

К. т н. инж. ДИМИТЪР ФОТЕВ ПОПЯНЕВ

КОНСТРУИРАНЕ НА ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА

ДЪРЖАВНО ИЗДАТЕЛСТВО
„ТЕХНИКА“
СОФИЯ, 1984

В книгата са разгледани конструкции на озвучителни тела, които не се произвеждат от радиопромишлеността ни, но могат да се реализират с български високоговорители, и то така, че да осигуряват висококачествено звуковъзпроизвеждане. Описани са най-важните параметри на високоговорителите и е разглеждана основната теория и методите за конструиране на разделителните филтри. Изяснена е съвременната теория на основните въпроси на озвучителните тела със затворен обем, с фазоинвертори и с пасивна мембрана. Разгледани са също и произвежданите от нашата промишленост озвучителни тела с оглед на реализирането им в домашни условия. Всички озвучителни тела са дадени с конкретни размери и препоръки, необходими за изпълнението им, включително и за оформянето на външния им вид.

Книгата е предназначена за специалисти — конструктори на радиоелектронна апаратура, за подготвени радиолюбители и за всички, които се интересуват от висококачествено звуковъзпроизвеждане.

ПРЕДГОВОР

Завършващ елемент на съвременните звуковъзпроизвеждащи системи са озвучителните тела. Елементната база и схемотехническите решения на съвременните електронни апаратури от състава на звуковъзпроизвеждащите системи са на достатъчно високо ниво, за да осигурят неизкривено обработване на електрическите сигнали, съответстващи на дадена звукова панорама. Озвучителните тела трябва да възпроизвеждат звуковата панорама също без изкривявания. Какъв смисъл има да се създават сложни и скъпи електронни апаратури с много високи качествени показатели, ако озвучителните тела внасят достатъчно големи изкривявания? Затова в последно време се полагат големи усилия за усъвършенстване на озвучителните тела — техните параметри трябва да бъдат достатъчно високи, за да не компрометират електронната апаратура и да осигурят високо качество на възпроизвеждането.

Подобряването на качествените показатели на озвучителните тела се осъществява главно по два пътя — чрез подобряване показателите на високоговорителите и чрез усъвършенстване на акустичното оформяне на озвучителните тела. Със създаването на специални високоговорители, които възпроизвеждат само една част от звуковия спектър, бе направен качествен скок. Усъвършенстването на тези високоговорители е един непрекъснат процес.

Дълго време се произвеждаха само озвучителни тела със затворен обем. Създадени бяха двулентови, трилентови, четирилентови озвучителни тела, при които, благодарение на специалните високоговорители, бе постигната достатъчно равномерна честотна характеристика и малки изкривявания. Честотният обхват в областта на високите честоти бе разширен достатъчно над 20 kHz, за да се осъществи възпроизвеждане с висока вярност. Остана нерешен въпросът за възпроизвеждането на сигналите с ниска честота. Въпреки използването на нискочестотни високоговори-

тели с много голяма гъвкавост на окачването, при което се реализира т. нар. *въздушно окачване* на трептящата система на високоговорителя към затворения обем, за добро възпроизвеждане на сигналите с ниска честота трябва да се използват озвучителни тела, които имат недопустимо за домашните условия голям обем. Появи се озвучителното тяло с фазоинвертор, при което съществуват условия за значително подобряване ефективността на преобразуването на сигналите с ниска честота при приемлив за жилищните размери обем. С цел разширяване на честотния обхват в областта на ниските честоти бе конструирано и озвучителното тяло с пасивна мембрана (пасивен излъчвател, пасивен Радиатор). Основната теория за единен анализ на трите вида озвучителни тела бе създадена сравнително скоро и все още не е достатъчно популярна.

С тази книга авторът си е поставил две основни цели. Първата е да популяризира основните изводи от единната теория за анализ на озвучителните тела със затворен обем, озвучителните тела с фазоинвертор и с пасивна мембрана, необходими при тяхното проектиране. Втората цел е да опише редица озвучителни тела, в които се използват предимно български високоговорители и които може да се реализират в домашни условия. Всъщност втората цел е продължение на първата, защото при проектирането на озвучителните тела е използвана разгледаната основна теория, а това е най-добрият начин за нейното популяризиране.

Авторът изказва своята благодарност на рецензентите проф. к. т. н. инж. Иван Вълчев и н. с. инж. Пламен Игнатов, както и на научния редактор инж. Емилия Ашканова за проявеното старание при рецензирането и редактирането на книгата, с което допринесоха за значителното ѝ подобряване.

С благодарност ще бъдат приети всички бележки и препоръки, които читателите изпратят на адреса на издателството.

1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАСИФИКАЦИЯ

Високоговорителите са електроакустични преобразуватели, позволяващи да се получат акустични трептения в резултат на въздействието на електрически сигнали. Те са предназначени да излъчват в пространството акустична мощност в областта на честотите от звуковия спектър, т. е. от 20 Hz до 20 kHz. В последно време се забелязва тенденция за създаване на високоговорители, които да излъчват акустична мощност и извън областта на звуковия спектър, по-специално в областта на високите честоти до 120 kHz.

Високоговорителите преобразуват електрическата енергия в механична. В зависимост от начина на преобразуване те се разделят на електромагнитни, електродинамични, електростатични (кондензаторни), пиезоелектрични и термойонни. В апаратурата за звуковъзпроизвеждане и в електроакустичните системи за озвучаване на открити и на закрити пространства се използват предимно електродинамични високоговорители поради техните експлоатационни и технико-икономически предимства. В последно време във висококачествените битови акустични системи намират приложение пиезоелектричните и електростатичните високоговорители за възпроизвеждане на сигналите с честота и над 20 kHz.

В зависимост от начина, по който се осъществява връзката между трептящата система на високоговорителя и пространството, в което се възбужда звуково поле, се различават: *високоговорители с директно излъчване*, чиято трептяща система е свързана непосредствено с пространството, в което се възбужда звуково поле или се намира в самото звуково поле; *рупорни високоговорители*, чиято трептяща система е свързана с пространството, в което се възбужда звуково поле, посредством акустичен рупор.

При разглеждане на основните технически параметри на високоговорителите се използват някои специфични геометрични понятия, които трябва да бъдат уточнени, преди да се дефинират самите параметри.

Излъчващ отвор на високоговорителите — частта от равнината, в която се осъществява връзката между излъчващия високоговорител и създаването от него звуково поле.

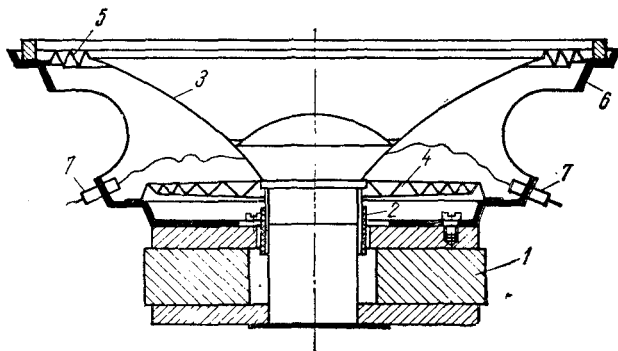
Работен център на високоговорителите — точката, от която се измерва разстоянието от високоговорителя до слушателя или до измервателния микрофон. Това обикновено е геометричният център на симетрия на излъчващия отвор.

Работна ос на високоговорителите — правата, която минава през работния център на високоговорителя. Тя е перпендикулярна на равнината на излъчващия отвор.

1.2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ НА ЕЛЕКТРОДИНАМИЧНИТЕ ВИСОКОГОВОРИТЕЛИ

На фиг. 1.1 е даден напречен разрез на електродинамичен високоговорител с директно излъчване. Той е изграден от магнитна система 1, звукова bobина 2, мембрана 3, трептилка 4, гънки (гофър) 5, корпус (шаси) 6 и изводи 7.

Магнитната система създава постоянно магнитно поле. През проводника на звуковата bobина протича променливият ток на въздействащия сигнал, който ще се преобразува. От взаимо-



Фиг. 1.1

действието на тока с постоянното магнитно поле възниква електродинамичната сила, която привежда в движение звуковата bobина, респ. трептящата система. Възникналата електродинамична сила F съответства точно на електрическия сигнал само ако

звуковата бобина непрекъснато обхваща един и същи по големина магнитен поток Φ :

$$F = Bl = ki, \quad (1.1)$$

където $k = Bl$ е коефициент на електромеханичната връзка, B — средната стойност на магнитната индукция за цялата височина на звуковата бобина, а l — дължината на проводника на звуковата бобина.

Мембраната е здраво залепена към звуковата бобина и трепти заедно с нея, при което създава в околното пространство звуково поле. Създаденото звуково поле ще съответства точно на електродинамичната сила F , а следователно и на въздействащия сигнал само при условие, че мембраната трепти като твърдо тяло и не проявява собствени резонанси. Трептилката центрова звуковата бобина в работната въздушна междина на магнитната система. Гънките служат за окачване на мембраната към корпуса на високоговорителя и заедно с трептилката осигуряват (позволяват) на трептящата система движение с една степен на свобода по направление на оста. В повечето случаи гънките и мембраната са един детайл. Корпусът е предназначен за закрепване на всички части на високоговорителя и за закрепване на самия високоговорител към устройството в което ще се вгражда. С изводите се осъществява електрическата връзка на източника на напрежение със звуковата бобина. На една от изводните клеми или в непосредствена близост до нея се означава поларитетът на високоговорителя (обикновено със знак $+$ или с цветна точка). Ако към изводите на високоговорителя се включи източник на постоянно напрежение, като към извода $+$ се свърже положителният му полюс, мембраната трябва да се придвижи напред по посока на излъчването. Поляритетът на високоговорителите има голямо значение в случаите, когато два или повече високоговорители създават общо звуково поле в един и същи честотен обхват.

От гледна точка на механиката трептящата система на високоговорителя в обхвата на ниските честоти е механична трептяща система с една степен на свобода и със следните съсредоточени параметри: r_M — активно механично съпротивление, дължащо се на активните механични загуби и излъчването; m_M — обща маса, включваща и масата на присъединения при трептенето въздух; c_M — гъвкавост на окачване на системата, определена от гъвкавостта на гънките и на трептилката.

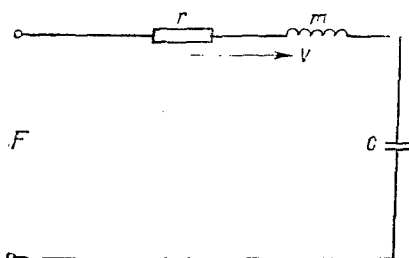
Като се използва електромеханичната аналогия сила — напрежение, еквивалентната електрическа схема на механичната треп-

тяща система на електродинамичния високоговорител се представя във вид, даден на фиг. 1.2. Механичният импеданс z_M се определя от зависимостта

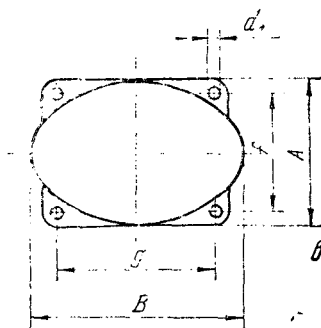
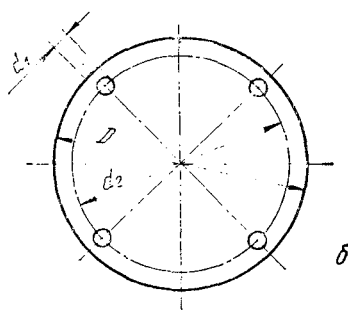
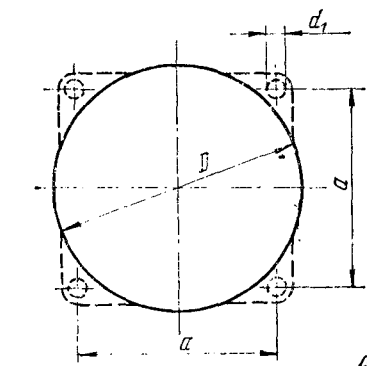
$$z_M = r_M + j\omega m_M + \frac{l}{j\omega c_M} \quad (1.2)$$

В книгата е възприето механичните и акустичните величини да се означават с малки латински букви, като символите за механичните величини носят индекс M , а символите за акустичните величини са без индекс. Електрическите величини са означени с главни латински букви.

При използване на високоговорителите за вграждане в озвучителни тела е необходимо да се знаят техните номинални и монтажни размери. С цел осъществяване на взаимозаменяемост на високоговорителите, произведени от различни фирми, Международната електротехническа комисия (МЕК) е утвърдила една поредица от номинални и монтажни размери. Тъй като документите на МЕК имат препоръчителен характер, не всички производители се съобразяват с тях. Нашата страна въведе в национален стандарт препоръчаните от МЕК номинални и монтажни



Фиг. 1.2



Фиг. 1.3

Таблица 1.1

№ по ред	Номинален диаметър D , mm	Монтажни размери, mm		Минимален размер на отвора d_1 , mm
		разстояние a (фиг. 1.3 а)	разстояние d_2 (фиг. 1.3 б)	
1	25 ₁	$(20 \pm 0,5)$	—	(3,2)
2	31,5 ₂	$(25 \pm 0,5)$	—	(3,2)
3	40 ₂	$(31,5 \pm 0,5)$	—	(3,2)
4	50 ₂	$40 \pm 0,5$	—	3,2
5	63 ₂	$50 \pm 0,5$	—	4,3
6	80 ₂	$63 \pm 0,5$	—	4,3
7	100 ₂	$80 \pm 0,5$	—	5,0
8	125 ₃	$100 \pm 0,5$	$114 \pm 0,5$	5,0
9	160 ₃	$125 \pm 0,5$	$148 \pm 0,5$	5,0
10	200 ₅	160 ± 1	$184 \pm 0,5$	5,5
11	250 ₅	200 ± 1	233 ± 1	5,5
12	315 ₅	250 ± 1	295 ± 1	6,5

размери. Те са дадени в таблица 1.1 за кръглите високоговорители, като размерите съответствуват на чертежите от фиг. 1.3 а и фиг. 1.3 б.

Размерите на овалните високоговорители са дадени в табл. 1.2, където означенията съответствуват на тези от фиг. 1.3 в.

Заградените в скоби размери не са задължителни, т. е. съответните високоговорители може да бъдат без отвори за закрепване.

Таблица 1.2

№ по ред	Номинални размери, mm		Монтажни размери, mm		Минимален диаметър на отвора, mm
	A	B	f	г	
1	20 ₁	31,5 ₂	$(16 \pm 0,5)$	$(25 \pm 0,5)$	(3,2)
2	25 ₁	40 ₂	$(20 \pm 0,5)$	$(31,5 \pm 0,5)$	(3,2)
3	31,5 ₂	50 ₂	$(25 \pm 0,5)$	$(40 \pm 0,5)$	(3,2)
4	40 ₂	63 ₂	$31,5 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$	3,2
5	50 ₂	80 ₂	$40 \pm 0,5$	$63 \pm 0,5$	4,3
6	63 ₂	100 ₂	$50 \pm 0,5$	$80 \pm 0,5$	4,3
7	80 ₂	125 ₃	$63 \pm 0,5$	$100 \pm 0,5$	5,0
8	100 ₂	160 ₃	$80 \pm 0,5$	$125 \pm 0,5$	5,0
9	125 ₃	200 ₅	$100 \pm 0,5$	160 ± 1	5,0
10	160 ₃	250 ₅	$125 \pm 0,5$	200 ± 1	5,5
11	200 ₅	315 ₅	160 ± 1	250 ± 1	5,5
12	250 ₅	400 ₅	200 ± 1	315 ± 1	6,5

Размерите на по-големите високоговорители би следвало да се получат чрез екстраполация, но това не е задължително. Размерите, дадени в табл. 1.1 и 1.2, се отнасят само за високоговорителите с конусна мембрана. Куполните и рупорните високоговорители може да бъдат с произволни размери на корпуса и произволни монтажни размери. Някои производители се стремят монтажните размери на куполните високоговорители да съвпадат с тези на конусните.

1.3 ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПАРАМЕТРИ НА ЕЛЕКТРОДИНАМИЧНИТЕ ВИСОКОГОВОРТЕЛИ

Високоговорителите като преобразуватели-двигатели имат електрически вход и акустичен изход. Входните параметри характеризират преобразувателя като консуматор на електрическа енергия и се наричат негови електрически характеристики. Те са следните:

Пълно входно електрическо съпротивление (входен електрически импеданс). Входният електрически импеданс $Z_{вх}$ на високоговорителите се определя като отношение на приложеното към високоговорителя електрическо напрежение $\dot{U}_{вх}$ и протичащия през него електрически ток $\dot{I}_{вх}$;

$$\dot{Z}_{вх} = \frac{\dot{U}_{вх}}{\dot{I}_{вх}} \quad (1.3)$$

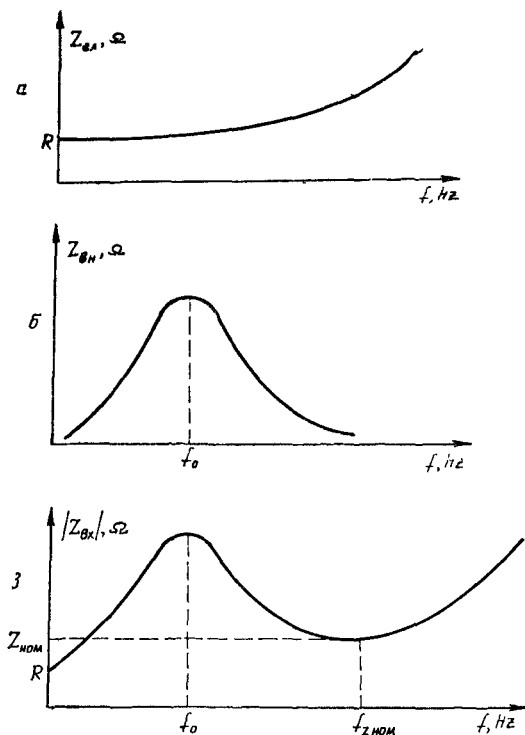
Зависимостта на входния импеданс от честотата се нарича импедансна характеристика на високоговорителя. Тя има твърде своеобразен характер, който трябва добре да се познава от конструкторите на озвучителни тела, тъй като с този импеданс се натоварва изходът на електрическите разделителни филтри. Специфичният ход на импедансната характеристика се дължи на факта, че входният импеданс е геометрична сума от два импеданса — електрическият импеданс $\dot{Z}_{ел}$ на неподвижната бобина и внесенения импеданс $\dot{Z}_{вн}$, който се дължи на движението на звуковата бобина в магнитното поле

$$\dot{Z}_{вх} = \dot{Z}_{ел} + \dot{Z}_{вн} \quad (1.4)$$

Електрическият импеданс $Z_{ел}$ на бобината е съставен от активното ѝ съпротивление R и собствената индуктивност L

$$\dot{Z}_{ел} = R + j\omega L \quad (1.5)$$

При високоговорителите R и L са, макар и в неголяма степен, честотно зависими — с увеличаване на честотата R нараства, а L намалява. Поради малката стойност на L за ниски честоти $Z_{eL} \approx R$. Честотната зависимост на Z_{eL} е дадена на фиг. 1.4 а.



Фиг. 1.4

Внесеният импеданс $\dot{Z}_{вн}$ се определя от зависимостта

$$Z_{вн} = \frac{B^2 l^2}{z_M} = \frac{B^2 l^2}{r_M + j\omega m_M + \frac{1}{j\omega c_M}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{вн}} + j\omega C_{вн} + \frac{1}{j\omega L_{вн}}}, \quad (1.6)$$

където

$$R_{вн} = \frac{B^2 l^2}{r_M}, \quad (1.7 a)$$

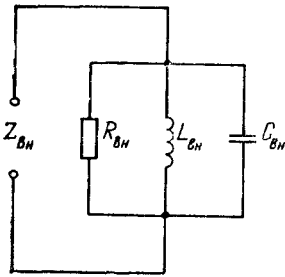
$$C_{вн} = \frac{m_M}{B^2 l^2}, \quad (1.7 б)$$

$$L_{вн} = c_M B^2 l^2 \quad (1.7 в)$$

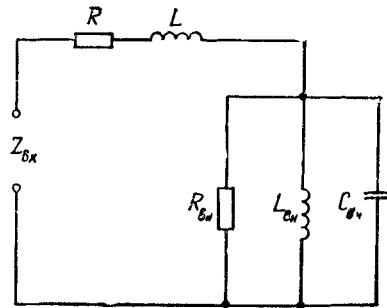
Електрическата схема, съответствуваща на (1.6), е дадена на фиг. 1.5. Тя е един паралелен трептящ кръг. Известно е, че неговият импеданс се изменя с честотата, както е показано на фиг. 1.4 б. От голямо значение в случая е фазовата разлика между напрежението и тока и нейната зависимост от честотата. От това се определя преобладаващият реактивен елемент, т. е. характерът на внесенния импеданс. В честотния обхват от 0 до f_0 фазата на тока закъснява спрямо тази на приложеното напрежение. Фазовата разлика е положителна и импедансът $Z_{вн}$ има индуктивен характер. За честотата f_0 настъпва паралелен резонанс и токът е във фаза с приложеното напрежение, фазовата им разлика е нула и $Z_{вн}$ има активен характер, при това $Z_{вн}$ добива своята максимална стойност

$$Z_{вн \max} = R_{вн} = \frac{(Bl)^2}{r_M}. \quad (1.8)$$

При f_0 настъпва резонанс, определен от механичните параметри на системата, и затова f_0 се нарича честота на основния механичен резонанс.



