + T_S^2T_2^2 + T_1^2T_0' + T_{1S}^2T_0' + \frac{T_2^2T_S}{Q_E} + \frac{T_1^2T_S}{Q_M} + \frac{T_2^2T_S}{Q_M} + T_2^2T_0' + T_{2S}^2T_0'; \\ G &= T_S^2 + T_1^2 + T_2^2 + T_{1S}^2 + T_{2S}^2 + \frac{T_0'T_S}{Q_M}; H = \frac{T_S}{Q_M} + \frac{T_S}{Q_E} + T_0' \end{aligned} \quad 62$$

Честотната характеристика на тези системи е най-широка и обхваща повече от две октави, като неравномерността в лентата на пропускане е много малка. Чувствителността е с два до 3 dB по-висока от тази на единично отворените системи при същата или по-малка амплитуда на отклонение на мембраната. За съжаление не може да бъде намерена проста процедура за преобразуване на система от шести ред в такава от седми, както това беше при преминаването на система от система от четвърти ред към такава от пети ред. Конструирането на такива системи се извършва с помощта на компютър по метода на последователните приближения.

*Системи от осми ред.*

Аналогично на получаването на симетричната система от шести ред, при добавянето на един последователен кондензатор към системата от седми ред получаваме система от осми ред. При това наклона на срязване получава стръмност 24 dB/Oct.

Ефективността на тази система е по-висока от тази на системите от по-нисък ред, но основен неин недостатък е силното спадане на електрическия импеданс в близост с горната гранична честота - до два пъти по-нисък от постояннотоковото съпротивление на звуковата бобина. По-високата ефективност позволява до известна степен да се избегне този недостатък чрез свързване на едно последователно активно съпротивление.

По-нататъшно развитие на тези системи представляват системите с три камери, но тяхното оразмеряване е възможно само с помощта на компютър, поради факта, че не съществува еднозначно решение на функцията, описваща честотната характеристика и връзката между параметрите се описва с помощта на неравенства.

## ФИЛТРИ ЗА ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА

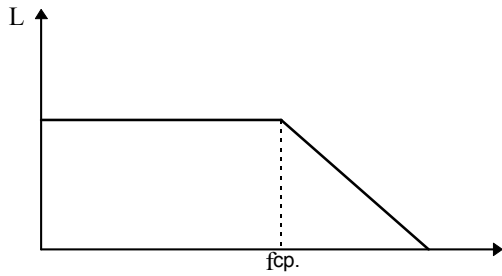


Fig.23

акустичните антени е известно, че при сумирането на звуковото налягане, създавано от повече от един

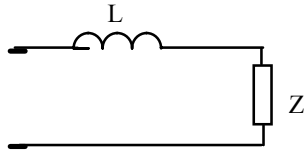


Fig.24

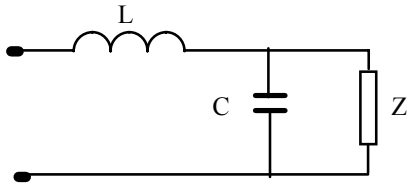


Fig.25

Това, разбира се, важи само за идеалните филтри, а при реалните сигналите с честота от областта на непропускане намаляват плавно своето ниво с увеличаване на честотата и това ниво става нула при честота равна на безкрайност. Стръмността на спадане на това ниво се нарича стръмност на срязване на филтъра и зависи от неговия ред, като колкото по-висок е реда на филтъра, толкова по-стръмно е срязването. Честотната характеристика на един нискочестотен филтър е показана на фиг.23, схемата на такъв филтър от първи ред е показана на фиг.24, схемата на нискочестотен филтър от втори ред е показана на фиг.25, а на фиг.26 е показана схемата на нискочестотен филтър от трети ред. Формулите, по които се определят стойностите на елементите са следните:

За филтър от първи ред:

$$L = \frac{Z}{2\pi f_0} |H| \quad (64)$$

За филтър от втори ред:

$$L = \frac{\sqrt{2}Z}{2\pi f_0} |H| \quad (65)$$

Предназначението на електрическите разделителни филтри в озвучителните тела е да разпределят входният електрически сигнал по честота и да го подадат на отделните високоговорители така, че високоговорителите да работят само в своя ефективен честотен обхват, където параметрите им са гарантирани. Спадането на нивото на електрическия сигнал в разделителните честоти, където работят едновременно два високоговорителя, трябва да бъде около 3 dB, за да може след сумирането на акустичния сигнал от двата високоговорителя да се гарантира равномерна честотна характеристика на озвучителното тяло в тази честотна област. От теорията на

$$P_{\text{total}} = P_{\text{individual}} \cdot \sqrt{n} \quad (63)$$

където  $n$  е броя на едновременно работещите източници.

Когато  $n=2$ , по формулата се получава повишаване на резултантното ниво с  $\sqrt{2}$  пъти или 3 dB.

В озвучителните тела обикновено се използват пасивни L-C разделителни филтри от първи, втори или трети ред, като изключение правят озвучителните тела с вградени усилватели за отделните високоговорители (звукови монитори). В настоящата статия ще се занимаваме само с пасивните разделителни филтри.

В зависимост от пропусканата честотна област, филтрите, използвани в озвучителните тела биват нискочестотни, високочестотни и лентови. Нискочестотните филтри пропускат сигналите с честота от нула до някаква честота, наречена честота на срязване и не пропускат сигналите с по-висока от тази честота.

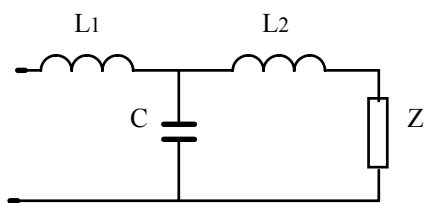


Fig.26

Стърмността на спадане на честотната характеристика след честотата на срязване  $f_0$  при филтрите от първи ред е 6 dB/oct, при филтрите от втори ред тя е 12dB/oct и при филтрите от трети ред тази стърмност е 18 dB/oct.

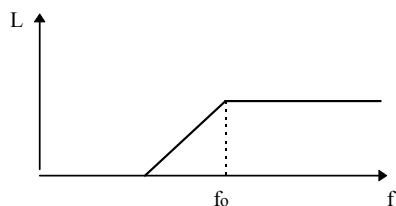


Fig.27

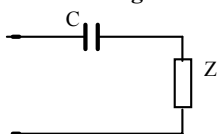


Fig.28

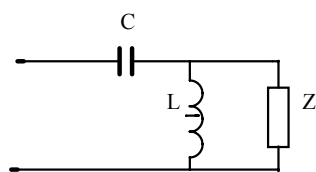


Fig.29

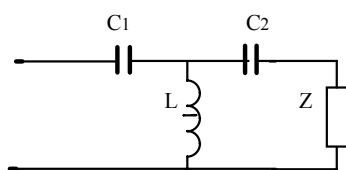


Fig.30

$$C = \frac{\sqrt{2}}{4\pi Z f_0} |F| \quad (66)$$

И за филтри от трети ред:

$$C = \frac{2}{3\pi Z f_0} |F| \quad (67)$$

$$L_1 = \frac{3Z}{4\pi f_0} |H| \quad (68)$$

$$L_2 = \frac{Z}{4\pi f_0} |H|$$

Високочестотните филтри пропускат сигналите с честота по-висока от честотата на срязване и не пропускат сигналите с честота по-ниска от нея. Примерната честотна характеристика на един високочестотен филтър е показана на фиг.27. Стърмността на срязване в зависимост от реда на филтъра е както при нискочестотните филтри. Схемите на високочестотни филтри от първи, втори и трети ред са показани съответно на фиг.28, фиг.29 и фиг.30, а формулите за оразмеряване на елементите на филтъра са:

За филтър от първи ред:

$$C = \frac{1}{2\pi Z f_0} |F| \quad (69)$$

За филтър от втори ред:

$$C = \frac{\sqrt{2}}{4\pi f_0 Z} |F| \quad (70)$$

$$L = \frac{\sqrt{2}Z}{2\pi f_0} |H| \quad (71)$$

И за филтър от трети ред:

$$L = \frac{3Z}{8\pi f_0} |H| \quad (72)$$

$$C_1 = \frac{1}{3\pi f_0 Z} |F| \quad (73)$$

$$C_2 = \frac{1}{\pi f_0 Z} |F|$$

Лентовите филтри (филтрите на средночестотния високоговорител) се състоят от едно нискочестотно и едно високочестотно филтрови звена, свързани последователно, като при това високочестотното звено е настроено за долната срязваща честота на лентата, подавана на средночестотния високоговорител, а нискочестотното звено е настроено на горната срязваща честота на тази лента. Формулите за оразмеряване на тези звена са както дадените по-горе.

При свързването на високоговорителите към филтъра, подаваното на тях напрежение е дефазирено спрямо входното, като при нискочестотните филтри изходното напрежение

закъснява спрямо входното, а при високочестотните то избързва спрямо него. При това ъгълът на дефазирание зависи от редът на филтъра- при филтрите от първи ред този ъгъл за сръзващата честота е  $45^{\circ}$ , при филтрите от втори ред е  $90^{\circ}$ , а при филтрите от трети ред е  $135^{\circ}$ . За това при филтрите от втори ред се налага високоговорителите имащи една и съща разделителна честота да бъдат включени противоположно един на друг- при двулентовите озвучителни тела нискочестотния и високочестотен високоговорители са включени с взаимно обратен поляритет, а при три лентовите-нискочестотния и високочестотен високоговорители са включени с еднакъв поляритет, а средночестотния-с обратен. Поляритета на високоговорителите е означен на изводните пера с точка до едното перо или знак +. Ако такова означение липсва или е изтрито, то поляритета лесно може да бъде определен с помощта на източник на постоянно напрежение 1,5V, който се свързва за кратко време към изводните клеми на високоговорителя и се следи в каква посока ще се придвижи мембраната. Ако тя се придвижи напред, там където е бил свързан положителния полюс на токоизточника се означава поляритет + на високоговорителя (или точката при другото означение).

След оразмеряването на елементите на филтъра се подбират най-близките стандартни стойности на кондензаторите и се уточняват необходимите стойности на индуктивността на бобините. При филтрите за озвучителни тела се използват главно бобини без феромагнитна сърцевина, понеже последната при големи токове се насища и довежда до повишени изкривявания. Оразмеряването на такива бобини може да стане с помощта на формулата:

$$L = \frac{320a^2n^2}{6a + 9b + 10c} \cdot 10^{-8}, \text{H} \quad (74)$$

където  $a$  е средния радиус на намотката,

$b$  е височината на тялото, върху което е навита бобината,

$c$  е височината на намотката (разликата между външния диаметър на бобината и диаметъра на тялото, върху което е навита тя).

При размери на тялото, върху които е навита бобината - диаметър 40 mm и височина 20 mm и при диаметър на проводника 1 mm оразмеряването може да стане чрез отчитане от табл.1. Същите таблица и графика могат да се използват и при диаметър на проводника от 0,5 mm до 1,2 mm, като грешката е в границите на 5%. Препоръчва се след определяне броя на навивките върху тялото да се навият 5-10% повече на брой навивки и окончателната стойност на индуктивността да се настрои чрез развиване на част от тях и измерване с помощта на R-L-C мост.

Табл.1

L,mH	0,2	0,25	0,35	0,5	0,6	0,7	1,0	1,2	1,5	2,0	3,2	6,4
n	60	68	80	100	110	120	145	158	178	208	257	360

Най-голяма индуктивност при минимални размери се получава при квадратна форма на намотката (фиг.31). Оразмеряването на такива бобини може да стане с помощта на формулата:

$$a = \sqrt[5]{\frac{d_{\text{в.}}^4 \cdot L \cdot 10^7}{25,5}} \quad (75)$$

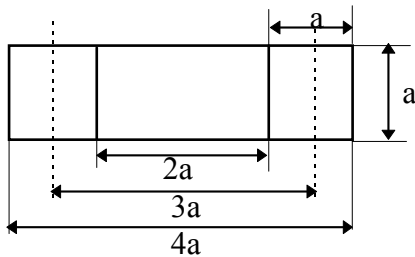


Fig.31

където  $d_{\text{в.}}$  е диаметърът на проводника с изолацията.