Фиг. 1.5



Фиг. 1.6

За по-високи честоти от f_0 токът по фаза изпреварва приложеното напрежение, фазовата им разлика е отрицателна, внесенният импеданс има капацитивен характер.

За входния импеданс на високоговорителя се получава

$$Z_{вх} = R + j\omega L + \frac{1}{\frac{1}{R_{вн}} + j\omega C_{вн} + \frac{1}{j\omega L_{вн}}}. \quad (1.9)$$

Електрическата схема, съответстваща на (1.9), е дадена на фиг. 1.6. От нея може да се проследи ходът на импедансната характеристика на високоговорителя, дадена на фиг. 1.4 в. В областта на ниските честоти $Z_{вх} \approx R$ и фазовата разлика между приложеното напрежение и протичащия ток е нула. С увеличаване на честотата до f_0 импедансът $Z_{вх}$ бързо нараства, като фазовата разлика и характерът на товара се определят от $Z_{вн}$, тъй като реактансът на индуктивността на бобината е все още малък. За f_0 входният импеданс на високоговорителя има активен характер, т. е. фазовата разлика е нула и става максимален.

$$Z_{вх \max} \approx R + R_{вн}. \quad (1.10)$$

С нарастване на честотата от f_0 до $f_{z \text{ ном}}$ входният импеданс намалява, като характерът му се определя от $Z_{вн}$, т. е. $Z_{вх}$ има капацитивен характер, токът изпреварва по фаза приложеното напрежение. В този обхват обаче реактансът на $Z_{ел}$ става съизмерим с внесенния капацитивен реактанс. При честота $f_{z \text{ ном}}$ двата реактанса стават равни и настъпва втори резонанс. Той се определя от индуктивността на звуквата бобина, която е електрическа величина, и внесените реактивни елементи, които се дължат на механичното трептене на подвижната система на високоговорителя. Поради това се нарича електромеханичен резонанс. Същественото обаче е, че при $f_{z \text{ ном}}$ входният импеданс на високоговорителя е активен, фазовата разлика между приложеното напрежение и породения от него ток е нула. При това входният импеданс в обхвата на възпроизвеждане е минимален

$$Z_{вх \min} \approx (1,15 \div 1,25) R \quad (1.11)$$

За по-високи от $f_{z \text{ ном}}$ честоти входният импеданс на високоговорителя непрекъснато нараства, като има индуктивен характер.

Номинален импеданс. Тази характеристика на високоговорителите се определя като минималната стойност на модула на пълното им електрическо съпротивление в честотния обхват над честотата на основния резонанс на високоговорителя. Стойностите на входния импеданс на високоговорителите, измерени за която и да е честота, не трябва да бъдат по-малки от 80% от номиналния импеданс.

От честотната характеристика на модула на входния импеданс на един електродинамичен високоговорител с директно излъчване, дадена на фиг. 1.4 в, се вижда, че входният импеданс в областта на резонансната честота на високоговорителя и в областта на

високите честоти е значително по-голям от номиналния му импеданс. Такава честотна характеристика на импеданса е твърде благоприятна за усилвателя. Само за сигнала с честота $f_{z \text{ ном}}$ консумираната от усилвателя мощност е равна на номиналната му (при условие, че номиналният импеданс на високоговорителя е равен на номиналния товар на усилвателя). За сигнали с други честоти мощността, която високоговорителят консумира от усилвателя, е по-малка от номиналната му мощност.

Съгласно международните препоръки в нашата страна са стандартизирани номиналните импеданси на произвежданите високоговорители — табл. 1.3.

Таблица 1.3

№ по ред	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинален импеданс, Ω	2	4	8	16	25	50	100	400	800

Почти всички производители са възприели този ред от номинални импеданси на високоговорителите.

Резонансна честота f_0 . Резонансната честота на високоговорителите по принцип не е електрически параметър, тъй като тя съответствува на състоянието на високоговорителя, при което е настъпил резонанс в механичната му трептяща система. Но за механичния резонанс се съди по големината на електрически величини — това е честотата, при която модулът на пълното входно електрическо съпротивление на високоговорителя получава своя максимум при възходящо изменение на честотата.

Резонансната честота f_0 зависи от параметрите на трептящата система на високоговорителя — масата m_M и гъвкавостта \mathcal{E}_M :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{m_M \mathcal{E}_M}} \quad (1.12)$$

Качествен фактор. Качественият фактор на електродинамичните високоговорители е число, характеризиращо загубите в него. За удобство в практиката са въведени три качествени фактора. Те се определят при резонансната честота f_0 на високоговорителя. При f_0 индуктивността L оказва незначително влияние и се пренебрегва, т. е. $L=0$.

Механичен качествен фактор $Q_{Mр}$. Той се определя от схемата на фиг. 1.6 при условие, че $R=0$ и е число, показващо

колко пъти реактивното механично съпротивление x_p на елементите на трептящата система при резонанс е по-голямо от съпротивлението r_M на активните механични загуби

$$Q_{Mp} = \omega_0 C_{\text{вн}} R_{\text{вн}} = \frac{\omega_0 m_M}{r_M} = \frac{1}{r_M} \sqrt{\frac{m_M}{c_M}}. \quad (1.13 \text{ а})$$

Електрически качествен фактор Q_{ep} . Той се определя от схемата на фиг. 1.6 при условие, че $R_{\text{вн}} = \infty$ и е число, показващо колко пъти реактивното механично съпротивление x_p на елементите на трептящата система при резонанс е по-голямо от активното съпротивление R на звуковата bobина, приведено към механично

$$Q_{ep} = \omega_0 C_{\text{вн}} R = \frac{\omega_0 m_M R}{B^2 l^2} = \frac{\omega_0 m_M}{\frac{B^2 l^2}{R}}. \quad (1.13 \text{ б})$$

Пълен качествен фактор Q_{Tp} . Той се определя от схемата на фиг. 1.6 при условие, че високоговорителят се захранва от източник с $R_i = 0$ и е число, показващо колко пъти реактивното механично съпротивление x_p на елементите на трептящата система при резонанс е по-голямо от общото съпротивление R_T на системата

$$Q_{Tp} = \omega_0 C_{\text{вн}} R_T = \omega_0 C_{\text{вн}} \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{вн}}}} = \frac{Q_{Mp} Q_{ep}}{Q_{Mp} + Q_{ep}}, \quad (1.13 \text{ в})$$

където

$$R_{Tp} = \frac{R R_{\text{вн}}}{R + R_{\text{вн}}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{вн}}}}.$$

Електрическа мощност P_{el} . Електрическата мощност на високоговорителя е еквивалентна на мощността, която се разсейва върху съпротивление, равно на модула на номиналния импеданс ($Z_{\text{ном}}$) на високоговорителя, при напрежение, равно на напрежението на входните клеми на високоговорителя. Тя се определя от израза

$$P_{el} = \frac{U_{\text{вх}}^2}{|Z_{\text{ном}}|}. \quad (1.14)$$

Паспортна мощност $P_{\text{пасп}}$. Паспортната мощност на високоговорителите характеризира тяхната механична здравина. Тя се определя от производителя в резултат на продължителни изпит-

вания с помощта на шумов сигнал, съответстващ по спектрална плътност на средната статистична плътност на една музикална или говорна картина. След продължително въздействие на шумовия сигнал (100 h) високоговорителят трябва да запази своите електрически качества и механична цялост и да не проявява ефекти на звънтене, хриптене и други, които пречат на нормалното му функциониране. Ефективната стойност на мощността на шумовия сигнал, която високоговорителят все още издържа, представява неговата паспортна мощност.

Номинална мощност $P_{ном}$. Номиналната мощност на високоговорителя се определя и обявява от производителя с оглед на предназначението му при експлоатацията. Този параметър е свързан с възможностите на електроакустичния преобразувател да възпроизвежда продължително време музика и говор. Номиналната мощност на високоговорителя се дефинира и като мощност на усилвателя, към който високоговорителят може да работи продължително време, без да настъпят в него електрически или механични повреди. В никакъв случай не бива да се смята, че номиналната мощност на един електроакустичен преобразувател представлява синусоидалната мощност, която той може да възпроизвежда продължително време.

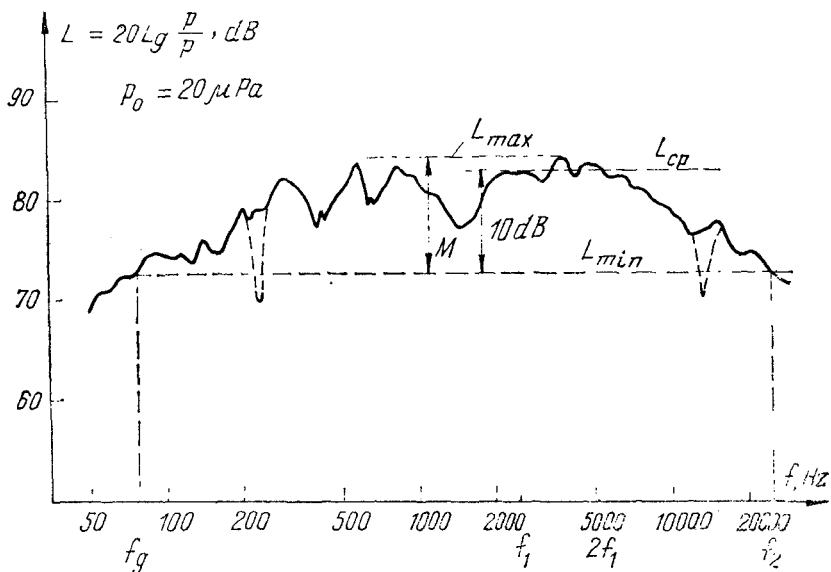
Максимална синусоидална мощност. Това е електрическата мощност на продължителен синусоидален сигнал с честота, съдържаща се в номиналния честотен обхват, която високоговорителят може да издържа продължително време, без да настъпят електрически или механични повреди.

Музикална мощност. Тя характеризира нискочестотните високоговорители. Определя се като максимална синусоидална мощност, която високоговорителят може да издържи за кратко време не повече от 0,2 s в частта на номиналния честотен обхват под 250 Hz. Параметърът музикална мощност се използва предимно при високоговорителите от Hi-Fi клас.

Работна мощност. Това е електрическата мощност, подадена на входа на високоговорителя, под действието на която той създава определено звуково налягане. Използува се главно при високоговорителите от Hi-Fi клас. Определя се (съгласно DIN 45500) като електрическа мощност, от която високоговорителят създава на 1 m средно звуково налягане 1,26 Pa в обхвата от 100 до 8000 Hz. Нивото му е 96 dB. Съгласно с препоръките на МЕК средното звуково налягане трябва да бъде 1 Pa (ниво 94 dB) при еднакви други условия.

1.4 ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ВИСОКОГОВОРИТЕЛИТЕ

Честотна характеристика на звуковото налягане (честотна характеристика). Тя представлява зависимостта на създаваното от високоговорителя звуково налягане от честотата в точка, намираща се на определено разстояние от работния му център, при поддържане на постоянно напрежение на входните му клемми. Обикновено точката, в която се измерва звуковото налягане, се намира върху работната ос на високоговорителя, но за определяне насочеността на излъчване на високоговорителите се измерва звуковото налягане като функция на честотата по направление, склучващо определен ъгъл с работната ос. На фиг. 1.7 е показана примерна честотна характеристика на високоговорител.



Фиг. 1.7

Ефективен честотен обхват на възпроизвеждане. Честотният обхват, в който високоговорителят ефективно преобразува електрическата енергия в енергия на звуковото поле, се нарича ефективен обхват на възпроизвеждане. Той се определя като обхват на честотната характеристика на високоговорителя, в кой-

то звуковото налягане се понижава с не повече от една определена стойност по отношение на средната стойност на звуковото налягане в даден честотен обхват. За високоговорителите за обща употреба даденият честотен обхват е с широчина една октава, в която средната стойност на звуковото налягане е най-голяма. За високоговорителите от Hi-Fi клас е честотният обхват от 100 до 8000 Hz. Допустимата стойност на понижаване на звуковото налягане за високоговорителите за обща употреба е 10—12 dB, а за високоговорителите от Hi-Fi клас — 8 dB.

Долна гранична честота. Това е най-ниската честота на ефективния честотен обхват

Горна гранична честота. Това е най-високата честота от ефективния честотен обхват.

На фиг. 1.7 са определени долната гранична честота f_d , горната гранична честота f_z и ефективният честотен обхват на възпроизвеждане. За база е приета средната стойност на звуковото налягане в октавата с най-голяма чувствителност при допустима стойност на понижаване на звуковото налягане за граничните честоти 10 dB.

Номинален честотен обхват — определя се от производителя и представлява обхватът от честотната характеристика, в който производителят гарантира обявените параметри на изделието. Той е част от ефективния честотен обхват на възпроизвеждане или най-много съвпада с него, но в никакъв случай не може да бъде по-широк.

Неравномерност на честотната характеристика M. Разликата между нивата на максималното и минималното звуково налягане в даден честотен обхват се нарича неравномерност на честотната характеристика в този обхват и се изразява в децибели (dB).

На фиг. 1.7 са отбелязани нивото L_{max} на максималното звуково налягане P_{max} , нивото L_{min} на минималното звуково налягане P_{min} и неравномерността на честотната характеристика M .

Характеристична чувствителност A_x . Този параметър показва ефективността на преобразуване на електрическата енергия в енергия на звуковото поле. Във връзка с характеристичната чувствителност трябва да се определи и понятието средно звуково налягане P_{cp} , което е средноквадратичната стойност на звуковото налягане, създавано от високоговорителя за определен честотен обхват в дадена точка на свободното звуково поле. Определя се с израза

$$P_{cp} = \sqrt{\frac{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots + p_n^2}{n}}, \quad (1.15)$$

където p_1, \dots, p_n са звуковите налягания за определени честоти, n — броят на честотите от даден честотен обхват, за които е измерено звуковото налягане.

Усредняването се извършва по стойностите на звуковото налягане за честотите от стандартната честотна поредица [19], участващи в честотния обхват, за който се определя средното звуково налягане. Средното звуково налягане се определя в P_a , а неговото ниво спрямо налягането $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ — в децибели (dB).

Чувствителността A се определя като отношение на средното звуково налягане p_{cp} , създавано от високоговорителя за определен честотен обхват по посока на работната му ос на разстояние 1 m от работния му център, към квадратен корен от стойността на подаваната електрическа мощност

$$A = \frac{p_{cp}}{\sqrt{P_{el}}}, \quad \frac{P_a}{\sqrt{W}}. \quad (1.16)$$

Характеристика на насоченост на високоговорителите е зависимостта на звуковото налягане, създавано от високоговорителя в дадена точка B от ъгъла θ , заключен между работната му ос и посоката към точката B .

Характеристиките на насоченост зависят от честотата и затова се определят за поредица честоти, равномерно разпределени в номиналния честотен обхват, например през една октава. За високите честоти високоговорителите излъчват твърде насочено.

Акустична мощност е пълната акустична енергия, излъчена от високоговорители за единица време. Измерва се във ватове.

Коефициент на полезно действие η_a е отношението между излъчената от високоговорителя акустична мощност P_a и подаваната електрическа мощност P_{el} за дадена честота f :

$$\eta_a = \frac{P_a}{P_{el}}. \quad (1.17)$$

Нелинейни изкривявания. Под това понятие се разбира появянето на компоненти в излъчвания от високоговорителя сигнал, които отсъствуват в спектъра на входния електрически сигнал и се обуславят от нелинейността на високоговорителя. Звуковете, дължащи се на разтрептяване на шасито или на други елементи на високоговорителя, които не са предназначени да излъчват, не трябва да се категоризират като нелинейни изкривявания. Те са звънтене.

Нелинейните изкривявания се оценяват посредством коефициента на нелинейни изкривявания, който представлява отношение

между спектралните компоненти на излъчвания от високоговорителя сигнал, отсъстващи в спектъра на входния електрически сигнал, обусловени от нелинейността на високоговорителя, към общия изходен сигнал. Съществуват различни начини за количествена оценка на нелинейните свойства на високоговорителите. За сега най-широко разпространение е получил методът на хармоничните изкривявания.

Хармонично изкривяване се нарича нелинейното изкривяване, което се получава при подаване на високоговорителя на синусоидален електрически сигнал с една определена честота f . Коэффициент на хармонични изкривявания от n -ти ред d_{hn} се нарича отношението между звуковото налягане p_n с честотата nf и общото звуково налягане p , които се получават при подаване на високоговорителя на сигнал с определена електрическа мощност $P_{e.1}$ и честота f :

$$d_{hn} = \frac{p_n}{p} \quad (1.18)$$

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

$$d_h = \sqrt{d'_{n2} + d_{n3}^2 + \dots + d_{nn}^2} \quad (1.19)$$

С достатъчна за практиката точност d_h за високоговорителите може да се определи само чрез коефициентите на хармонични изкривявания от втори и трети ред.

Съществува и друг метод за оценка на нелинейността на високоговорителите — посредством интермодуляционните изкривявания. Интермодуляционно изкривяване се нарича нелинейното изкривяване, което се получава при подаване на високоговорителя на два синусоидални електрически сигнала с честота f_1 и f_2 , едната от които (f_1) е много по ниска от другата (f_2). Коефициентът на интермодуляционните изкривявания от n -ти ред d_{in} представлява отношението между стойностите на спектралните компоненти на създаването от високоговорителя звуково налягане с честота $f_2 \pm (n-1)f_1$ за $n > 1$ и на звуковото налягане с честота f_2 .

Сумарният коефициент на интермодуляционни изкривявания за високоговорителите се определя чрез d_{i2} и d_{i3} :

$$d_i = \sqrt{d_{i2}^2 + d_{i3}^2} \quad (1.20)$$

Трябва да се знае, че между хармоничните и интермодуляционните изкривявания винаги съществува някаква зависимост, като

в някои случаи тя може да се представи с аналитичен израз, а в други не може. Високоговорител, който има голям коефициент на хармонични изкривявания, ще има и голям коефициент на интермодуляционни изкривявания и обратно.

Оценяването на нелинейните свойства на високоговорителите чрез коефициента на интермодуляционни изкривявания не е достатъчно сигурно. При високоговорителите е достатъчно да се знае големината на коефициента на хармонични изкривявания в номиналния честотен обхват или дори в част от него, за да се оцени тяхната нелинейност.

Преходни процеси. Те са свързани с инертността на високоговорителите, като електромеханични преобразуватели. Ако даден високоговорител излъчва сигнал с определена честота и внезапно се прекрати подаването на електрическа енергия, високоговорителят ще продължи да излъчва още известно време. Именно това време представлява времето или продължителността на преходните процеси. При включване на високоговорителя към даден електрически сигнал той постепенно започва да излъчва, като след известно време, което е също време на преходните процеси, достига установения си режим.

Продължителността на преходните процеси на високоговорителите е много важна тяхна характеристика. При възпроизвеждане на музика или говор високоговорителят е подложен на непрекъснати промени на амплитудата и честотния спектър на подавания сигнал. Може да се каже, че високоговорителят нормално функционира в преходен режим. Ако преходните процеси на даден високоговорител са много продължителни, той ще възпроизвежда много лошо музикалните и говорни картини независимо от това, че останалите му параметри могат да бъдат много добри. Не бива да се забравя, че параметрите на високоговорителите се определят при установен режим, след като преходните процеси са приключени. Колкото по-кратки са преходните процеси на високоговорителите, толкова по-естествено ще звучи възпроизвежданата от него музика или говор.

1.5. ВИДОВЕ ЕЛЕКТРОДИНАМИЧНИ ВИСОКОГОВОРТЕЛИ

В зависимост от това дали високоговорителите са предназначени да възпроизвеждат самостоятелно целия звуков спектър, който съществува като електрически сигнал на изхода на дадено радиотехническо устройство, или само ограничена част от не-

го, те биват: широколентови, нискочестотни, средночестотни и високочестотни.

Широколентови високоговорители. Основните изисквания към тях са: висока чувствителност, широк ефективен честотен обхват на възпроизвеждане, ниска цена, технологично високопроизводително производство и сравнително малки нелинейни изкривявания и неравномерност на честотната характеристика.

Тези високоговорители се конструират на базата на компромис между изискването за висока чувствителност и изискването за малка неравномерност на честотната характеристика, малки нелинейни изкривявания и кратки преходни процеси. Компромисът е в полза на чувствителността, като останалите параметри са в рамките на допустимите норми за нормално възпроизвеждане. Освен това стесняването на номиналния честотен обхват се осъществява едновременно чрез увеличаване на долната гранична честота и намаляване на горната гранична честота, така че при възпроизвеждане да не се подчертават нито ниските, нито високите честоти.

Нискочестотни високоговорители. Те трябва да възпроизвеждат сигнали с честота до 2000—4000 Hz. В случай че работят съвместно и със средночестотен високоговорител, достатъчно е да възпроизвеждат сигнали с честота до 500—800 Hz. Следователно те са освободени от изискването да възпроизвеждат ефективно високите честоти, а в някои случаи — и средните честоти. Към тях се завишават изискванията за ефективно възпроизвеждане на ниските честоти.

Разделянето на честотния спектър се реализира предимно в апаратура от Hi-Fi клас. Този факт определя и останалите изисквания към нискочестотните високоговорители — малки нелинейни изкривявания, малка неравномерност на честотната характеристика, кратки преходни процеси, ненасочено излъчване. Характеристичната чувствителност не е от основните показатели на високоговорителя, тъй като необходимото звуково налягане се създава чрез преобразуването на по-голяма електрическа мощност. Това е една от причините нискочестотните високоговорители да се характеризират с голяма паспортна или номинална мощност. Големите мощности са продиктувани и от изискването за неизкривено възпроизвеждане на звукови картини с голям динамичен обхват.

Конструкцията на високоговорителя трябва да позволява голяма амплитуда на подвижната му система, без да възникват нелинейни изкривявания. Ето защо е необходимо гъвкавостта на окачване да остава постоянна при значителни отклонения от рав-

новесното положение. Това се реализира, като трептилката се конструира със сравнително голям диаметър, а гънките на мембраната имат сравнително голяма повърхност. Опасността от излъчване на гънките се избягва, като те се изработват от материал с големи вътрешни загуби като каучукова смес или гумиран плат. Добър резултат се получава при използването на микропореста каучукова смес. Звуквата бобина трябва да бъде значително по-висока от височината на работната въздушна междина, с което се избягват нелинейните изкривявания при големите амплитуди. Проводникът на звуквата бобина е със сравнително голям диаметър, за да издържа големите електрически натоварвания, да не се разрушава при консумирането на голяма електрическа мощност. Навива се върху алуминиево фолио за по-добро охлаждане.

За по-добро възпроизвеждане на ниските честоти е необходимо площта на мембраната да бъде голяма, но това се ограничава от размерите на високоговорителя. Самата мембрана трябва да бъде достатъчно здрава, за да не се огъва под действието на значителни електродинамични сили. С цел увеличаване механичната здравина и вътрешните загуби напоследък в целулозните смеси за мембрани, на нискочестотни високоговорители се поставят различни примеси.

Работният магнитен поток на нискочестотните високоговорители трябва да бъде достатъчно голям, за да се получат кратки преходни процеси. Поради това магнитните им системи са големи и масата им достига до 4—5 kg.

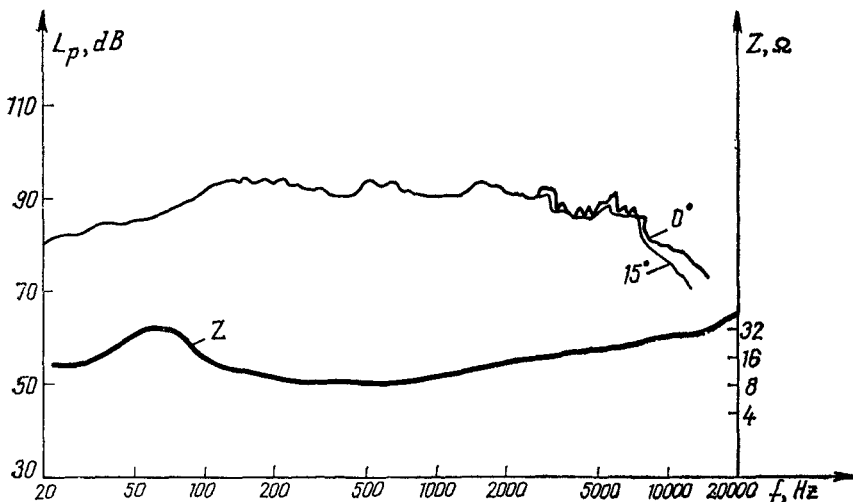
Един от рекламните параметри е големината на работния магнитен поток — колкото е по-голям, толкова по-високо се оценява нискочестотният високоговорител.

Нашата промишленост произвежда широка гама от нискочестотни високоговорители, използвани в различни озвучителни тела и позволяващи да се изработят висококачествени акустични системи в любителски условия.

Нискочестотният високоговорител тип ВКН0 832 е с номинален диаметър 125 mm. Паспортната му мощност е 20 W, номиналният му импеданс — 8 Ω , а резонансната му честота е не по-висока от 60 Hz. Произвежда се с оксидна магнитна система, като номиналният диаметър на звуквата му бобина е 25 mm. Гънките на високоговорител тип ВКН0 832 са от гумиран плат, което е предпоставка за малки нелинейни изкривявания. На фиг. 1.8 са дадени честотната му характеристика по оста 0° и на 15° от нея, снети със синусоидален сигнал в свободно звуково поле (безехова камера) на разстояние 1 m при електрическа

мощност 1 W и импедансната му характеристика. Произвежда се високоговорител със същите параметри и размери, но с номинален импеданс 4 Ω, чието типово означение е ВКН0822.

Напоследък освен посочените параметри на нискочестотните



Фиг. 1.8

високоговорители се обявяват и редица други параметри, определящи механичната трептяща система. Тези параметри се отнасят до елементи, които взаимодействуват с акустичните елементи на оформянето на озвучителните тела. Те са необходими за съвременното проектиране на озвучителни тела. За нискочестотните високоговорители, включително и за тип ВКН0832, ще бъдат дадени и тези параметри, за да послужат при конкретното проектиране на озвучителни тела с дадените високоговорители.

Динамичната маса m на трептящата система на високоговорител тип ВКН0832, включваща масата на звуковата бобина, масата на мембраната, част от масата на гънката и трептилката и масата на присъединения при трептенето въздух е 8 g. При резонансна честота $f_0 = 60$ Hz за пълна гъвкавост c на трептящата система се получава

$$c = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 m} = 0,88 \cdot 10^{-3} \text{ m.N}^{-1}.$$

Еквивалентната звукоизлъчваща повърхност S_e на високоговорител тип ВКН0832 е

$$S_e = \frac{\pi}{4} D_e^2 = 7,22 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2,$$

където $D_e = 96 \text{ mm}$ е еквивалентен диаметър на звукоизлъчването.

Еквивалентният обем V_c , който има същата гъвкавост c , като се възбужда през отвор с площ S_e , е

$$V_c = c \psi p_s S_e^2 = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

или

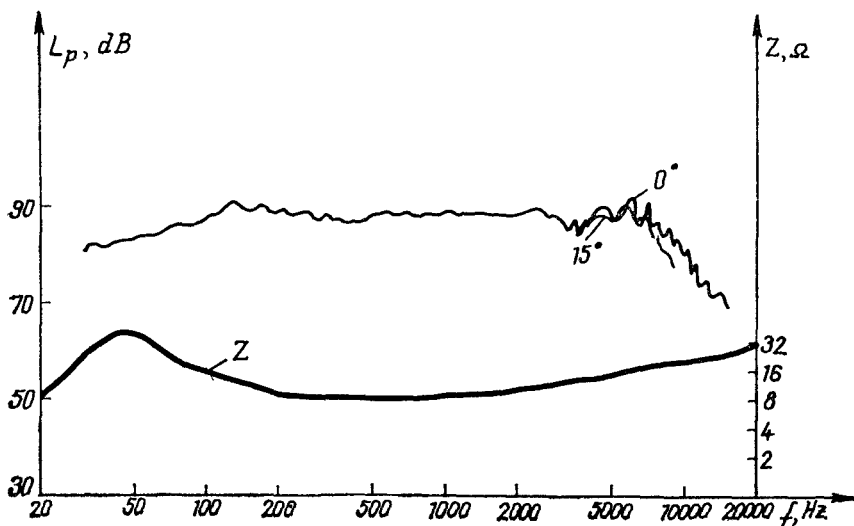
$$V_c = 6,2 \text{ dm}^3 \text{ (литра),}$$

където $p_s = 10^5 \text{ Pa}$ е статичното налягане на въздуха,

ψ — константа, като за въздуха $\psi = 1,4$.

За нискочестотните високоговорители се определят и три качествени фактора, които за високоговорител тип ВКН0832 са:

механичен качествен фактор $Q_{Mp} = 2,6$;



Фиг. 1.9

електрически качествен фактор $Q_{ep} = 0,5$;

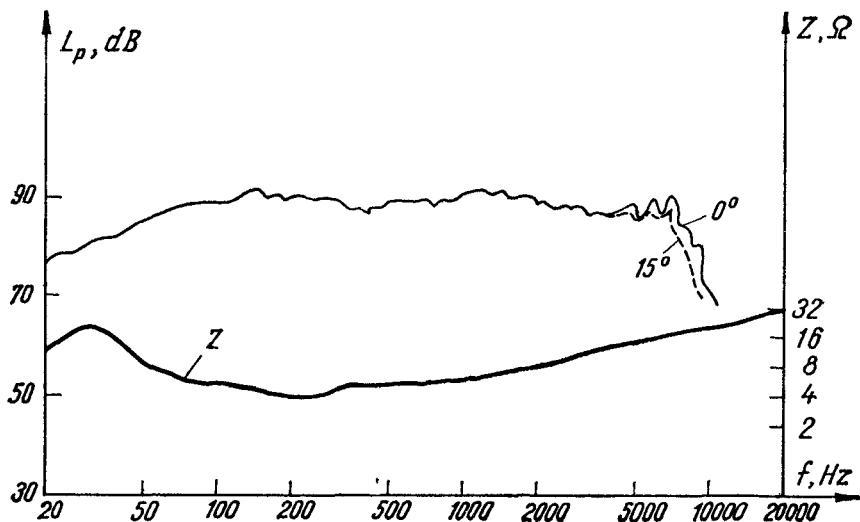
пълен качествен фактор $Q_{Tp} = 0,42$.

Нискочестотният високоговорител тип ВКН0932 е с номинален диаметър 160 mm. Неговата паспортна мощност е 20 W, но-

миналният му импеданс е 8Ω , а резонансната му честота е 50 Hz . Номиналният диаметър на звуковата му bobина е 25 mm . Гънките на мембраната се изработват от гумиран плат, което допринася за малките нелинейни изкривявания, внасяни от високоговорителя. Магнитната му система е с оксиден магнит. На фиг. 1.9 са дадени честотните характеристики на високоговорител тип ВКН0932 по оста 0° и на 15° от нея, снети при същите условия, както за високоговорител тип ВКН0832 и импедансната му характеристика. Високоговорител със същите параметри и размери, но с номинален импеданс 4Ω се произвежда с типово означение ВКН0922.

Динамичната маса m на третията система на този високоговорител е $10,5 \text{ g}$, а гъвкавостта му $c = 0,95 \cdot 10^{-3} \text{ mN}^{-1}$.

Еквивалентната звукоизлъчваща повърхност е $S_e = 11,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Еквивалентният обем е $V_c = 18,3 \text{ dm}^3$.



Фиг. 1.10

Трите качествени фактора са: $Q_{Mp} = 2,68$; $Q_{Tp} = 0,65$; $Q_{ep} = 0,523$.

Нискочестотният високоговорител тип ВВК201Б4 е с номинален диаметър 200 mm . Паспортната му мощност е 30 W , а

номиналният му импеданс — 4 Ω . Резонансната честота на високоговорителя е 30 Hz, а чувствителността му — 0,6 PaW^{-0.5}. Звуквата му бобина се изработва от меден проводник с диаметър 0,23 mm, навит върху алуминиев цилиндър с диаметър 26 mm. Окачването на подвижната система на високоговорителя към шасито се осъществява с гънки от гумиран плат с трионообразна форма, осигуряващи ниската му резонансна честота и значителни механични загуби. Магнитната му система е с оксиден магнит, като широчината на работната въздушна междина е 1,3 mm, с което се постига по-голямо електрическо натоварване на високоговорителя без опасност от динамично разцентроване. На фиг. 1.10 е дадена импедансната характеристика на ВВК201Б4 и честотната му характеристика по оста 0° и на 15° от нея.

Динамичната маса на трептящата система на високоговорител тип ВВК201Б4 е 18 g, а гъвкавостта му $c=1,54 \cdot 10^{-3} \text{ mN}^{-1}$.

Еквивалентният диаметър на звукоизлъчваме е $D_e=160 \text{ mm}$, а еквивалентната звукоизлъчваща повърхност $S_e=2,02 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$.

Еквивалентният обем е $V_c=87 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3=87 \text{ dm}^3$.

Качествените фактори на високоговорителя са: $Q_{Mp}=2,80$; $Q_{ep}=0,62$; $Q_{Tp}=0,51$.

Произвежда се и високоговорител с идентични параметри, но с номинален импеданс 8 Ω , чието типово означение е ВВК 201 Б8.

Нискочестотният високоговорител тип ВКН 1031 е с номинален диаметър 200 mm. Паспортната му мощност е 40 W, резонансната му честота — 28 Hz, а номиналният му импеданс — 8 Ω . Звуквата му бобина е с номинален диаметър 37 mm и се изработва от кръгъл меден проводник. Трептящата система се окачва към шасито с гънки от гумиран плат с напречно сечение полукръг. Използува се магнитна система с лят магнит от сплав *конил 5*, която осигурява много голям магнитен поток в работната въздушна междина — 1,3 $\cdot 10^{-3} \text{ Wb}$. На фиг. 1.11 са дадени импедансната и честотните му характеристики, аналогични с тези на другите разгледани нискочестотни високоговорители.

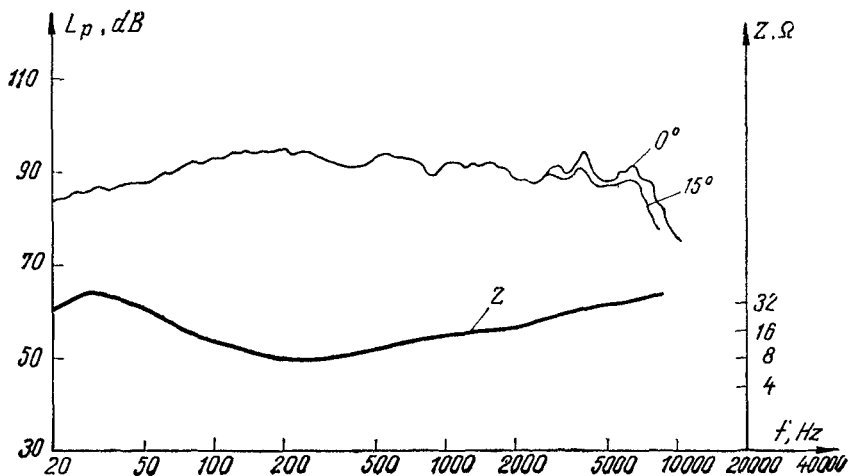
Динамичната маса на високоговорител тип ВКН 1031 е 22 g, а пълната му гъвкавост $c=1,45 \cdot 10^{-3} \text{ mN}^{-1}$.

Еквивалентният диаметър на звукоизлъчваме е $D_e=150 \text{ mm}$, еквивалентната звукоизлъчваща повърхност $S_e=17,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, а еквивалентният обем $V_c=64 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3=64 \text{ dm}^3$.

Съответните качествени фактори са: $Q_{Mp}=2,78$; $Q_{ep}=0,41$; $Q_{Tp}=0,358$.

Нискочестотният високоговорител тип ВКН 1231 е с номинален диаметър 315 mm. Паспортната му мощност е 40 W, резонансната му честота — 25 Hz, а номиналният му импеданс — 8 Ω .

Звуковата му бобина е с номинален диаметър 37 mm. Окачването на трептящата система към шасито се осъществява с гънки от гумиран плат. Магнитната система е с лят магнит от сплав *консил 5* и осигурява магнитен поток $1,3 \cdot 10^{-3}$ Wb в работната



Фиг. 1-11

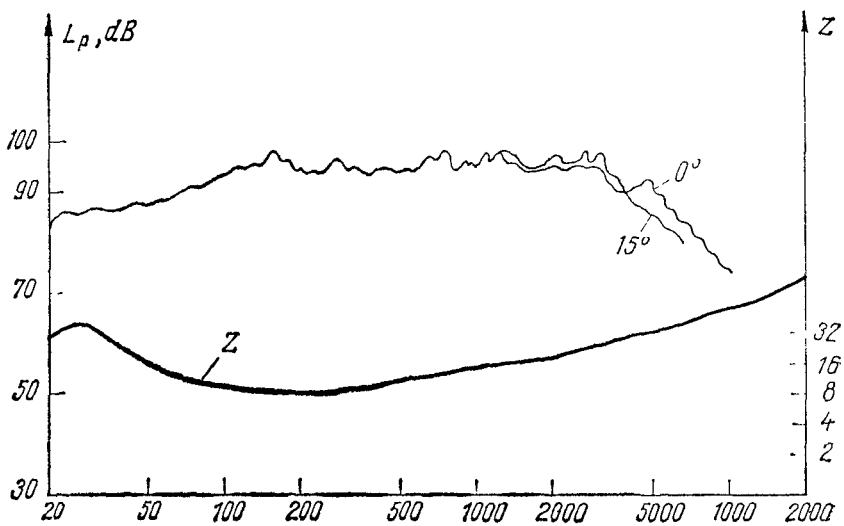
въздушна междина. На фиг. 1.12 са дадени импедансната и честотните му характеристики.

Динамичната маса на високоговорителя е $m=36$ g, пълната му гъвкавост $s=1,11 \cdot 10^{-3}$ mN⁻¹, а еквивалентната звукоизлъчваща повърхност $S_e=49 \cdot 10^{-3}$ m².

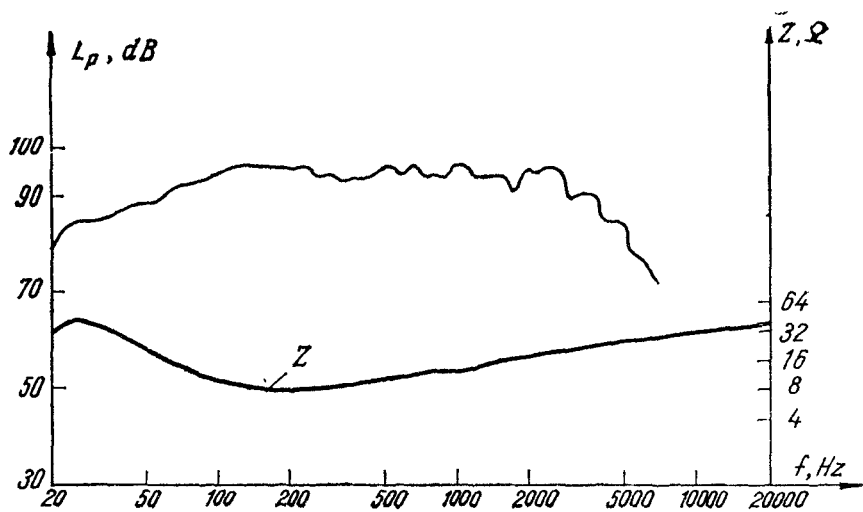
Еквивалентният обем $V_c=380$ dm³.

Качествените фактори са: $Q_{Mp}=2,40$; $Q_{ep}=0,45$; $Q_{Tp}=0,38$.

Нисочестотният високоговорител тип ВКН1233 е с номинален диаметър 315 mm. Той е модернизиран вариант на ВКН1231. Паспортната му мощност е 80 W, резонансната му честота 25 Hz, а номиналният му импеданс — 8 Ω. Звуковата бобина е с номинален диаметър 52 mm. Окачването на трептящата система към шасито се осъществява с гънки от гумиран плат с полукръгла форма. Магнитната система е със същия магнит като ВКН1231, но магнитният поток в работната въздушна междина е увеличен на $2,1 \cdot 10^{-3}$ Wb. Честотната и импедансната характеристика на високоговорителя са дадени на фиг.1.13.



Фиг. 1.12

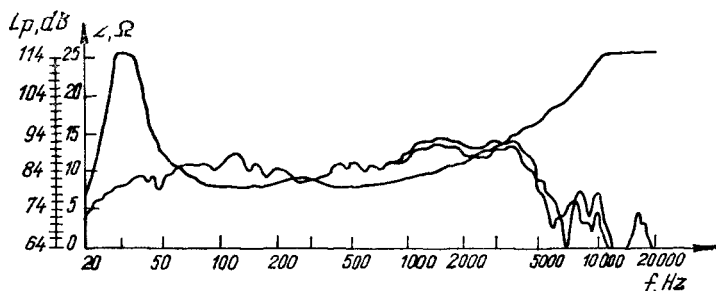


Фиг. 1.13

Динамичната маса е $m=44$ g, пълната гъвкавост $c=0,92 \cdot 10^{-3} \text{mN}^{-1}$ и звукоизлъчващата повърхност $S_e=49 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$.

Еквивалентният обем е $V_c=310 \text{dm}^3$.

Качествените фактори са: $Q_{Mp}=2,00$; $Q_{ep}=0,42$; $Q_{Tp}=0,347$.



Фиг. 1.14

За сравнение ще бъдат посочени данни за някои високоговорители, произведени от други европейски фирми.

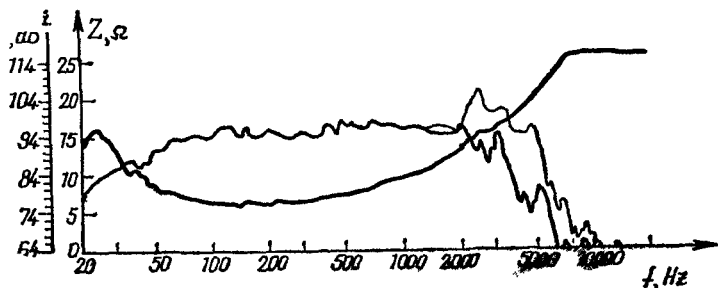
Нискочестотен високоговорител тип HD20B25HC9 на фирмата Audax—Франция.