Диаметърът на проводника се подбира с оглед плътността на тока да не надвишава  $3,5 \text{ A} / \text{mm}^2$ .

Броят навивки е:

$$n = \frac{a^2}{d_{\text{в.}}^2} \quad (76)$$

## ИЗМЕРВАНЕ НА ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ НА НИСКОЧЕСТОТЕН ВИСОКОГОВОРИТЕЛ

Измерването на тези характеристики на високоговорителите се налага от факта, че в много случаи не се разполага с данни за тях, понеже не всички фирми ги дават в каталозите, а те са необходими при оразмеряването на акустичното оформление. Това измерване изисква сравнително лесно достъпна

апаратура-нискофреотен генератор с честотен обхват от 10 Hz и изходно напрежение 10 V, електронен волтметър с обхват от еди до сто милivolта, мост за измерване на постояннотоково съпротивление или поне точен цифров мултицет и едно точно съпротивление със стойност  $10k\Omega / 1\%$ . Необходима е също кутия с басрефлекс и произволен, но известен обем, на която може да се закрепят измервания високоговорител. Схемата на опитната постановка е дадена на фиг.32.

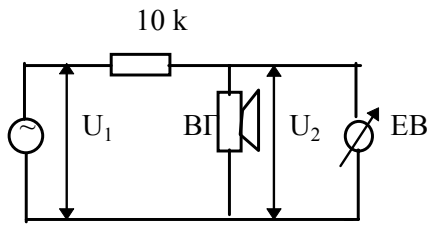


Fig.32

повърхност, при което затворения пред мембраната обем би повишил резонансната честота, импедансната характеристика има формата, показана на фиг.33. Тук  $f_0$  е резонансната честота на високоговорителя, за която неговия импеданс има максимална стойност  $Z_{\text{в.макс}}$ . Отношението на тази стойност към постояннотоковото съпротивление на бобината R, което може да бъде измерено с помощта на цифров мултицет или съпротивителен мост се нарича коефициент на превишение по импеданс и се означава с буквата a:

$$a = \frac{Z_{\text{в.макс}}}{R} \quad (77)$$

Следващата стъпка е определянето на величината  $\sqrt{a} \cdot R$  и на честотите  $f_1$  и  $f_2$ , за които импедансът има такава стойност и които се намират от двете страни на  $f_0$ . По тези данни се изчисляват качествените фактори с помощта на формулите:

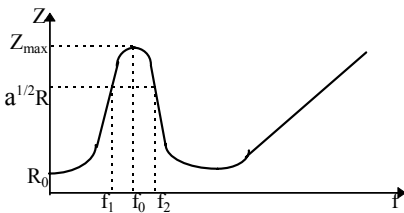


Fig.33

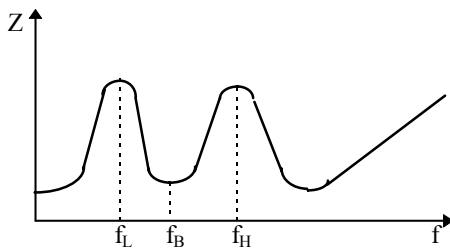


Fig.34

подавана на високоговорителя в процеса на измерването е много малка, така, че за целта може да се използва здрав добре херметизиран кашон, на който са изрязани отвори за закрепване на високоговорителя и за бас рефлекс. Формата на импедансната характеристика е показана на фиг.34, като не е задължително двата върха да бъдат еднакво високи. Трябва колкото е възможно по-точно да се отчетат честотите  $f_L$ ,  $f_B$  и  $f_H$ . По тези данни обемът, еквивалентен на гъвкавостта на окачване на високоговорителя се определя с помощта на формулата:

$$V_{\text{ас}} = \frac{V(f_H^2 - f_B^2)(f_B^2 - f_L^2)}{f_H^2 \cdot f_L^2} \quad (79)$$

Тук V е обемът на кутията, върху която е монтиран високоговорителят.