Номиналният му диаметър е 200 mm, паспортната му мощност 25 W, резонансната му честота — 27 ± 3 Hz, а номиналният импеданс — 8 Ω . Импедансната и честотната характеристики на високоговорителя са дадени на фиг. 1.14. Останалите параметри са: динамична маса — 20,9 g; гъвкавост — $1,7 \cdot 10^{-3} \text{mN}^{-1}$; еквивалентен диаметър на звукоизлъчване — 0,160 m; еквивалентна звукоизлъчваща повърхност — 0,02 m^2 ; $Q_{Mp}=4,21$; $Q_{ep}=0,53$; $Q_{Tp}=0,47$; индукция в работната въздушна междина — 1,53 T; магнитен поток — 0,49 mWb; чувствителност в обхвата 125 — 1000 Hz — 0,5 $\text{PaW}^{-0,5}$; маса на високоговорителя — 1,45 kg.

Нискочестотен високоговорител тип HD30P45 на фирмата Audax — Франция. Номинален диаметър — 321 mm, паспортна мощност — 90 W, резонансна честота — 17 ± 3 Hz, номинален импеданс — 8 Ω . Импедансната и честотната му характеристики са дадени на фиг. 1.15. Останалите параметри са: динамична маса — 44,84 g; гъвкавост — $1,8 \cdot 10^{-3} \text{mN}^{-1}$; еквивалентен диаметър на звукоизлъчването — 0,26 m; еквивалентна звукоизлъчваща повърхност — 0,053 m^2 ; механичен качествен фактор — 1,62; електрически качествен фактор — 0,27; пълен качествен фактор — 0,23; индукция в работната въздушна междина — 1,26 T; магнитен поток — 1,1 mWb;

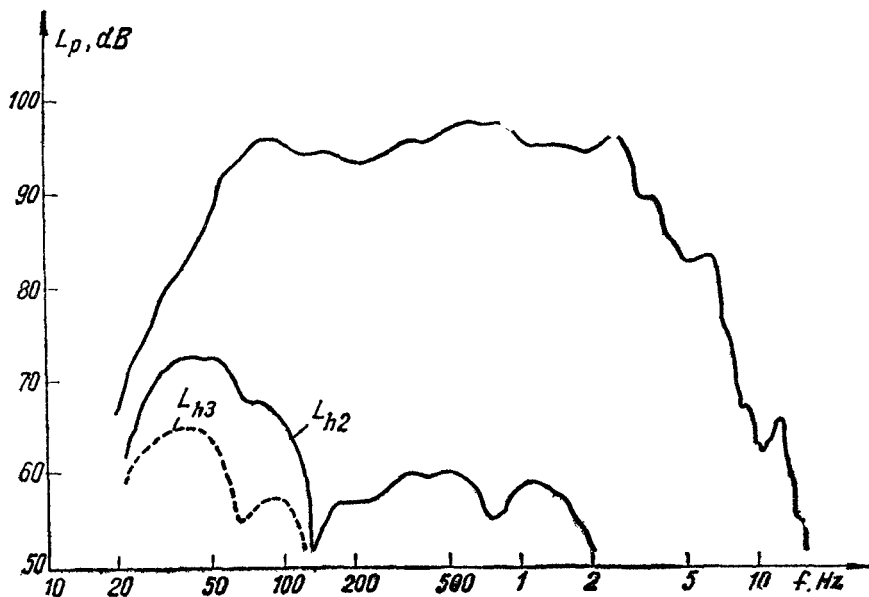
чувствителност в обхвата 125 — 1000 Hz — $1,26 \text{ PaW}^{-0,5}$; маса на високоговорителя — 2,9 kg.

Нискочестотен високоговорител тип AD80603/W4 на фирмата MBLE — Белгия. Номиналният му диаметър е 204 mm, пас-



Фиг. 1.15

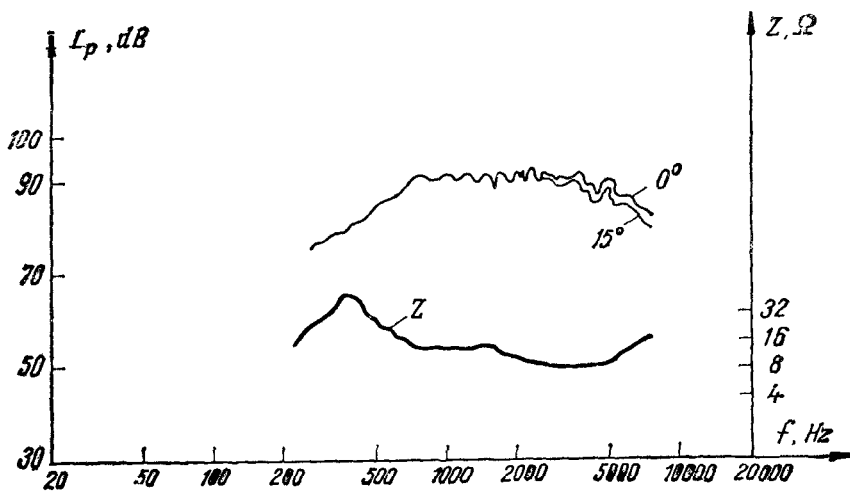
портната мощност в затворен обем 80 dm^3 — 50 W, резонансна честота — 36 Hz, номинален импеданс — 4 Ω. На фиг.1.16 е дадена честотната характеристика с хармонияците. Други параметри, кои-



Фиг. 1.16

то фирмата обявява: динамична маса — 18 g; гъвкавост — $1,16 \cdot 10^{-3} \text{ mN}^{-1}$; индукция в работната въздушна междина — 0,64 T; диаметър на звуковата бобина — 25 mm; маса — 0,77 kg.

Средночестотни високоговорители. Обикновено средночес-



Фиг. 1.17

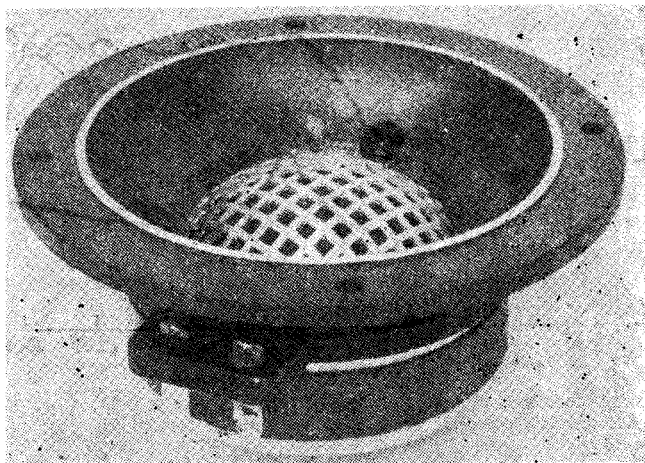
тотните високоговорители трябва да възпроизвеждат сигналите от честотния обхват 500 — 5000 Hz. Ако се има пред вид само това условие, почти всеки високоговорител за обща употреба може да го удовлетвори. Но това не е достатъчно. Неравномерността на честотната характеристика на средночестотните високоговорители не трябва да превишава $\pm 4 \text{ dB}$ спрямо средното ниво. Изискванията за малки нелинейни изкривявания и кратки преходни процеси са също високи. Това налага конструирането и производството на специални средночестотни високоговорители, които се изпълняват в три основни разновидности — конусни, куполни и рупорни.

Нашата промишленост произвежда два типа средночестотни куполни високоговорители — ВКС5231 и ВКС2531.

Основните електроакустични показатели на *високоговорител тип ВКС5231* са: паспортна мощност — 20 W; номинален честотен обхват — от 630 до 5000 Hz; характеристична чувствителност — $0,8 \text{ PaW}^{-0,5}$; неравномерност на честотната характеристика — не по-

вече от 8 dB; номинален импеданс — 8 Ω . На фиг. 1.17 са показани импедансната и честотната му характеристика при 1 W на 1m по оста (крива 0) и на 15° от оста (крива 15°).

Високоговорителят тип ВКС2531 има следните показатели:

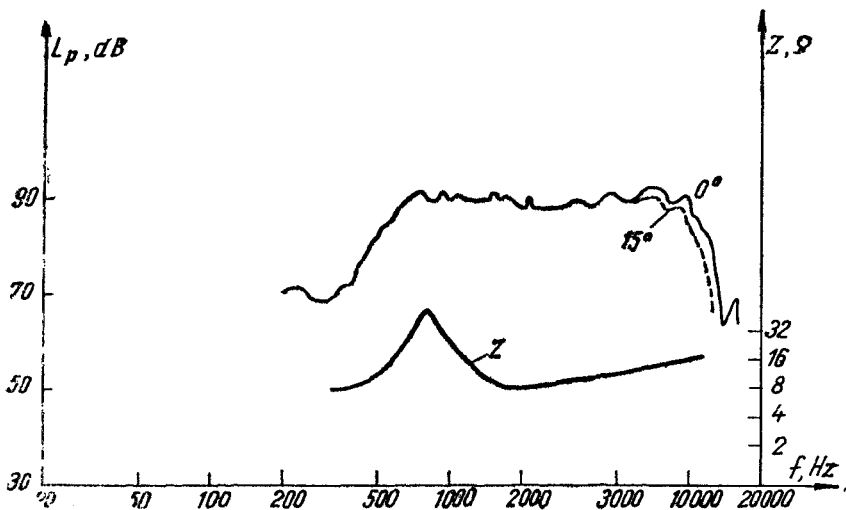


Фиг. 1.18

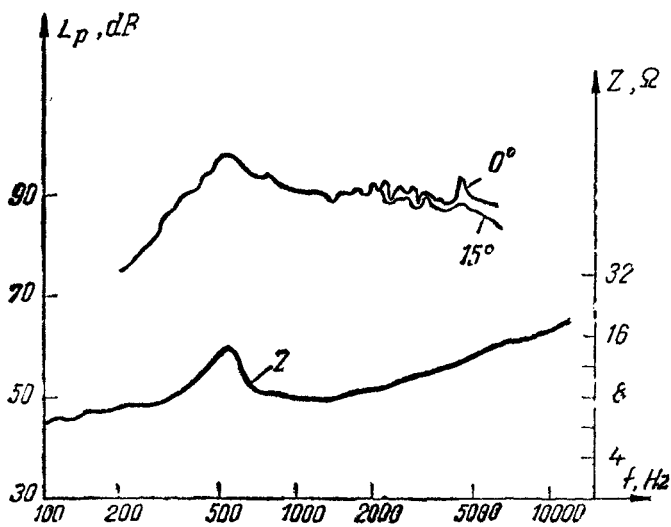
паспортна мощност — 20 W; номинален импеданс — 8 Ω ; номинален честотен обхват — от 630 до 8000 Hz; неравномерност на честотната характеристика — не по-голяма от 8 dB; характеристична чувствителност — не по-малка от 0,5 PaW^{-0.5}; коефициент на хармонични изкривявания — по малък от допустимите стойности за високоговорители от Hi-Fi клас. На фиг. 1.18 е даден външният вид на високоговорителя, а на фиг. 1.19 — импедансната и честотната му характеристики.

Средночестотният конусен високоговорител тип ВКС0731 е с номинален диаметър 100 mm. Основните му показатели са: паспортна мощност 20 W; номинален импеданс — 8 Ω ; номинален честотен обхват — от 800 до 5000 Hz; неравномерност на честотната характеристика — не по-голяма от 10 dB; характеристична чувствителност — 0,5 PaW^{-0.5}. На фиг. 1.20 са дадени импедансната и честотната му характеристики.

Средночестотният конусен високоговорител тип ВКС138Б8 има следните показатели: паспортна мощност — 20 W; номинален

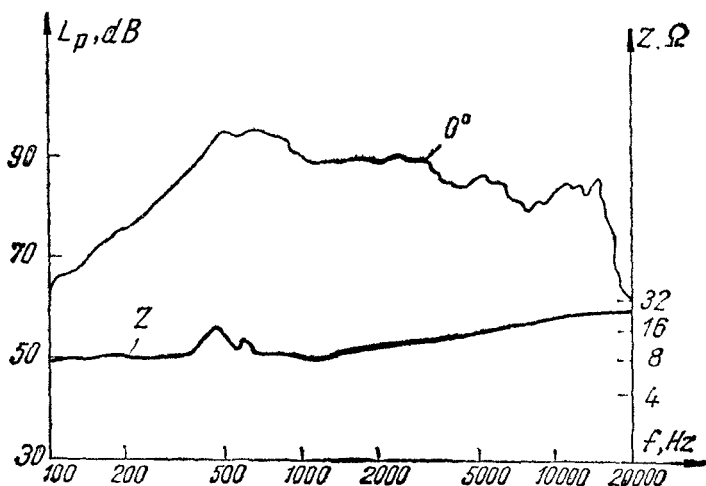


Фиг. 1.19



Фиг. 1.20

импеданс — 8Ω ; номинален честотен обхват — от 630 до 6300 Hz; неравномерност на честотната характеристика — до 8 dB; коефициент на хармонични изкривявания — в съответствие с изискванията за H1 F1 клас. На фиг. 1.21 са дадени честотната и импедансната му характеристики.



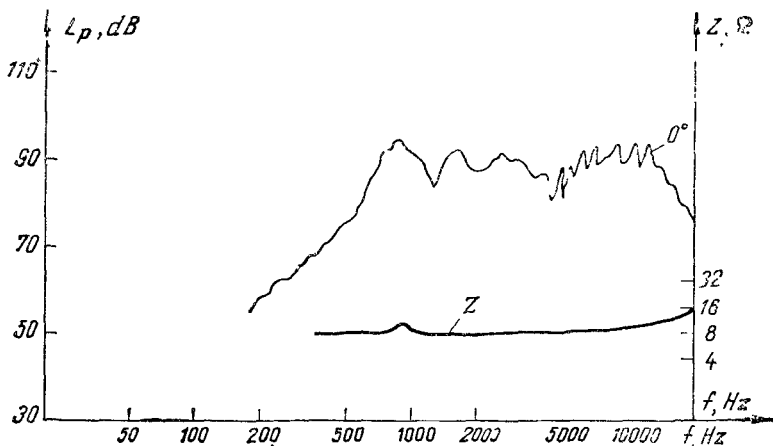
Фиг. 1.21

Рупорни среднечестотни високоговорители у нас не се произвеждат.

Високочестотни високоговорители. Основните изисквания към тях са: горната им гранична честота да бъде колкото е възможно по-висока, неравномерността на честотната им характеристика да бъде малка, да внасят малки нелинейни изкривявания и да имат широка пространствена характеристика на излъчване. Долната гранична честота на високочестотни високоговорители, използвани в двулентови озвучителни тела, трябва да бъде 2—3 kHz, а на използваните в трилентови озвучителни тела — 4—5 kHz. Произвеждат се високочестотни високоговорители с долна гранична честота 8—10 kHz, които се използват в трилентови и четирилентови озвучителни тела. Високочестотните високоговорители се характеризират със значително големи паспортни мощности, тъй като те възпроизвеждат само 2—3 октави от звуковия спектър, и то от областта на високите честоти, където обикно-

вено енергията в октава е по-малка. Паспортната мощност на високочестотните високоговорители зависи от номиналния им честотен обхват или по-точно от долната им гранична честота — ако тя е по-висока, паспортната мощност е по-голяма. Произвеждат се три основни варианта: конусни, куполни и рупорни високочестотни високоговорители.

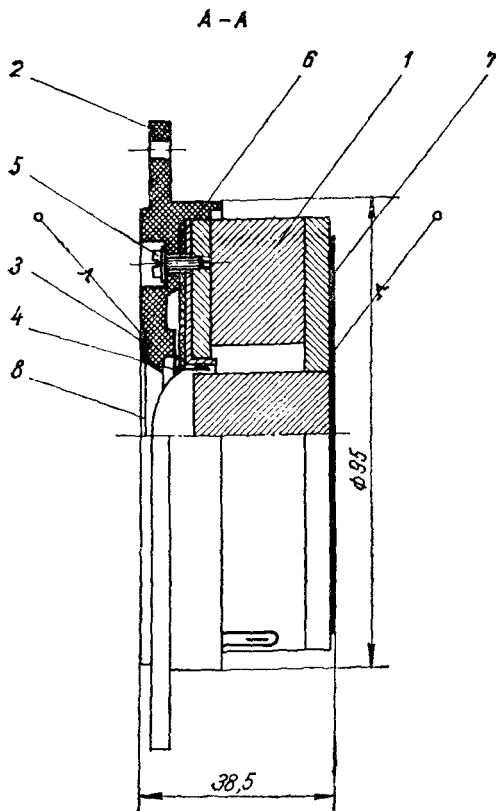
Конусните високочестотни високоговорители по конструкцията са подобни на високоговорителите за обща употреба, като обикновено шасито им е без отвори. Те имат горна гранична честота 15—18 kHz, рядко до 20 kHz. Нелинейните им изкривявания трудно отговарят на изискванията за Hi-Fi клас. Излъчването им става насочено още при 10 — 12 kHz. Честотната им характеристика не е гладка, в нея има върхове и падания дори ако неравномерността ѝ не е голяма. Поради посочените недостатъци тези високоговорители се използват ограничено за озвучителни тела от Hi-Fi клас. Те издържат значителни претоварвания и затова се използват в озвучителни тела за обща употреба. На фиг. 1.22 са дадени честотната и импедансната характеристики на високоговорител тип ВВ104. Паспортната му мощност в честотна лента от 2,5 до 16 kHz е 20 W, а от 5 до 16 kHz — 40 W.



Фиг. 1.22

Куполните високочестотни високоговорители имат редица предимства: поради малките размери на купола високоговорителят излъчва насочено едва при твърде високи честоти, поради малката маса на трептящата система горната гранична честота

може да се получи и над 20 kHz, преходните процеси са кратки, нелинейните изкривявания са малки, честотната характеристика може да се получи достатъчно гладка, чувствителността ѝ е не по-малка от тази на конусните високоговорители. Широкото при-

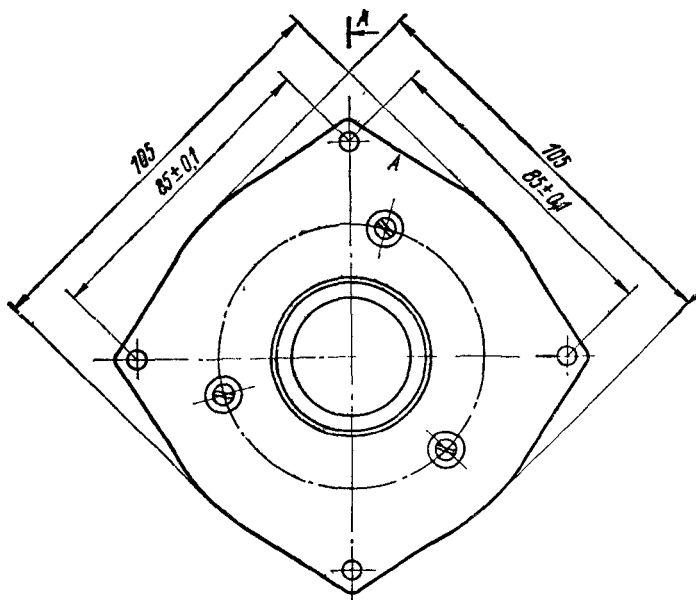


Фиг. 1.23. I

ложение на куполните висококачествени високоговорители се дължи на посочените предимства. Нашата промишленост произвежда два типа от тези високоговорители.

Външният вид на високоговорител тип ВКВ253I е даден на фиг. 1.23. Основните му показатели са: паспортна мощност — 20 W; номинален импеданс — 8 Ω (произвежда се и вариант 4 Ω—тип

ВКВ2521); номинален честотен обхват — от 2 до 16 kHz; неравномерност на честотната характеристика — не повече от 12 dB (в обхвата от 2 до 8 kHz — не повече от ± 4 dB); характеристична чувствителност — не по-малка от $0,4 \text{ PaW}^{-0,5}$; коефициент на хар-

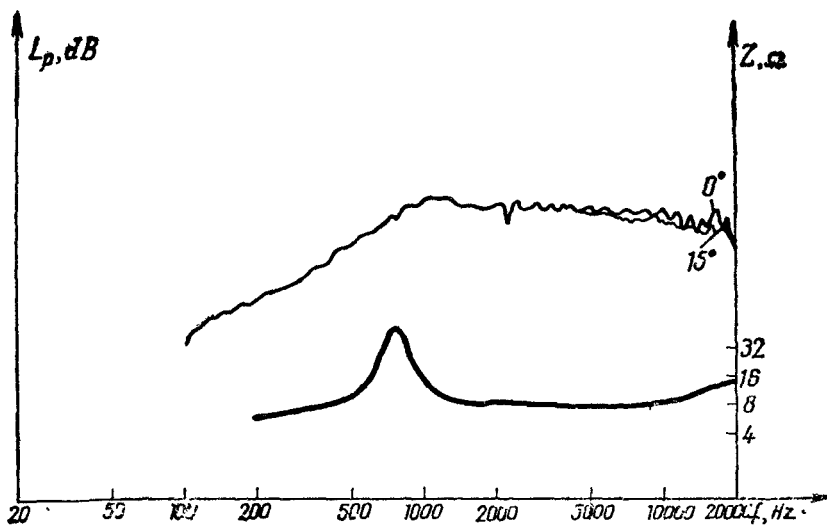


Фиг. 1.23. II

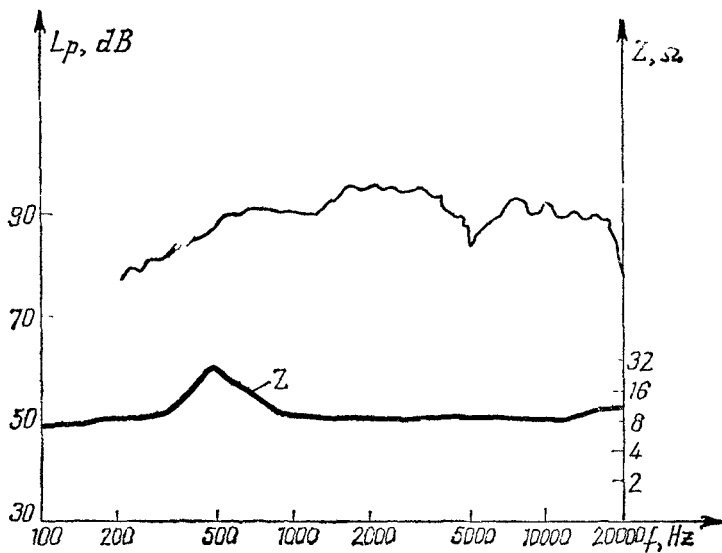
мониците — не по-голям от 1 %; понижаване нивото на излъчване на $\pm 15^\circ$ от оста — не повече от 4 dB. Основните му характеристики са дадени на фиг. 1.24.

Високофреkwентният високоговорител тип ВКВ3731 е с паспортна мощност 20 W при честотен обхват от 2 до 16 kHz и 40 W от 5 до 16 kHz. Честотната и импедансната му характеристики са дадени на фиг. 1.25.

Лентовите високофреkwентни високоговорители са електродинамични с подвижна лента. Поради много малката маса на трептящата им система те са почти безинертни, имат кратки преходни процеси, а горната им гранична честота достига до 40 kHz. Наред с това обаче те са чувствителни към претоварвания и удари. От тези високоговорители у нас се произвежда тип ВЛД40 (модернизация на доскоро произвеждания тип ВЛД12). Паспортната



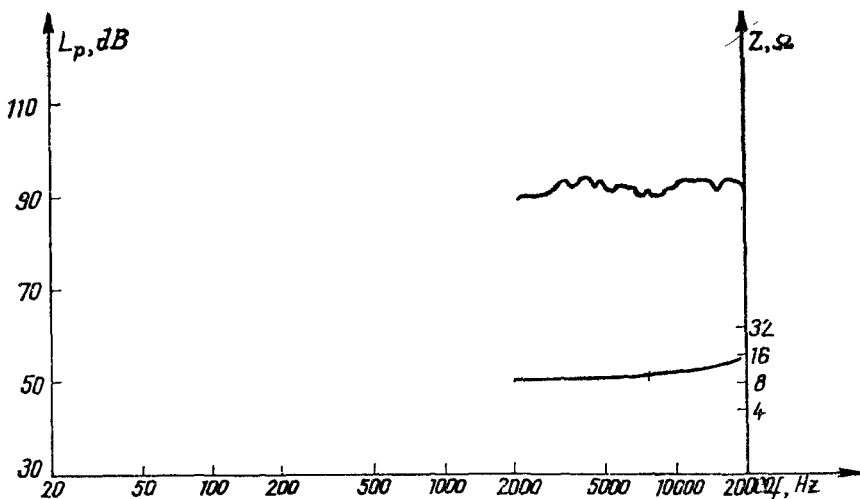
Фиг. 1.24



Фиг. 1.25

му мощност е 40 W, номиналният честотен обхват — от 2,5 до 40 kHz, а коефициентът на хармонични изкривявания е по-малък от 1 %. Честотната му характеристика е показана на фиг. 1.26.

Параметрите на високоговорителите, дадени в книгата, съот-



Фиг. 1.26

ветствуват на обявените от производителя стойности, съдържащи се в описанията и стандартизационните документи. Някои параметри са коригирани в съответствие с действителните стойности, измерени при контролни изпитания на образци от редовно производство. Параметрите, които производителят не обявява, като динамична маса, гъвкавост, качествени фактори и др., са усреднени от измерванията на 10 – 15 образца от тип. Въпреки усредняването тези стойности не са средностатистични, защото са от една или две партии. Използуването на тези стойности при проектирането на озвучителни тела ще осигури с достатъчна за практиката точност съвпадане на теорията с практическите резултати.

Широколентови високоговорители

Високоговорителят тип ВК0822 е с номинален диаметър 125 mm. Неговата паспортна мощност е 4 W, а номиналният му честотен обхват е от 63 до 15 000 Hz. Резонансната му честота

е 70 Hz, динамичната му трептяща маса $m=5,5$ g, еквивалентната му звукоизлъчваща повърхност $S=0,63 \cdot 10^{-2}$ m², а гъвкавостта $c=0,96 \cdot 10^{-3}$ mN⁻¹.

Високоговорителят тип BK133-A4 е с номинален диаметър 132 mm. Обявената му паспортна мощност е 4 W, но при използване на високоговорителя като нискочестотен може да се натоварва до 10 — 15 W. Номиналният му импеданс е 4 Ω, резонансната му честота е 68 Hz, а характеристикната му чувствителност е 0,6 PaW^{-0,5}. Ефективният му честотен обхват е от 63 до 15 000 Hz. Динамичната му трептяща маса е 4,8 g, а гъвкавостта му е 1,12 mN⁻¹, на което отговаря обем $V_c=7,1$ dm³. Еквивалентната му звукоизлъчваща повърхност е $S=6,7 \cdot 10^{-3}$ m². Качествените му фактори са $Q_{mp}=3,2$; $Q_{ep}=0,72$ и $Q_{tr}=0,59$.

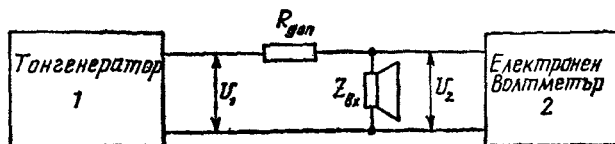
Високоговорителят тип BK201B4 е с номинален диаметър 200 mm. Паспортната му мощност е 10 W, номиналният му импеданс е 4 Ω, а резонансната му честота — 63 Hz. Има достатъчно широк ефективен честотен обхват — от 63 до 12 500 Hz и висока чувствителност — не по-малка от 0,7 PaW^{-0,5}. Динамичната маса на трептящата му система е 15 g, гъвкавостта на окачване е $c=0,41 \cdot 10^{-3}$ mN⁻¹, а $S=0,024$ m².

Високоговорителят тип BK1221 е с номинален диаметър 315 mm. Представлява вариант на нискочестотния високоговорител със същия размер, но окачването му се осъществява с целулозни гънки и е поставен допълнителен високочестотен конус. Паспортната му мощност е 30 W, номиналният импеданс е 4 Ω, а резонансната му честота — 70 Hz. Номиналният му честотен обхват е от 70 до 12 500 Hz, но ако върху централния полюсен накрайник на магнитната система се постави меден пръстен с дебелина 0,3 mm, горната гранична честота достига до 20 kHz. Характеристичната му чувствителност е 0,9 PaW^{-0,5}. Динамичната маса на трептящата система е 30 g, еквивалентната му звукоизлъчваща повърхност е 0,055 m², гъвкавостта на окачване е $c=0,54 \cdot 10^{-3}$ mN⁻¹, а съответстващият на тази гъвкавост обем е $V_c=224$ dm³.

1.6. ИЗМЕРВАНЕ НА ОСНОВНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ЕЛЕКТРОДИНАМИЧНИТЕ ВИСОКОГОВОРИТЕЛИ

За измерване на електроакустичните показатели на високоговорителите е необходима сложна и скъпа апаратура, която не е достъпна за работа при домашни условия. Поради това тези показатели трябва да се приемат такива, каквито са обявени от

производителя. Сравнително лесно може да се снее импедансната характеристика на високоговорителя, а от нея може да се определят необходимите при проектирането параметри. Това може да се осъществи с опитната постановка, чиято блокова схема е дадена на фиг. 1.27.



Фиг. 1.27

Необходимо е тонгенераторът да бъде с точно градуирана скала, в противен случай трябва да се използва честотомер за измерване честотата на генерирания сигнал. Допълнителното съпротивление $R_{дон}$ трябва да бъде поне 5 пъти по голямо от импеданса на високоговорителя при резонанс. За удобство се препоръчва да се приеме $R_{дон}=1\text{ k}\Omega$, а от генератора да се подава напрежение с ефективна стойност $U_1=1\text{ V}$. При тези условия през веригата ще протича ток с ефективна стойност $I=1\text{ mA}$. Показанията на волтметъра в mV ще съответствуват на импеданса $Z_{вх}$ на високоговорителя в Ω .

$$U_2 = \frac{U_1 Z_{вх}}{R_{дон} + Z_{вх}} \approx \frac{U_1}{R_{дон}} Z_{вх} = 10^{-3} \cdot Z_{вх}. \quad (1.21)$$

Като се изменя честотата на генератора, се определя $Z_{вх}$ за различните честоти и може да се построи импедансната характеристика — фиг. 1.28.

Необходимо е точно да се определи максимумът на кривата — да се отчете честотата, при която се получава, и да се определи стойността $Z_{вх\text{ max}}$.

Честотата, при която се получава максимумът, е резонансната честота f_0 на високоговорителя.

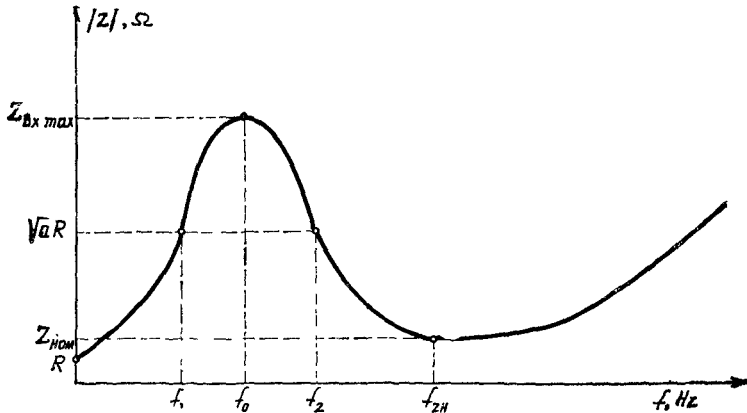
Необходимо е да се отчете точно стойността на минимума на импеданса при f_{zn} — това е номиналният импеданс на високоговорителя.

Импедансната характеристика може да се използва за определяне с достатъчна за практиката точност на стойността на им-

педанса за произволна, по-висока от f_{ZH} честота. Като се знае (или измери) съпротивлението R на звуковата бобина, може да се определи индуктивността L от зависимостите

$$\omega L = \sqrt{Z_{вх}^2 - R^2} = X; \quad (1.22 \text{ а})$$

$$L = \frac{X}{2\pi f}. \quad (1.22 \text{ б})$$



Фиг. 1.28

Стойностите на $Z_{вх}$ и L може да се използват за по-точно изчисляване на елементите на филтъра, ако са измерени при разделителната честота.

От импедансната характеристика може да се определят и качествените фактори на високоговорителя. Осъществява се в следния ред:

$$\text{Полага се } \frac{Z_{вх max}}{R} = \frac{R + R_{вн}}{R} = a. \quad (1.23)$$

Измерва се $Z_{вх max}$, R и f_0 .

Измерват се и двете честоти $f_1 < f_0$ и $f_2 > f_0$, при които импедансът на високоговорителя е $Z_{вх} = \sqrt{a}R = \sqrt{Z_{вх max}R}$.

Механичният качествен фактор се определя от зависимостта

$$Q_{Мр} = \frac{\sqrt{a}f_0}{f_2 - f_1}. \quad (1.24)$$

Електрическият качествен фактор се определя от зависимостта

$$Q_{ep} = \frac{Q_{Mp}}{a-1}. \quad (1.25)$$

Пълният качествен фактор може да се определи от зависимостта (1.13 в)

С опитната постановка от фиг. 1.44 може да се определи и обемът V_c , съответстващ на гъвкавостта на високоговорителя. За целта високоговорителят трябва да се монтира към кутия с известен обем V . При тези условия се снима импедансната характеристика на високоговорителя, определя се резонансната му честота f_{oe} и се изчислява електрическият качествен фактор Q_e по описания вече начин. Обемът V_c се определя от зависимостта

$$V_c = V \left(\frac{f_{oe} Q_e}{f_0 Q_{ep}} - 1 \right). \quad (1.26)$$

ГЛАВА ВТОРА

ЕЛЕКТРИЧЕСКИ РАЗДЕЛИТЕЛНИ ФИЛТРИ ЗА ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА

2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ

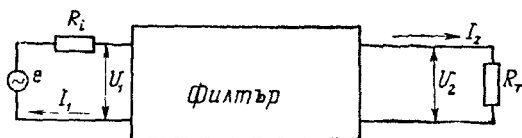
Висококачественото възпроизвеждане на целия звуков спектър само от един високоговорител среща редица трудности, които, ако не са непреодолими, са много големи. Поради това звуковият спектър се разделя на подобхвати, всеки от които се възпроизвежда от отделен високоговорител, конструиран съобразно изискванията за висококачествено възпроизвеждане само на този обхват. За да се осъществи разделянето, се използват електрически разделителни филтри. По принцип те са електрически вериги, които имат избирателни свойства по отношение на честотата на сигнала. В електротехниката и особено в радиотехниката електрическите филтри са намерили много широко приложение. Използуваните в електроакустиката разделителни филтри за озвучителни тела се различават от филтрите, използвани в радиотехниката, предимно с това, че разделят честотни сигнали, които са със сравнително големи мощности, т. е. през елементите на филтрите протичат значителни по големина токове. Другата особеност при озвучителните тела е, че товарът е високоговорител, чийто входен импеданс зависи от честотата.

В резултат на многобройни субективни прослушвания е установено, че конструкцията на филтъра оказва голямо влияние върху качеството на възпроизвеждане на озвучителните тела. От един комплект от високоговорители с много високи качествени показатели, комбиниран с неправилно изчислен филтър, ще се получи озвучително тяло, което няма да звучи добре.

Електрическият филтър е пасивна или активна електрическа верига, която пропуска без затихване (или с пренебрежимо малко затихване) сигналите от определен честотен обхват и не пропуска (или пропуска с голямо затихване) сигналите с честоти извън този обхват. Ще бъдат анализирани само пасивните разделителни филтри, натоварени с чисто активен товар R_T , с който се апроксимира $Z_{вх}$ на високоговорителя.

На фиг. 2.1 е дадена блоковата схема на свързване на филтър към източника на електрическо напрежение и към консуматора. Въведени са следните означения:

e — електродвижещо напрежение на захранващия генератор;



Фиг. 2.1

R — вътрешно съпротивление на генератора;
 U_1 и I_1 — входни напрежение и ток на филтъра;
 U_2 и I_2 — изходни напрежение и ток на филтъра;
 R_T — консуматор — товар на филтъра.

Коефициент на предаване K се нарича отношението на изходното \dot{U}_2 към входното напрежение \dot{U}_1 :

$$K = \frac{U_2}{U_1}. \quad (2.1)$$

Напреженията \dot{U}_1 и \dot{U}_2 имат комплексен характер, т. е. те се характеризират с определена големина и фаза в даден момент.

Фазова разлика φ — ъгълът на дефазирание между изходното \dot{U}_2 и входното напрежение \dot{U}_1 .

В най-общия случай напреженията \dot{U}_1 и \dot{U}_2 са дефазирани едно спрямо друго на някакъв ъгъл φ , от което следва, че коефициентът на предаване K има комплексен характер, т. е. той също се характеризира с определена големина (модул K) и определен фазов ъгъл φ . Обикновено модулът K и фазовата разлика φ зависят от честотата на предавания сигнал f . В практиката е прието вместо коефициента на предаване да се използва нивото L_U на изходното U_2 спрямо входното напрежение U_1 .

$$L_U = 20 \lg \frac{U_2}{U_1}, \text{ dB}. \quad (2.2)$$

Входен импеданс \dot{Z}_{ax} — отношението на входното напрежение U_1 към входния ток I_1 :

$$\dot{Z}_{ax} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}. \quad (2.3)$$

Консумирана електрическа мощност P_{ax} — определя се от израза

$$P_{ax} = \frac{U_1^2}{Z_{ax}}. \quad (2.4)$$

Отдавана мощност P_T — определя се от израза

$$P_T = \frac{U_2^2}{R_T}. \quad (2.5)$$

Разделителна честота f_p — честотата, при която отдаваната върху товара електрическа мощност е 2 пъти по-малка от мощността, която се отдава при честота, клоняща към безкрайност, нула или някаква друга предварително определена честота от обхвата на пропускане.

Амплитудно-честотна характеристика — зависимостта на модула на коефициента на предаване K от честотата f на предавания сигнал. Нарича се още и само честотна характеристика на филтъра.

Фазово-честотна характеристика — зависимостта на фазовата разлика φ от честотата на предавания сигнал.

Импедансна характеристика — зависимостта на входния импеданс Z_{ax} на филтъра от честотата f на предавания сигнал.

Стръмност на затихване $S_{зам}$ — отношението на разликата ΔL между нивата L_2 и L_1 на коефициента на предаване на филтъра за две честоти f_2 и f_1 от областта му на непропускане към разликата Δf_{oct} между честотите f_2 и f_1 , изразена в октави

$$S_{зам} = \frac{\Delta L}{\Delta f_{oct}}, \frac{dB}{oct}. \quad (2.6)$$

Разликата $\Delta L = L_2 - L_1$ между нивата на изходното напрежение на филтъра за честотите f_2 и f_1 се определя непосредствено от амплитудната му характеристика или се изчислява от зависимостта

$$\Delta L = 20 \lg \frac{U_2''}{U_2'}, \quad (2.6a)$$

където U_2'' е изходното напрежение за f_2 ;

U_2' — изходното напрежение за f_1 .

Разликата Δf_{oct} между честотите f_2 и f_1 се определя в октави съгласно зависимостта

$$\Delta f_{oct} = \frac{\lg \frac{f_2}{f_1}}{\lg 2}. \quad (2.6 б)$$

Ред (степен) на филтъра — най-високият степенен показател на честотата, участващ в израза за коефициента на предаване на филтъра. Обикновено редът на даден филтър се определя от броя на участващите в схемата му реактивни елементи.

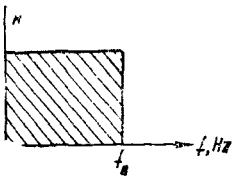
Честотен обхват на пропускане — честотният обхват, в който внасяното от филтъра затихване е не по-голямо от една определена стойност N . Обикновено се приема $N=3$ dB.

Честотен обхват на непропускане — честотният обхват, в който внасяното от филтъра затихване е по-голямо от една определена стойност N . Количествено тя съвпада с приетата гранична стойност за обхвата на пропускане.

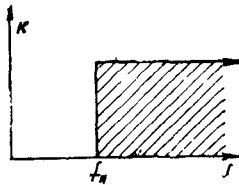
2.2. ВИДОВЕ РАЗДЕЛИТЕЛНИ ФИЛТРИ

Нискочестотен филтър — филтър, който пропуска електрически сигнали с честота от нула до една определена честота f_c и не пропуска сигналите с честота, по-висока от f_c . Честотата f_c се нарича горна гранична честота на филтъра. Идеалната честотна характеристика на нискочестотен филтър е дадена на фиг. 2.2.

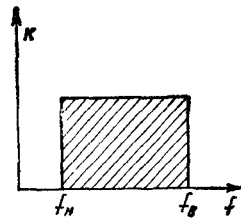
Високочестотен филтър — филтър, който пропуска всички сигнали с честота, по-висока от една определена честота f_n и не пропуска сигнали с честота, по-ниска от f_n . Честотата f_n се нарича долна гранична честота на филтъра. Горната гранична честота на високочестотния филтър клони към безкрайност. Идеалната честотна характеристика на високочестотен филтър е дадена на фиг. 2.3.



Фиг. 2.2



Фиг. 2.3

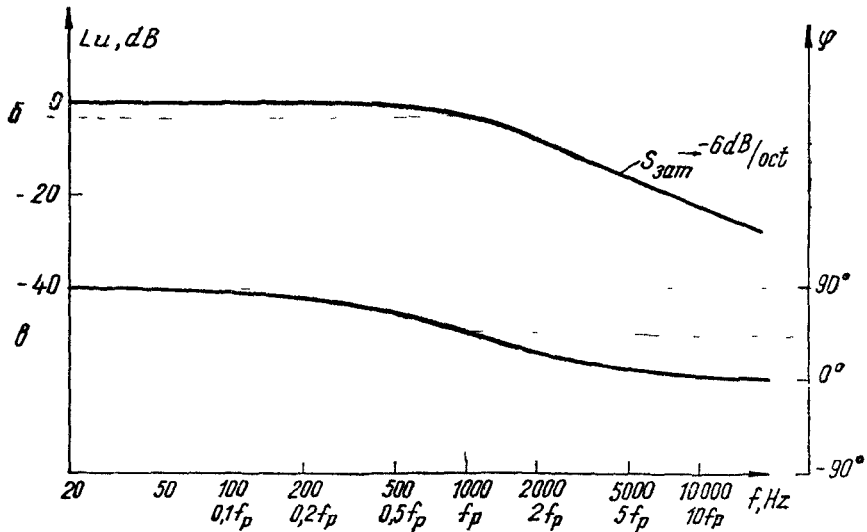
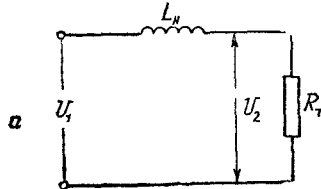


Фиг. 2.4

Лентов филтър — филтър, който пропуска сигналите от даден честотен спектър, определен с долна гранична честота f_n и горна гранична честота f_g и не пропуска сигналите с честоти извън този спектър. Идеалната му честотна характеристика е дадена на фиг. 2.4.