Благодарение на голямата стойност на съпротивлението, свързано последователно на високоговорителя, токът във веригата се определя само от него и може да се приеме за постоянен. В такъв случай падът на напрежение върху високоговорителят зависи само от неговия импеданс. При така подобрите стойности на напрежението, подавано от генератора - 10 V и на резисторът -  $10k\Omega$ , токът във веригата е постоянен и е равен на 1 mA, а показанието на свързания паралелно на високоговорителя електронен волтметър в mV числено е равно на импеданса в омеге. Изменяйки честотата на подаваното от генератора напрежение можем да снемем импедансната характеристика на високоговорителя. Когато той не е монтиран върху кутия и е спазено изискването да не е похлупен върху някаква

$$Q_{\text{mp}} = \frac{\sqrt{a} \cdot f_0}{f_2 - f_1}$$

$$Q_{\text{ep}} = \frac{Q_{\text{mp}}}{a - 1} \quad (78)$$

$$Q_t = \frac{Q_{\text{mp}} \cdot Q_{\text{ep}}}{Q_{\text{mp}} + Q_{\text{ep}}}$$

За да се определи обемът, еквивалентен на гъвкавостта на окачването на високоговорителя трябва да снемем по същия начин импедансната характеристика на високоговорителя, монтиран върху произволна кутия с бас рефлекс, на която знаем точния обем. Стените на тази кутия не е необходимо да бъдат много здрави, защото мощността,



Друг метод за определяне на този параметър е чрез използването на кутия със затворен обем. Недостатък на този метод е факта, че силно влияние върху крайния резултат оказват недоброто уплътняване на кутията и пропусаемостта на мембраната. Все пак, когато се касае за използване на високоговорителя в затворен обем, този метод се предпочита. При него се използва същата опитна постановка от фиг.1, като високоговорителя е монтиран върху затворена кутия, чийто вътрешен обем е предварително известен. При тези условия се сменя импедансната характеристика, която по своя ход прилича на тази от фиг.32, и се определя резонансната честота  $f_{0e}$ , честотите  $f_1$  и  $f_2$  и се изчислява електрическият качествено фактор  $Q_e$  по формула (2). Обемът  $V_{as}$  се определя по формулата:

$$V_{as} = V \left( \frac{f_{0e} Q_e}{f_0 Q_{ep}} - 1 \right) \quad (80)$$

Определянето на качествения фактор на обема на озвучителното тяло става по следния начин:

а) Озвучително тяло със затворен обем.

Най-напред се определят механичният и електрическият качествени фактори на високоговорителя в свободно пространство по метода, описан по-горе. След това високоговорителя се монтира на измервания обем и отново се определят електрическият и механичният качествени фактори по същия метод, като те се означават с  $Q_{mc}$  и  $Q_{ec}$  съответно. Тогава качественият фактор на обема е:

$$Q_B = \left( 1 - \frac{f_s Q_{ep}}{f_c Q_{ec}} \right) \frac{f_c Q_{mc} Q_{mp}}{f_c Q_{mp} - f_s Q_{mc}} \quad (81)$$

Тук  $f_c$  е резонансът на високоговорителя, монтиран върху измервания обем, а  $f_s$  е неговият резонанс в свободно пространство.

б) Отново се определят  $f_s$ ,  $a$ ,  $Q_{mp}$  и  $Q_{ep}$  на високоговорителя в свободно пространство както по-горе. След това високоговорителят се монтира на измерваната кутия с бас рефлекс и от импедансната характеристика се определят честотите  $f_L$ ,  $f_H$  и  $f_B$ , както и минималният импеданс  $R_m$  при честотата  $f_B$ . Отношението на  $R_m$  към постояннотоковото съпротивление на бобината  $R_0$  се означава с  $a_m$ . Изчислява се:

$$\alpha = \frac{(f_H - f_B)(f_H + f_B)(f_B - f_L)(f_B + f_L)}{f_H^2 f_L^2} \quad (82)$$

Тогава:

$$Q_B = \frac{1}{\alpha Q_{ep}} \frac{f_B}{f_s} \frac{1}{a_m - 1} \quad (83)$$

Определянето на присъединената маса въздух става по формулата:

$$m_R = \frac{2}{3} \rho_S d_{\text{до}}^3 = 850 d_{\text{до}}^3, [g] \quad (84)$$

Тук  $d_{\text{еф}}$  - ефективния диаметър на мембраната, [m].