2.3. РАЗДЕЛИТЕЛНИ ФИЛТРИ ОТ ПЪРВИ РЕД

Нискочестотен разделителен филтър от първи ред. Ако се свържат последователно една бобина с индуктивност L_H и един резистор със съпротивление R_T , като към краищата им се при-



Фиг. 2.5

ложи входното напрежение \dot{U}_1 , а] спадът върху R_T се приеме за изходно напрежение \dot{U}_2 , както е показано на фиг. 2.5 а, се получава нискочестотен разделителен филтър от първи ред. Прието е $R_i = 0$, на което съответствуват съвременните усилватели. От схемата на фигурата може да се определи коефициентът на предаване

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R_T}{R_T + j\omega L_H} \cdot \quad (2.7)$$

Модулът на коефициента на предаване е

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_T}{\sqrt{R_T^2 + (\omega L_H)^2}}, \quad (2.8)$$

а за нивото L_{U_H} на U_2 спрямо U_1 се получава

$$L_{U_H} = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} = 20 \lg \frac{R_T}{\sqrt{R_T^2 + (\omega L_H)^2}}. \quad (2.9)$$

На фиг. 2.5 б е показана зависимостта на L_U от честотата f , т. е. честотната характеристика на филтъра, построена въз основа на зависимостта (2.9).

От зависимостта (2.7) се определя фазовата разликата φ_H между \dot{U}_2 и \dot{U}_1

$$\operatorname{tg} \varphi_H = - \frac{\omega L_H}{R_T}. \quad (2.10)$$

От този израз се вижда, че фазовата разлика φ_H е отрицателна и с нарастване на честотата се увеличава по абсолютна стойност. При една определена честота f_1 се получава

$$L_H 2\pi f_1 = R_T. \quad (2.10 a)$$

Като се замести в (2.10), се получава $\operatorname{tg} \varphi_H = -1$ и $\varphi_H = -45^\circ$. При честота f , която клони към безкрайност, фазовата разлика φ_H клони към -90° . На фиг. 2.5 в е построена фазовата характеристика на филтъра, изчислена от (2.10).

Входният импеданс $\dot{Z}_{вх}$ на нискочестотния филтър от първи ред е

$$\dot{Z}_{вх} = R_T + j\omega L_H. \quad (2.11 a)$$

Модулът на входния импеданс е

$$Z_{вх} = \sqrt{R_T^2 + (\omega L_H)^2}. \quad (2.11 б)$$

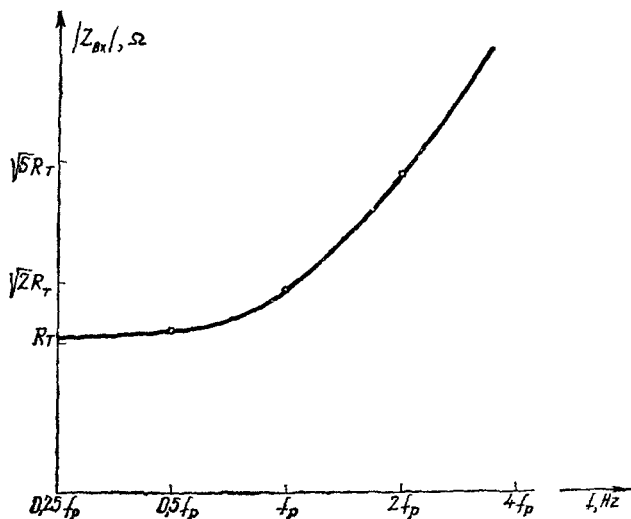
С увеличаване на честотата модулът на входния импеданс расте, като за честотата f_1 той е $Z_{вх} = \sqrt{2} R_T$. При честота f , клоняща към безкрайност, и входният импеданс става безкрайно голям. Импедансната характеристика на филтъра е дадена на фиг. 2.6.

Фазата φ_z на входния импеданс се определя от зависимостта

$$\operatorname{tg} \varphi_z = \frac{\omega L_H}{R_T}. \quad (2.11 в)$$

Вижда се, че тя е равна на R_T по големина, но с обратен знак спрямо нея, т. е. $\dot{Z}_{вх}$ има индуктивен характер.

Индуктивността L_n на бобината се определя от условието — за разделителната честота f_p мощността P_p върху товара R_T да



Фиг. 2.6

бъде половината от мощността P_0 , която той консумира при честотата на сигнала, клоняща към нула. Приема се, че в областта на пропускане филтрите не внасят никакво затихване, т. е. коефициентът $K=1$ или нивото на U_2 спрямо U_1 е $L_U=0$ dB. При тази предпоставка се получава

$$\frac{P_p}{P_0} = \frac{U_{2p}^2}{U_{20}^2} = \frac{R_T^2}{(\sqrt{R_T^2 + (\omega_p L_n)^2})^2} = \frac{1}{2} \quad (2.12)$$

Решението на 2.12 спрямо L_n дава търсената зависимост

$$L_n = \frac{R_T}{2\pi f_p} \quad (2.13)$$

Изразът (2.13) може да се представи и във вида

$$\omega_p L_n = R_T \quad (2.13a)$$

От сравнението на (2.13 а) с (2.10 а) се установява

$$f_1 = f_p. \quad (2.13 б)$$

Следователно за разделителната честота се получава: нивото на изходното напрежение се понижава с 3 dB; фазовата разлика $\varphi_n = -45^\circ$;

модулът на входния импеданс $Z_{вх} = \sqrt{2} R_T$;

фазата на входния импеданс $\varphi_z = 45^\circ$.

При зададена индуктивност L_H на бобината от (2.13) за разделителната честота се получава

$$f_p = \frac{R_T}{2\pi L_H}. \quad (2.14)$$

За честоти $f \gg f_p$ се получава $\omega L_H > R_T$. Във величината под корен на (2.8) и (2.9) може да се пренебрегне събираемото R_T и се получава

$$K \approx \frac{R_T}{2\pi L_H f}, \quad L_U \approx 20 \lg \frac{R_T}{2\pi L_H f}. \quad (2.15)$$

Вижда се, че K и L_U зависят обратно пропорционално от честотата на първа степен. Затова филтърът се нарича от първи ред. Броят на реактивните елементи е само един — индуктивността L_H .

Освен това от (2.15) се установява, че стръмността на затихване клони към 6 dB/oct при $f \gg f_p$.

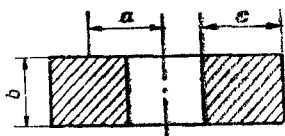
Изменението на индуктивността на бобината води единствено до изменение на разделителната честота f_p . Следователно индуктивността L_H се определя от (2.13) само от съображения за получаване на избраната разделителна честота. Необходимо е обаче да се има предвид, че нискочестотният филтър е само едно звено на даден филтър и паралелно на него е свързано високочестотното звено. Ако се увеличи разделителната честота на нискочестотното звено, без да се изменя разделителната честота на високочестотното звено, ще се получи честотен обхват на прекриване, който ще се пропуска и от двата филтъра. Входният импеданс на системата в този обхват ще стане 2 пъти по-малък от стойността на товара и съществува опасност от претоварване на усилвателя. Такава грешка не трябва да се допуска.

Пример. Да се изчисли нискочестотен разделителен филтър от първи ред при зададен товар $R_T = 4 \Omega$ и разделителна честота 1800 Hz.

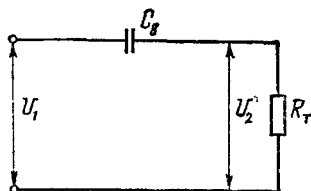
От (2.13) се определя индуктивността

$$L_H = 352 \mu\text{H}. \quad (2.16)$$

Конструктивно изчисляване на бобини за филтри. Обикновено бобините за разделителни филтри за озвучителни тела са изработват като многослойна намотка, навита върху основа от немагнитен материал, най-често се използва пластмасов цилиндър. Индуктивността на такава бобина се изчислява от зависимостта



Фиг. 2.7



Фиг. 2.8

$$L = \frac{320 a^2 n^2}{6a + 9b + 10c} \cdot 10^{-8}, \text{ H.} \quad (2.17)$$

Размерите a , b и c са означени на фиг. 2.7, а n е броят на навивките.

Ако бобините се навият върху пластмасов цилиндър с външен диаметър 40 mm и височина 20 mm, като се използва меден проводник тип ПЕТ1-В или ПЕТ1-Ф с диаметър 1 mm, броят на навивките n за различните стойности на L е даден в табл. 2.1

Таблица 2.1

$L, \text{ mH}$	0,2	0,25	0,35	0,50	0,60	0,70	1,00	1,2	1,5	2,0	3,2	6,4
n	60	68	80	100	110	120	145	158	178	208	257	360

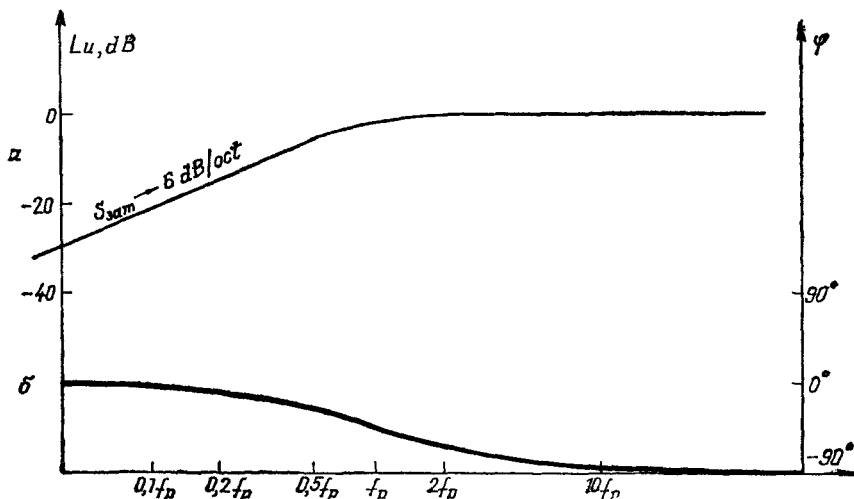
Висококачествен разделителен филтър от първи ред. Ако последователно на един резистор R_T се свърже кондензатор с капацитет C , и към краищата им се приложи входно напрежение \dot{U}_1 , а спадът върху R_T се вземе за изходно напрежение \dot{U}_2 , се получава висококачествен разделителен филтър от първи ред—фиг. 2.8. Прието е $R_i = 0$. За коефициента на предаване K от фиг. 2.8 в този случай се получава

$$K = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R_T}{R_T + \frac{1}{j\omega C}}. \quad (2.18)$$

Модулът на коефициента на предаване е

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\omega CR_T}{\sqrt{1 + (\omega CR_T)^2}} \quad (2.19)$$

За нивото L_U на напрежението U_2 спрямо U_1 се получава



Фиг. 2.9

$$L_U = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} = 20 \lg \frac{\omega CR_T}{\sqrt{1 + (\omega CR_T)^2}} \quad (2.20)$$

За много ниски честоти (ω клони към нула) и модулът на коефициента на предаване клони към нула, а L_U клони към $-\infty$. С увеличаване на честотата K расте, като при много високи честоти ($\omega \rightarrow \infty$), K клони към единица, т. е. $L_U \rightarrow 0$. На фиг. 2.9 а е показана честотната характеристика на филтъра, построена съгласно зависимостта (2.20).

Зависимостта на фазовата разлика φ_s между напреженията U_2 и U_1 от честотата може да се определи от израза (2.18). Получава се

$$\text{tg } \varphi_s = -\frac{1}{\omega CR_T} \quad (2.21)$$

От (2.21) се установява, че фазовата разлика е положителна за всички честоти и намалява с увеличаване на честотата. При мно-

го ниски честоти ($\omega \rightarrow 0$) за $\operatorname{tg} \varphi_s$ се получава много голяма стойност ($\operatorname{tg} \varphi_s \rightarrow \infty$), а фазовата разлика $\varphi_s = 90^\circ$. С увеличаване на честотата фазовата разлика намалява и при една определена честота се получава

$$2\pi f_1 C R_T = 1, \quad R_T = \frac{1}{2\pi f_1 C}. \quad (2.22)$$

Като се замести (2.22) в (2.21), се получава $\operatorname{tg} \varphi_s = 1$ и $\varphi_s = 45^\circ$. При много високи честоти ($\omega \rightarrow \infty$) фазовата разлика намалява, $\operatorname{tg} \varphi_s$ клони към нула и φ_s също клони към нула. На фиг. 2.9 б е построена фазовата характеристика на филтъра съгласно зависимостта (2.21).

Входният импеданс на високочестотния филтър от първи ред е

$$\dot{Z}_{sx} = R_T + \frac{1}{j\omega C}. \quad (2.23 a)$$

Модулът Z_{sx} на входния импеданс е

$$Z_{sx} = \sqrt{R_T^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}. \quad (2.23 б)$$

За много ниски честоти модулът на входния импеданс на високочестотния филтър от първи ред има много голяма стойност — при f , клоняща към нула, входният импеданс клони към безкрайност. С увеличаване на честотата модулът на входния импеданс намалява, като при честота f_1 той е $Z_{sx} = \sqrt{2} R_T$. За честоти, по-високи от f_1 , модулът на входния импеданс намалява, но остава по-голям от R_T . Едва при много високи честоти ($\omega \rightarrow \infty$) се получава $Z_{sx} \approx R_T$. Импедансната характеристика на филтъра е дадена на фиг. 2.10.

Фазата φ_z на входния импеданс съгласно (2.23 а) се определя от зависимостта

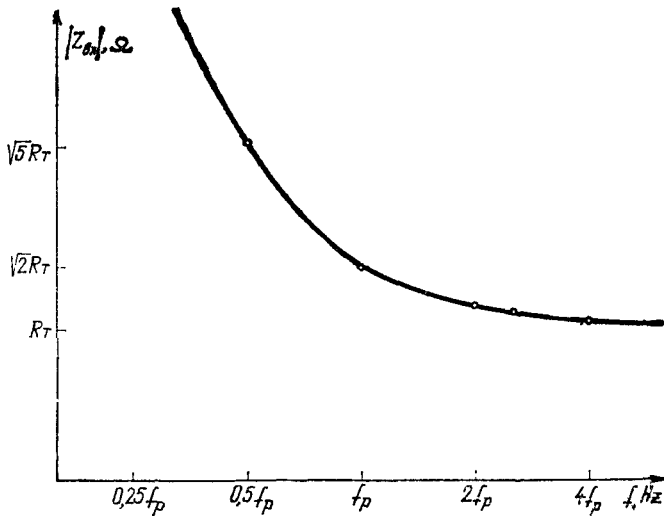
$$\operatorname{tg} \varphi_z = - \frac{1}{\omega C R_T} \quad (2.23 в)$$

От (2.23 в) следва, че входният импеданс на високочестотния филтър от първи ред има капацитивен характер за целия честотен обхват, което се вижда и от неговата схема.

Капацитетът на кондензатора C се определя от условието за разделителната честота f_p мощността P_p върху товара R_T да бъде половината от мощността P_0 , която той консумира при честотата на сигнала, клоняща към безкрайност, или по-точно за честотата, която е много по-висока от f_p . За областта на пропускане тук също се приема, че филтърът не внася никакво затихване,

т. е. $K_0=1$ или нивото на U_2 спрямо U_1 е $L_U=0$ dB. При тези условия се получава

$$\frac{P_p}{P_0} = \frac{U_{2p}^2}{U_{2p}^2} = \frac{R_T^2}{R_T^2 + \frac{1}{\omega_p^2 C^2}} = \frac{1}{2}. \quad (2.24)$$



Фиг. 2.10

Решението на (2.24) спрямо C дава търсената зависимост

$$C = \frac{1}{2\pi f_p R_T}. \quad (2.25 a)$$

По принцип изразът (2.25 a) означава, че за разделителната честота f_p импедансът на кондензатора C е равен на съпротивлението на товара R_T :

$$\frac{1}{\omega_p C} = R_T. \quad (2.25 б)$$

От сравнението на (2.25 a) с (2.22) се установява, че е в сила равенството $\omega_p = \omega_1$,

$$f_p = f_1. \quad (2.25 в)$$

Следователно за разделителната честота на високочестотния разделителен филтър от първи ред се получава:

нивото L_U на входното напрежение е -3 dB;

фазовата разлика $\varphi_s = 45^\circ$;

модулът на входния импеданс $Z_{ix} = \sqrt{2} R_T$;

фазата на входния импеданс $\varphi_z = -45^\circ$.

За разделителната честота f_p съгласно с (2.25 а) се получава

$$f_p = \frac{1}{2\pi C R_T} \quad (2.26)$$

За честоти на сигнала, които са много по-ниски от разделителната, се получава $\omega_p C R_T \ll 1$. Във величината под корен на (2.19) и (2.20) може да се пренебрегне събираемото $\omega_p C R_T$ и се получава

$$K \approx 2\pi f R_T; L_U \approx 20 \lg 2\pi f C R_T \quad (2.27)$$

От (2.27) се установява, че K и L_U зависят право пропорционално от честотата на първа степен и затова филтърът се нарича от първи ред. Броят на реактивните елементи е един — кондензаторът C .

От (2.27) се установява също, че стръмността на затихване клони към 6dB/oct при $f \ll f_p$, но около f_p тя е по-малка.

Изменението на кондензатора на кондензатора C при високочестотния филтър от първи ред води единствено до изменение на неговата разделителна честота f_p . Следователно кондензаторът на C се определя от (2.25а) само от съображения за получаване на предварително избраната разделителна честота. Тук също трябва да се вземе предвид, че с изменение на разделителната честота настъпват съответни изменения на всички величини, които зависят относително от честотата (зависят от $\frac{f}{f_p}$). Последствията

от промяната на разделителната честота трябва да се преценят, като се вземе предвид влиянието на високочестотния филтър върху общото съчетание от филтри, участващи в схемата за разделяне звуковия спектър на подобхвати — най малкото, което трябва да се направи, е да се изследва входният импеданс на съвкупния филтър. Ако се установи, че съществува опасност от получаване на входен импеданс, който е по-малък от номиналния, решението не трябва да се приема.

Пример 1. Да се изчисли високочестотен разделителен филтър от първи ред при зададен товар $R_T = 4 \Omega$ и разделителна честота 1800 Hz.

От (2.25 а) се определя капацитетът на C :

$$C = \frac{1}{2\pi 1800 \cdot 4} = 22 \mu\text{F}. \quad (2.28)$$

Полученият капацитет съвпада със стандартната стойност или може да се реализира от паралелното свързване на два кондензатора с капацитет $10 \mu\text{F}$ и един кондензатор с капацитет $2 \mu\text{F}$, всички от типа МБГП—2.

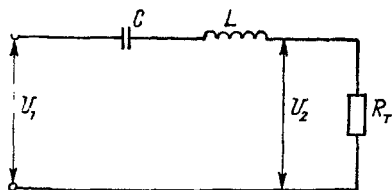
Пример 2. Да се изчисли високочестотен разделителен филтър от първи ред при зададен товар $R_T = 8 \Omega$ и разделителна честота 2200 Hz .

От (2.25 а) се определя $C = 9,0 \mu\text{F}$. Получената стойност не е стандартна. Налага се да се приеме друг капацитет на C , който да съвпадне със стандартната стойност. Приема се $C' = 10 \mu\text{F}$. Разделителната честота се изменя на $f_p' = 1980 \text{ Hz}$, т. е. със 220 Hz по-ниска от избраната. Трябва да се изследва съвместната работа на този филтър в обхвата $1980\text{—}2200 \text{ Hz}$ с нискочестотния филтър и тогава да се прецени целесъобразно ли е да се приеме този капацитет на кондензатора.

Може да се приеме по-малък от изчисления, например $C'' = 8 \mu\text{F}$. Ще се реализира от паралелното свързване на два кондензатора тип МБГП—2 с капацитет по $4 \mu\text{F}$. За разделителната честота f_p'' се получава

$$f_p'' = \frac{1}{2\pi 8 \cdot 10^{-6} \cdot 8} = 2480 \text{ Hz}. \quad (2.29)$$

В този случай разделителната честота се получи с 280 Hz висока от избраната. При това условие входният импеданс на високочестотния филтър в обхвата $2200\text{—}2480 \text{ Hz}$ ще бъде по-голям от импеданса, който би се получил при разделителна честотата 2200 Hz . Влиянието върху хода на честотната характеристика не е съществено. Следователно за предпочитане е капацитетът на кондензатора C да се избере с по-малката стандартна стойност от изчислената.



Фиг. 2.11

Средночестотен разделителен филтър от първи ред. Ако последователно на един резистор R_T се свържат кондензатор с капацитет C и бобина с индуктивност L , и към краищата им се приложи входното напрежение U_1 , а спадът върху R_T се вземе

за изходно напрежение U_2 , се получава средночестотен разделителен филтър от първи ред—фиг. 2.11. От схемата на фиг. 2.11 може да се изведе аналитичен израз за зависимостта на коефициента K от честотата

$$K = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R_T}{R_T + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \quad (2.30)$$

Модулът на коефициента на предаване е

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_T}{\sqrt{R_T^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (2.31)$$

За нивото L_U на изходното напрежение U_2 спрямо входното U_1 се получава

$$L_U = 20 \lg \frac{R_T}{\sqrt{R_T^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (2.32)$$

По принцип средночестотният разделителен филтър от първи ред представлява един електрически трептящ кръг. Резонансната му честота се определя от условието за анулиране на реактивната компонента

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0; \quad f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (2.33)$$

За резонансната честота f_0 се получава $K=1$ и $L_U=0$ dB. За всички останали честоти коефициентът на предаване K е по-малък от единица, съответно нивото L_U на изходното напрежение има отрицателни стойности.

Зависимостта (2.31) за коефициента на предаване може да се напише във вида

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 x^2 \left(1 - \frac{1}{x^2}\right)^2}}, \quad (2.34)$$

$$\text{където } x = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0} \text{ е нормирана честота,} \quad (2.35 \text{ a})$$

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R_T} = \frac{1}{R_T} \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ — качествен фактор на кръга.} \quad (2.35 \text{ б})$$

За нивото на U_2 спрямо U_1 се получава

$$L_U = -20 \lg \sqrt{1 + Q^2 x^2} \left(1 - \frac{1}{x^2}\right)^2. \quad (2.36)$$

На фиг. 2.12 а са дадени няколко честотни характеристики на средночестотен разделителен филтър от първи ред при параметър Q — за $Q=1$; $Q=0,707$ и $Q=0,316$. От графиката се вижда, че добър резултат се получава при $Q=0,316$. Във всички случаи стръмността на затихване в областта на непропускане клони към 6 dB/oct.

Разделителните честоти могат да бъдат определени точно от условието — *мощността, която се консумира от филтъра за разделителните честоти, да бъде два пъти по малка от тази, която се консумира при резонансната честота f_0* . Това е еквивалентно на условието коефициентът на предаване да стане равен на 0,707. От (2.34) се получава

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 x^2} \left(1 - \frac{1}{x^2}\right)} = \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (2.37)$$

Решението на (2.37) дава двете нормирани разделителни честоти

$$x_1 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{1}{Q^2} + 4 - \frac{1}{Q}} \right), \quad x_2 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{1}{Q^2} + 4 + \frac{1}{Q}} \right). \quad (2.38)$$

Вижда се, че $x_1 x_2 = 1$, т. е. $f_1 f_2 = f_0^2$.

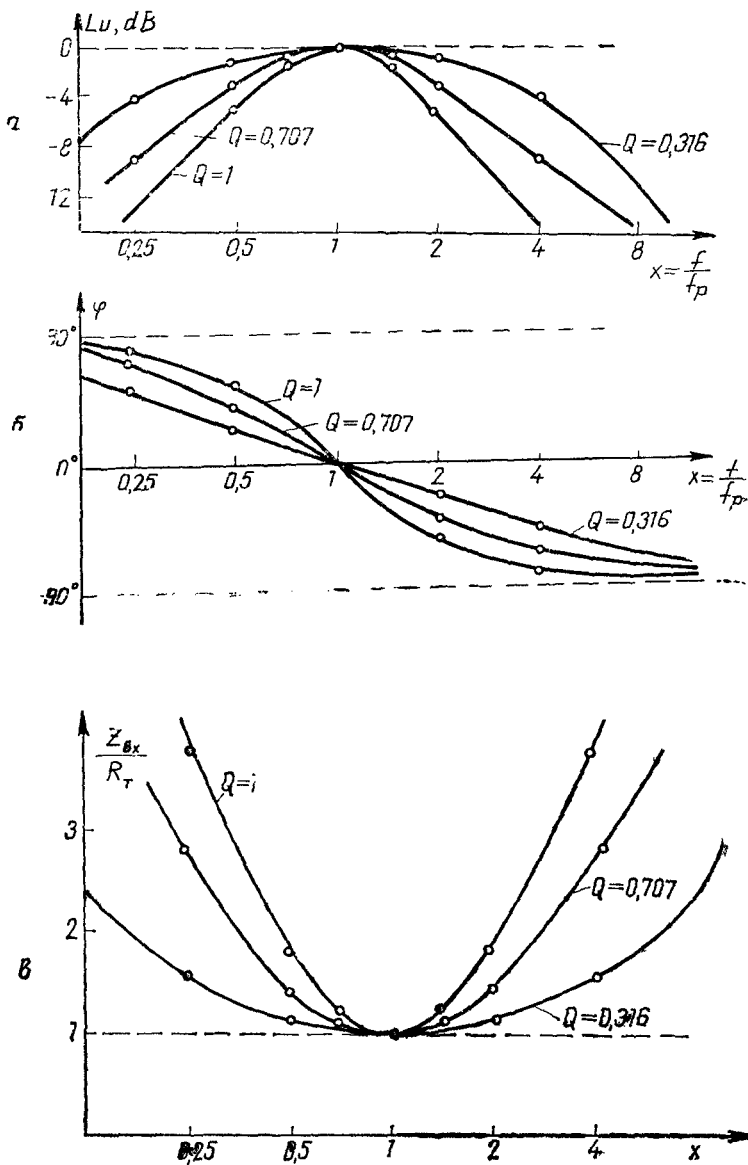
Разделителните честоти са

$$f_1 = \frac{\sqrt{\frac{1}{Q^2} + 4 - \frac{1}{Q}}}{4\pi\sqrt{LC}}, \quad (2.39 a)$$

$$f_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{Q^2} + 4 + \frac{1}{Q}}}{4\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.39 б)$$

При зададени разделителни честоти f_1 и f_2 може да се определи необходимата стойност на Q . Тя се получава, като се раздели (2.39 б) на (2.39 а)

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{Q^2} + 4 + \frac{1}{Q}}}{\sqrt{\frac{1}{Q^2} + 4 - \frac{1}{Q}}} = \frac{f_2}{f_1} = b. \quad (2.40)$$



Фиг. 2.12

Решението спрямо Q дава

$$Q = \frac{b}{b-1}. \quad (2.41)$$

При известна вече стойност на Q от (2.38 а) и (2.38 б) може да се определи x_1 и x_2 , а следователно и f_0 . След като се определи f_0 , не е трудно да се определят елементите на разделителния филтър

$$L = \frac{QR_T}{2\pi f_0}; \quad (2.42)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 QR_T}. \quad (2.43)$$

Средночестотният филтър от първи ред може да се разглежда като съставен от нискочестотен и височестотен филтър от първи ред. Последователно свързаните бобина L и товар R_T образуват нискочестотен филтър, чиято разделителна честота съвпада с по-високата от разделителните честоти на средночестотния филтър. За тази честота съпротивлението на кондензатора C е достатъчно малко и може да се пренебрегне. От друга страна, последователно свързаните C и R_T образуват височестотен филтър, чиято разделителна честота съвпада с по-ниската от разделителните честоти на средночестотния филтър. За тази честота съпротивлението на бобината L е достатъчно малко и може да се пренебрегне. Това третиране на средночестотния филтър дава основание неговите елементи да се изчислят: L от (2.13) за f_2 , а C от (2.25 а) за f_1 . Грешката намалява с увеличаване на отношението b .

Фазовата разлика φ между изходното и входното напрежение може да се определи от зависимостта (2.30), като се използват (2.35 а) и (2.35 б). Получава се

$$\operatorname{tg} \varphi = -Q \left(x - \frac{1}{x} \right). \quad (2.44)$$

Вижда се, че при много малки стойности на x фазовата разлика клони към $+90^\circ$, а при много големи стойности клони към -90° , независимо от стойността на Q . При $x=1$ фазовата разлика е 0, също независимо от Q . Стойността на Q оказва влияние върху фазовата разлика за честоти, които са близки до резонансната честота на филтъра. На фиг. 2.12 б са дадени фазовите характеристики на средночестотен филтър от първи ред за три стойности на Q . Вижда се, че при по-големи стойности на Q

фазовата разлика φ се изменя по-бързо с изменение на честотата в околността на f_p .

Входният импеданс на филтъра се определя от фиг. 2.12 а.

$$Z_{вх} = R_T + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \quad (2.45)$$

Модулът на входния импеданс е

$$Z_{вх} = R_T \sqrt{1 + Q^2 \left(x - \frac{1}{x}\right)^2}. \quad (2.46)$$

Фазата φ_z се определя от зависимостта

$$\operatorname{tg} \varphi_z = Q \left(x - \frac{1}{x}\right). \quad (2.47)$$

На фиг. 2.12 в са дадени импедансните характеристики на филтъра за същите три стойности на Q , за които са дадени честотните и фазовите му характеристики.

При средночестотния разделителен филтър от първи ред изменението на стойността на един от реактивните му елементи (L или C) води до промяна на редица параметри на филтъра – изменя се Q , а с този параметър са свързани всички останали параметри на филтъра. Следователно ще се измени широчината на пропускания честотен обхват, ще се измени ходът на честотната, фазовата и импедансната характеристики и т. н. При необходимост от изменение на стойността на даден елемент трябва да се анализира добре влиянието му и да се внесат необходимите корекции за запазване основните параметри на филтъра.

Пример 1. Да се изчисли средночестотен разделителен филтър от първи ред при зададен номинален товар $R_T = 4 \Omega$ и разделителни честоти $f_1 = 500 \text{ Hz}$ и $f_2 = 5000 \text{ Hz}$.

а. Отношението от двете разделителни честоти е $\frac{f_2}{f_1} = 10$.

б. Необходимата стойност на качествения фактор е $Q = 0,35$.

в. Нормираните разделителни честоти са $x_1 = 0,316$ и $x_2 = 3,16$.

г. Честотата $f_0 = 1580 \text{ Hz}$.

д. Капацитетът $C = 73 \mu\text{F}$.

Полученият капацитет би следвало да се реализира от паралелното свързване на няколко кондензатора – например $47 + 22 + 47 + 22 = 96 \mu\text{F}$.

е. Индуктивността $L = 143 \mu\text{H}$.

За сравнение ще бъдат изчислени стойностите на L и C от зависимостите (2.13) и (2.25 а). Получава се $L' = 127 \mu\text{H}$ и $C' = 79 \mu\text{F}$. На тези стойности съответствува $Q' = 0,328$. От сравня-

ването се установява, че разликата между стойностите на изчислените по двата начина елемента е около 10%.

Пример 2. Да се изчисли средночестотен разделителен филтър от първи ред при зададен номинален товар $R_T = 8 \Omega$ и разделителни честоти $f_1 = 1000 \text{ Hz}$ и $f_2 = 4000 \text{ Hz}$.

а. Отношението $\frac{f_2}{f_1} = 4$.

б. Необходимата стойност на качествения фактор е $Q = 0,667$.

в. Нормираните разделителни честоти са $x_1 = 0,5$ и $x_2 = 2$.

г. Честотата $f_0 = 2000 \text{ Hz}$.

д. Капацитетът $C = 15 \mu\text{F}$.

Получената стойност е стандартна.

е. Индуктивността $L = 424 \mu\text{H}$.

Елементите L и C , изчислени от зависимостите (2.13) и (2.25 а), са $L' = 320 \mu\text{H}$, $C' = 20 \mu\text{F}$ и $Q' = 0,5$.

Останалите параметри на филтъра ще бъдат: $f_0 = 2000 \text{ Hz}$, $x'_1 = 0,41$ и $x'_2 = 2,44$.

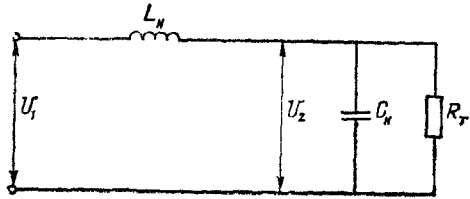
Следователно, ако се използват зависимостите (2.13) и (2.25 а) за определяне стойностите на елементите L и C на средночестотен филтър от първи ред, ще се получат стойности, които определят малко по-нисък качествен фактор и малко по-широк честотен обхват на пропускане спрямо зададения.

2.4. РАЗДЕЛИТЕЛНИ ФИЛТРИ ОТ ВТОРИ РЕД

Разделителните филтри от първи ред внасят затихване в честотния обхват на непропускане, което се изменя с 6 dB/oct. Понякога това затихване е достатъчно, но в повечето случаи се оказва недостагъчно. Това се отнася предимно за високочестотния филтър. Твърде често разделителната честота на високочестотния филтър се приема сравнително ниска, на границата на номиналния честотен обхват на високоговорителя. Не са редки случаите, когато за честоти, които са по-ниски от разделителната честота с $1/3$ от октавата, високоговорителят да проявява значителни изкривявания. При използване на филтър от първи ред напрежението върху високоговорителя за тези честоти е достатъчно голямо, за да се запазят изкривяванията в недопустими граници. Затова се налага използването на филтри от втори ред, които внасят затихване в областта на непропускане със стръмност 12 dB/oct.

2.4.1. Нискочестотен разделителен филтър от втори ред

Принципната схема на филтъра е дадена на фиг. 2.13. Изграден е от два реактивни елемента — бобина с индуктивност L_H , свързана последователно на товарното съпротивление R_T и кондензатор с капацитет C_H , свързан паралелно на R_T . Към краищата на получената електрическа верига се подава входното напрежение U_1 , а изходното напрежение U_2 е спадът върху R_T .



Фиг. 2.13

Целесъобразно е да се направят следните полагания:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_H C_H}}; \quad f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_H C_H}}; \quad (2.48)$$

$$\omega = \frac{f}{f_p} = x; \quad (2.49)$$

$$\frac{\omega_p L_H}{R_T} = \frac{1}{\omega_p C_H R_T} = \frac{1}{R_T} \sqrt{\frac{L_H}{C_H}} = Q_H. \quad (2.50)$$

От фиг. 2.13, като се вземат пред вид направените полагания, се получава

$$\dot{K}_H = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{1}{1 - x^2 + jQ_H x}. \quad (2.51)$$

Модулът на коефициента на предаване е

$$K_H = \frac{1}{\sqrt{x^4 + (Q_H^2 - 2)x^2 + 1}}. \quad (2.52)$$

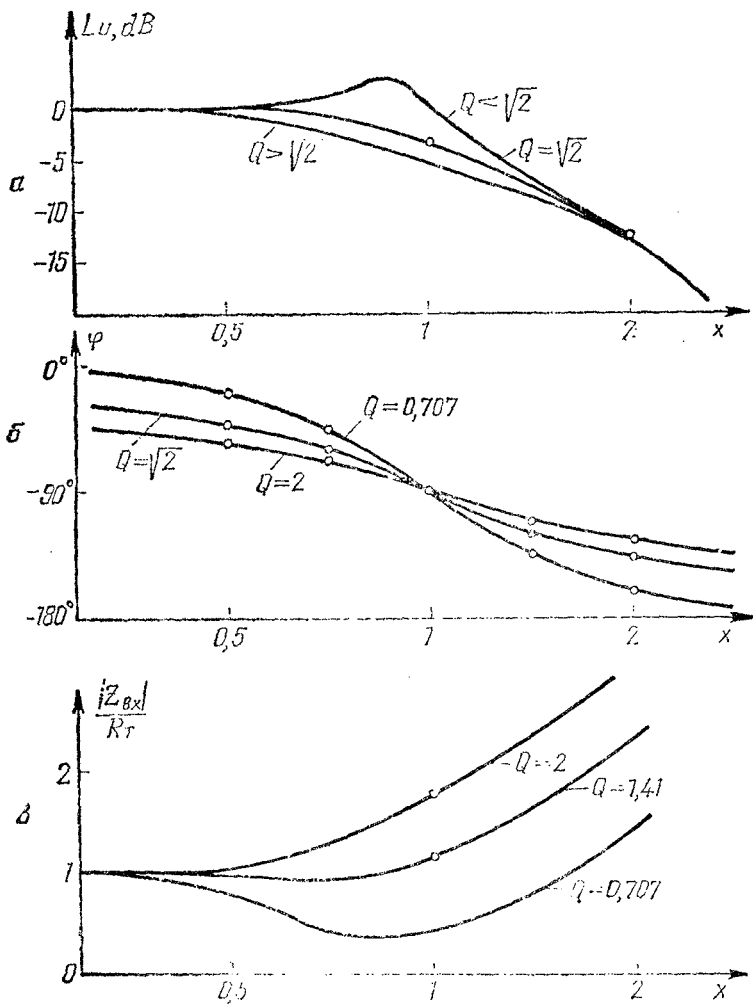
Нивото L_{UH} на изходното напрежение спрямо входното е

$$L_{UH} = -20 \lg \sqrt{x^4 + (Q_H^2 - 2)x^2 + 1}. \quad (2.53)$$

Вижда се, че модулът на коефициента на предаване K_H , респ. L_{UH} , зависи от нормираната честота x и от параметъра Q_H , следователно от честотата f и от елементите на филтъра.

При много малки стойности на x коефициентът на предаване

K_H клони към единица, а $L_{0H} = 0$ dB. При $x \gg 1$ се получава $K_H \approx \frac{1}{x^2}$. Оттук следва, че в областта на непропускане филтърът внася затихване, което нараства с квадрата (втората степен) на



Фиг. 2.14

честотата, защото коефициентът на предаване намалява с втората степен на честотата. L_{UH} се изменя със стръмност на затихване $S_{\text{зам}}=12$ dB/oct. Освен това при $x \rightarrow \infty$ коефициентът на предаване клони към нула независимо от стойността на Q_H .

Твърде често филтрите, подобни на показания на фиг. 2.13, се наричат филтри на Батърворт (Butterworth). Това наименование е неправилно, защото Батърворт е предложил само метода за апроксимирание на честотната характеристика на коефициента на предаване на филтрите, така че да се получи максимално плоска честотна характеристика в честотния обхват на пропускане. За нискочестотния филтър от втори ред такава характеристика се получава при параметър

$$Q_H = \frac{1}{R_T} \sqrt{\frac{L_H}{C_H}} = \sqrt{2}. \quad (2.51)$$

На фиг. 2.14 *a* са построени три честотни характеристики на филтъра от втори ред при параметър Q_H . От тях се вижда, че в областта на разделителната честота честотната характеристика може да има подем (при $Q_H < \sqrt{2}$) или да започне да понижава нивото си още при малки стойности на x (при $Q_H > \sqrt{2}$). Стръмността в областта на непропускане за трите честотни характеристики клони към 12 dB/oct. При $Q_H = \sqrt{2}$ честотната характеристика е гранично плоска, нарича се максимално плоска. От честотните характеристики на фиг. 2.14 *a* се вижда, че честотата, за която нивото на изходното напрежение се понижава с 3 dB, зависи от параметъра Q_H . Това може да се установи и аналитично, като се приравни изразът (2.52) на 0,707. За нормираната честота x_3 , при която $L_{UH} = -3$ dB, се получава

$$x_3 = \sqrt{\frac{2 - Q_H^2 + \sqrt{Q_H^4 - 4Q_H^2 + 8}}{2}}. \quad (2.55)$$

При $Q_H = \sqrt{2}$ от (2.55) се определя $x_3 = 1$. По обратен ред, ако се постави изискването $x_3 = 1$, от (2.55) се получава $Q_H = \sqrt{2}$.

При стойности на $Q_H < \sqrt{2}$ съществува една честота $f_{H\text{max}}$, за която коефициентът на предаване K_H получава максимум, при което $K_{H\text{max}} > 1$. Тази честота се определя от зависимостта

$$f_{H\text{max}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 - Q_H^2}{2L_H C_H}}. \quad (2.56)$$

Елементите на нискофреkwотния разделителен филтър от втори ред се определят от следните условия:

— За разделителната честота консумираната от товара мощност да бъде половината от мощността, която консумира при много ниски честоти. Това се постига при $K_H=0,707$ или $L_{UH}=-3$ dB. От това условие се получи (2.55).

— Честотната характеристика да бъде максимално плоска, т. е. стойността на Q_H да бъде оптимална. Оптималният ход на честотната характеристика се получава при удовлетворяване на условия (2.54). Като се замести (2.54) в (2.55), се получава $x_3=1$, т. е. $f_3=f_p$.

Следователно двете зависимости (2.54) и (2.48) образуват една система, в която неизвестни са L_{II} и C_{II} и следователно са достатъчни за определяне елементите на филтърa. От решаването на системата се получава

$$L_H = \frac{R_T}{\sqrt{2\pi}f_p}, \quad (2.57)$$

$$C_H = \frac{1}{2\sqrt{2}f_p R_T \pi}. \quad (2.58)$$

Фазовата характеристика на нискофреkwотния филтър от втори ред се определя от (2.51)

$$\operatorname{tg} \varphi_H = -\frac{Q_{II}x}{1-x^2}. \quad (2.59)$$

При много малки стойности на x дефазирането е също много малко. При стойности на x между 0 и 1 фазовата разлика φ_H се изменя от 0° до -90° . За самата разделителна честота $\varphi_H = -90^\circ$, т. е. то е два пъти по-голямо в сравнение с нискофреkwотния филтър от първи ред. При $x > 1$ фазовата разлика се изменя от -90° до -180° . Влиянието на параметърa Q_{II} върху хода на фазовата характеристика се ограничава до определяне стръмността (скоростта) на изменение на фазовата разлика при изменение на честотата, и то главно в областта на разделителната честота. На фиг. 2.14 б са дадени три фазови характеристики на филтърa за същите стойности на Q_{II} , за които са построени и честотните характеристики.