Определянето на произведението  $Bl$  става по формулата:

$$Bl = \sqrt{\frac{2\pi f_0 m_M R_0}{Q_{ep}}} \quad (85)$$

За да получим размерност на  $Bl$ , подходяща за програмата "AUDIOPAD - PRO 6,0", трябва  $m_M$  [kg]. Освен това,  $m_M = m_d - m_R$ .

Индуктивността на звуковата бобина се определя от израза:

$$L = \frac{\sqrt{Z_{\text{до}}^2 - R_0^2}}{2\pi f} \quad (86)$$

Тук  $f$  трябва да бъде честота, няколко пъти по-голяма от честотата, на която се определя номиналният импеданс т.е. от честотата на минимума след резонансния максимум в импедансната характеристика на високоговорителя в свободно пространство.

Гъвкавостта на окачането на високоговорителя се определя по формулата:

$$C_M = \frac{V_{as}}{\psi \rho_S S_e^2} = \frac{V_{as}}{1,4 \cdot 10^5 S_e^2} \quad (87)$$

Тук  $S_e$  е еквивалентната площ на мембраната

$V_{as}$ -еквивалентен обем, определен по една от горните методики.

Ако бас рефлексната тръба е оразмерена за един диаметър и в следствие се налага да се промени диаметъра, новата дължина се определя по формулата:

$$I_2 = \frac{d_2^2}{d_1^2} I_1 \quad (88)$$

Оразмеряване на някои суббасови системи:

Могат да бъдат изведени следните разчетни формули:

I. За система от четвърти ред акустичните елементи са:

$$M_{A2} = 1,414M_{AS}$$

$$C_{A2} = \frac{1}{4,656 \cdot \pi^2 f_0^2 M_{AS}}$$

II. За симетрична система от шести ред:

1. Електрически елементи:

$$C_E = \frac{\sqrt{C_{AS} M_{AS}}}{R_E}$$

$$L_E = 0,275(R_E + R_G) \sqrt{C_{AS} M_{AS}}$$

2. Акустични елементи:

$$M_{A2} = \frac{4,04 \sqrt{C_{AS} M_{AS}}}{C_{AS}}$$

$$C_{A2} = \frac{C_{AS} M_{AS}}{2M_{A2}}$$

И за двата вида системи геометричните елементи са:

$$V_2 = C_{A2} \rho c_0^2 S_{\text{аф}}^2.$$

$$I_P = \frac{M_{A2} S_P}{\rho}$$

където:  $\rho$  е относителната плътност на въздуха  $1,29 \text{ kg/m}^3$ ,

$c_0$  е скоростта на звука във въздуха,  $340 \text{ m/s}$

$l_P$  е дължината на акустичния изход,

$S_P$  е сечението на акустичния изход,

$S_{\text{еф}}$  е ефективната площ на мембраната на високоговорителя.

$V_2$  е обемът на предната камера.

Задният обем се изчислява като озвучително тяло със затворен обем, при което резонансната честота на високоговорителя, монтиран на този обем е централна честота на възпроизвежданата честотна лента на системата. Долната и горна гранични честоти при системите от шести ред са на по една октава съответно по-ниско и по-високо от нея, а при системите от четвърти ред зависят от качествения фактор на високоговорителя и са от порядъка на две терци до една октава. В този случай по-широката честотна лента са получава при по-голям качествен фактор, но за сметка на по-ниска чувствителност, като производението на честотна лента-чувствителност е постоянна величина.