Входният импеданс на нискофреkwотния разделителен филтър от втори ред се определя от схемата на фиг. 2.13:

$$\dot{Z}_{ax} = j\omega L_H + \frac{R_T}{1+j\omega C_{II}R_T} = R_T \frac{1-x^2+jQ_Hx}{1+j\frac{x}{Q_H}}. \quad (2.60)$$

Модулът на входния импеданс е

$$Z_{вх} = R_T \sqrt{\frac{(1-x^2)^2 + Q_H^2 x^2}{1 + \frac{1}{Q_H^2} x^2}}. \quad (2.61)$$

Вижда се, че модулът на входния импеданс зависи освен от товара R_T и от нормираната честота x , също и от Q_H . Модулът на входния импеданс на един филтър трябва да бъде поне равен на съпротивлението на товара му или по-голям от него. Това е така, защото входният импеданс на филтъра се явява товар за усилвателя, към който е включена акустичната система, съдържаща разделителни филтри. Допуска се товарът на усилвателя, т. е. входният импеданс на акустичната система да бъде с до 20% по-малък от обявената номинална стойност. Но същия толеранс допускат и производителите на високоговорителите за своите изделия. Следователно филтърът не бива в никакъв случай да предизвиква допълнително намаляване на входния импеданс спрямо импеданса на товара. В целия честотен обхват трябва да се удовлетворява условието

$$\frac{Z_{вх}}{R_T} \geq 1. \quad (2.62)$$

След обстоен анализ се установява, че зависимостта (2.62) може да се удовлетвори само за стойности на

$$Q_H \geq \sqrt{1 + \sqrt{2}} \approx 1,56. \quad (2.63)$$

Зависимостта (2.63) образува също една система със зависимостта (2.48), от която могат да се определят елементите на филтъра при зададени товар и разделителна честота. Получава се

$$L_H = 0,248 \frac{R_T}{f_p}, \quad (2.64)$$

$$C_H = \frac{0,102}{f_p R_T}. \quad (2.65)$$

Ако елементите на филтъра се определят от зависимостите (2.64) и (2.65), стойностите им ще се различават с около 10% от тези, изчислени от (2.57) и (2.58). Влиянието на тази разлика върху хода на честотната характеристика на филтъра е незначително и няма да се отрази забележимо на възпроизвежданата звукова картина, но се получава гаранция за предотвратяване претоварването на усилвателя.

На фиг. 2.14 в са дадени импедансните характеристики на ни-

скочестотен филтър от втори ред за три стойности на Q_H . Техният ход потвърждава направения анализ.

Пример 1. Да се изчисли нискочестотен разделителен филтър от втори ред с разделителна честота $f_p = 2500$ Hz, предназначен за включване към товар $R_T = 4 \Omega$.

а. Определя се капацитетът на кондензатора C . Изчисляването на елементите на филтър от втори ред се започва от капацитета на C , защото кондензаторите се произвеждат с определени стандартни стойности. Индуктивността на бобините може да се получи с такава стойност, каквато е изчислена.

Съгласно (2.58) се получава $C'_H = 11,2 \mu\text{F}$.

Приема се най-близката стандартна стойност $C'_H = 10 \mu\text{F}$, тип МБГП-2 (съветски).

б. Определя се индуктивността съгласно (2.57) $L'_H = 0,36 \text{ mH}$.

в. Проверява се разделителната честота $f_p = 2650$ Hz.

Тук се получава малко по-висока разделителна честота от зададената. По принцип това не е опасно, но трябва да се вземе предвид при изчисляването на съответния високочестотен филтър.

г. Проверява се стойността на Q_H . Получава се $Q'_H = 1,5$, която е по-голяма от $\sqrt{2}$. Това е благоприятно, защото честотната характеристика ще бъде плоска, макар и не максимално плоска, в нея няма да се получи подем. Освен това стойността на Q'_H е твърде близка до изискваната от условието (2.63) и входният импеданс на филтъра няма да се различава съществено от съпротивлението на товара в целия честотен обхват на пропускане.

Ако е необходимо да се запази стойността на зададената разделителна честота, може да се използва зависимостта (2.48) за определяне на индуктивността:

$$L''_H = \frac{1}{4 \pi^2 C'_H f_p^2} = 0,4 \text{ mH}.$$

При това условие обаче ще се измени стойността на Q_H :

$$Q''_H = \frac{1}{R_T} \sqrt{\frac{L''_H}{C'_H}} = 1,58.$$

Получената стойност е по-голяма от $\sqrt{2}$ и удовлетворява изискването на условие (2.63). Честотната характеристика ще запази плоския си характер, като ще се отдалечи още повече от максимално плоската характеристика. В резултат на това нивото на

изходното напрежение за разделителната честота ще бъде по-ниско от -3 dB. От (2.51) се определя

$$K_{HP} = \frac{1}{Q_H} = 0,63,$$

$$L_{UH} = -4 \text{ dB}.$$

Консумираната от товара мощност за разделителната честота ще представлява 40 % от мощността, която се консумира при ниски честоти. В резултат на това създаваното звуково налягане с честота на сигнала, равна на разделителната честота, ще бъде с 1 dB по-ниско. Тази разлика не е съществена и е за предпочитане пред другите недостатъци. Следователно приемат се стойностите

$$C_H = 10 \text{ } \mu\text{F}, \quad L_H = 0,4 \text{ mH},$$

при които $f_p = 2500$ Hz и $Q_H = 1,58$.

В действителност разделителната честота на изчисления филтър, ако се спазва определението, че за нея нивото на изходно напрежение трябва да бъде -3 dB, е по-ниска от зададената. Тя може да се определи от зависимостта (2.59). Получава се

$$x_3 = 0,89 \quad \text{или} \quad f_p = 2230 \text{ Hz}.$$

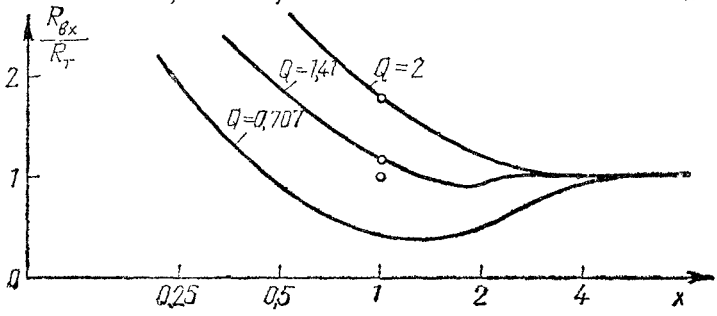
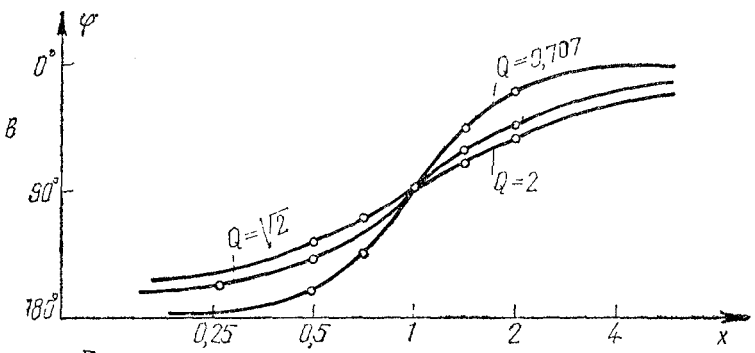
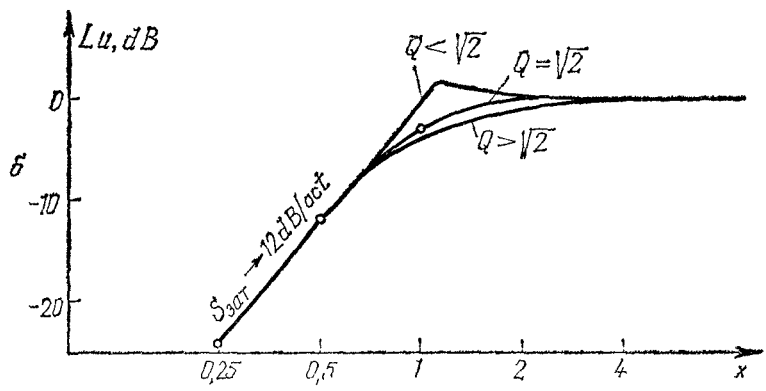
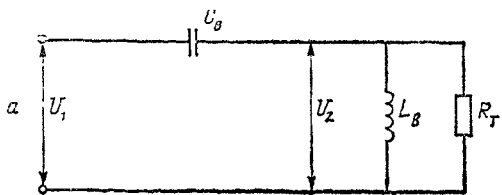
Разликата не е съществена, а разделителната честота на нискочестотния филтър може да бъде малко по-ниска от зададената.

2.4.2. Високочестотен разделителен филтър от втори ред

Принципната електрическа схема на този филтър е дадена на фиг. 2.15 а. Изграден е, както и нискочестотния филтър от втори ред, от реактивни елементи — бобина с индуктивност L_s и кондензатор с капацитет C_s . Разликата е в това, че кондензаторът е свързан последователно на товарното съпротивление R_T , а бобината — паралелно на него. Към краищата на получената електрическа верига се прилага входното напрежение U_1 , а изходното напрежение е спадът върху товара R_T .

Въвеждат се означенията

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}, \quad f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}, \quad (2.66)$$



Фиг. 2,15 I

$$\frac{\omega}{\omega_p} = \frac{f}{f_p} = x, \quad (2.67)$$

$$\frac{\omega_p L_s}{R_T} = \frac{1}{\omega_p C_s R_T} = \frac{1}{R_T} \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} = Q_s. \quad (2.68)$$

Коефициентът на предаване K_s се определя от зависимостта

$$K_s = \frac{\dot{U}_2}{U_1} = \frac{-x^2}{1-x^2+jQ_s x}, \quad (2.69)$$

а неговият модул е

$$K_s = \frac{x^2}{\sqrt{x^4 + (Q_s^2 - 2)x^2 + 1}}. \quad (2.70)$$

Нивото L_{U_s} на изходното напрежение спрямо входното е

$$L_{U_s} = 40 \lg x - 10 \lg [x^4 + (Q_s^2 - 2)x^2 + 1]. \quad (2.71)$$

При високочестотния разделителен филтър от втори ред също се установява, че модулът на коефициента на предаване K_s , респ. L_{U_s} , зависи от нормираната честота x и от Q_s , следователно от честотата f и от елементите на филтърта.

При стойности на x , значително по-големи от единица, коефициентът на предаване клони към единица, а $L_{U_s} \approx 0$ dB. При $x \ll 1$ от (2.74) се получава $K_s \approx x^2$. Оттук следва, че в честотния обхват на непропускане филтърът внася затихване, което намалява с квадрата (втората степен) на честотата, защото коефициентът на предаване нараства с втората степен на честотата. L_{U_s} се изменя със стръмност на затихване $S_{zam} = 12$ dB/oct. Това съответствува на филтър от втори ред. Освен това при $x \rightarrow 0$ коефициентът на предаване също клони към нула, а L_{U_s} клони към минус безкрайност независимо от стойността на параметъра Q_s .

Характерът на честотната характеристика на този филтър в областта на разделителната честота също се определя от стойността на параметъра Q_s .

Високочестотният филтър от втори ред, показан на фиг. 2.15а, също се нарича филтър на Бътърворт. В действителност той може да носи такова наименование само ако елементите и параметрите му отговарят на изискването за получаване на максимално плоска честотна характеристика в честотния обхват на пропускане. Условието за получаване на такава характеристика е аналогична на това при нискочестотния филтър

$$Q_s = \frac{1}{R_T} \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} = \sqrt{2}. \quad (2.72)$$

Като се замести от (2.76) в (2.74) и в (2.75), за модула на коефициента на предаване и за нивото на изходното напрежение спрямо входното се получава

$$K_s = \frac{x^2}{\sqrt{x^4 + 1}}, \quad (2.73)$$

$$L_{Us} = 40 \lg x - 10 \lg(x^4 + 1). \quad (2.74)$$

Зависимостите (2.73) и (2.74) определят плавно изменящи се, максимално плоски криви. Освен това при $x=1$ се получава $K_s = 0,707$ и $L_{Us} = -3$ dB, т. е. разделителната честота на филтъра съвпада с f_p .

На фиг. 2.15 б са построени три честотни характеристики на високочестотния филтър от втори ред при параметър Q_s . От тях се установява, че в честотния обхват около разделителната честота честотната характеристика може да получи подем (при $Q_s < \sqrt{2}$) или нейното ниво да остане сравнително ниско и в честотния обхват над разделителната честота (при $Q_s > \sqrt{2}$). Честотната характеристика, съответстваща на $Q_s < \sqrt{2}$ не е плоска (има подем), честотната характеристика, съответстваща на $Q_s > \sqrt{2}$, е плоска, но нивото ѝ в честотния обхват на пропускане не е достатъчно високо. Честотната характеристика, съответстваща на $Q_s = \sqrt{2}$, е плоска, като нивото ѝ в честотния обхват на пропускане е максимално високо. Затова тази честотна характеристика се нарича максимално плоска. Високочестотният филтър от втори ред, с който може да се получи тази характеристика, се нарича филтър на Батърворт. Независимо от еднаквостта на конфигурацията си останалите разновидности на този филтър (при $Q_s < \sqrt{2}$ и $Q_s > \sqrt{2}$) не следва да се наричат филтри на Батърворт. От дадените на фиг. 2.15 б честотни характеристики се вижда, че честотата, за която нивото на изходното напрежение се понижава с 3 dB, зависи от параметъра Q_s . Аналитично тази честота може да се определи от (2.70) или (2.71). За нормираната честота x_3 , при която $L_{Us} = -3$ dB, се получава

$$x_3 = \sqrt{\frac{Q^2 - 2 + \sqrt{Q^2 - 2)^2 + 4}}{2}}. \quad (2.75)$$

При $Q_s = \sqrt{2}$ от (2.75) се получава $x_3 = 1$, при $Q_s > \sqrt{2}$ стойностите на x_3 се получават по-големи от единица, а при $Q_s < \sqrt{2}$ се получава $x_3 < 1$. От (2.75) може да се получи и стойността на Q_s , за която трябва да се получи определена зададена стойност на x_3 .

При стойности на $Q_s < \sqrt{2}$ съществува една честота f_{smax} , за която коефициентът на предаване K получава максимум, при което $K_{3max} > 1$. Тя се определя от зависимостта

$$f_{smax} = \frac{1}{\pi \sqrt{2L_s C_s (2 - Q_s^2)}}. \quad (2.76)$$

За тази честота може точно да се определи от (2.71) нивото на изходното напрежение. Такава проверка трябва да се прави винаги, когато $Q_s < \sqrt{2}$, за да се знае какъв подем ще се получи в честотната характеристика на филтъра и може ли да се приеме за допустим.

Елементите на високочестотния разделителен филтър от втори ред се определят от следните условия:

— Консумираната от товара мощност при разделителната честота трябва да бъде половината от мощността, която той консумира при честоти, много по-високи от разделителната, т. е. при разделителната честота трябва $K_s = 0,707$ или $L_{U_s} = -3$ dB. От това условие се получи зависимостта (2.75).

— Честотната характеристика да бъде максимално плоска, т. е. филтърът да отговаря на условията за апроксимация по Батърворт. Това се постига при спазване на (2.72). Ако се замести от (2.72) в (2.75), се получава $x_3 = 1$, което е еквивалентно на зависимостта (2.66).

Следователно двете зависимости (2.66) и (2.72) образуват една система и са достатъчни за определяне на елементите на филтъра. От решаването на системата се получава

$$L_s = \frac{R_T}{2\pi f_p}, \quad (2.77)$$

$$C_s = \frac{1}{2\sqrt{2} \pi f_p R_T}. \quad (2.78)$$

Фазовата разлика на високочестотния филтър от втори ред съгласно с (2.69) се определя от зависимостта

$$\varphi_s = 180^\circ + \varphi'_s. \quad (2.79)$$

Фазовият ъгъл φ'_s се определя от израза

$$\operatorname{tg} \varphi'_s = \frac{Q_s x}{1 - x^2}. \quad (2.80)$$

При ниски честоти ($x \ll 1$) фазовият ъгъл φ'_s клони към нула, а фазовата разлика φ_s клони към 180° . С увеличаване на често-

тата x се изменя от 0 до 1, фазовият ъгъл φ'_s се изменя от 0 до -90° , а фазовата разлика φ_s — от 180 до 90° . За самата разделителна честота $\varphi_s = 90^\circ$, т. е. фазовата разлика е два пъти по-голяма от тази при високочестотния филтър от първи ред. За високи честоти ($x > 1$) фазовата разлика се изменя от 90 до 0° . Влиянието на параметъра Q_s се свежда до определяне хода на фазовата характеристика в областта на разделителната честота — при по-големи стойности на Q_s изменението на фазовата разлика става по-бавно. На фиг. 2.15 в са дадени фазовите характеристики на високочестотен филтър от втори ред при параметър Q_s — за същите стойности на Q_s , за които са дадени и честотните характеристики на филтъра.

Входният импеданс на високочестотния разделителен филтър от втори ред въз основа на схемата му се определя от израза

$$\dot{Z}_{sx} = R_T \frac{1 - x^2 + jQ_s x}{j \frac{x}{Q_s} - x^2}, \quad (2.81)$$

а модулът му е

$$Z_{sx} = R_T \sqrt{\frac{(1 - x^2)^2 + Q_s^2 x^2}{x^4 + \frac{x^2}{Q_s^2}}}. \quad (2.82)$$

От (2.82) се установява, че входният импеданс на филтъра се определя освен от товара R_T и нормираната честота също и от Q_s . При разглеждането на нискочестотния филтър от втори ред бе обоснована необходимостта от това входният импеданс на филтъра да бъде поне равен на стойността на включения в изхода му товар. Същото изискване |поради същите съображения е в сила и за високочестотния филтър. Следователно в целия честотен обхват трябва да се удовлетворява изискването

$$\frac{Z_{sx}}{R_T} = \sqrt{\frac{x^4 + (Q_s^2 - 2)x^2 + 1}{x^4 + \frac{x^2}{Q_s^2}}} \geq 1. \quad (2.83)$$

За удовлетворяване на неравенство (2.83) е необходимо

$$Q_s \geq \sqrt{1 + \sqrt{2}} \approx 1,56. \quad (2.84)$$

Елементите на високочестотния филтър могат да се определят по зададена разделителна честота и Q_s , определен от зави-

симостта (2.84). От съвместното решаване на (2.66) и (2.84) се получава

$$L_g = 0,248 \frac{R_T}{f_p}, \quad (2.85)$$

$$C_g = \frac{0,102}{f_p R_T}. \quad (2.86)$$

Необходимо е да се има предвид, че високочестотен филтър от втори ред, чиито елементи са определени от (2.85) и (2.86), не е филтър на Батърворт в точния смисъл на изискването. Неговата честотна характеристика има плавен характер, но не е максимално плоска. Отклонението обаче е незначително и е за предпочитане да се приеме то вместо да се приеме филтър с максимално плоска честотна характеристика, чиито входен импеданс може да се окаже недопустимо малък за някой честотен обхват.

На фиг. 2.15 г са дадени импедансните характеристики на високочестотен филтър от втори ред за същите три стойности на Q_g , за които са дадени честотните и фазовите му характеристики.

Пример 1. Да се изчисли високочестотен разделителен филтър от втори ред при зададени $f_p = 3000$ Hz и $R_T = 4$ Ω .

а. Определя се капацитетът на $C'_g = 9,3$ μF .

Приема се най-близката стандартна стойност $C'_g = 10$ μF , тип МБГП-2 (съветски).

б. Определя се индуктивността $L'_g = 0,30$ mH.

в. Разделителната честота се получава $f'_p = 2900$ Hz.

Получи се малко по-ниска разделителна честота от зададената. По принцип това не крие опасности, ако се вземе предвид при изчисляване елементите на нискочестотния филтър — те да се определят така, че да се получи разделителна честота, не по-висока от 2900 Hz.

г. От (2.68) се определя $Q'_g = 1,37$.

Получава се стойност, която е по-малка от $\sqrt{2}$. Следователно честотната характеристика на филтъра няма да бъде плоска, а за някаква честота ще се получи подем. Тази честота се определя от (2.76) — $f_{smax} = 11\,000$ Hz, а $x_s = 3,8$.

Нивото на изходното напрежение за тази честота се определя от (2.71) при $x = 3,8$ и се получава $L_{U_s} = 0,4$ dB.

Следователно подемът е незначителен.

Друга опасност, която крие малката стойност на Q'_g , е полу-

чаването на входен импеданс, който е по-малък от R_T . От (2.82) за $x=3,8$ и $Q_s=1,37$ се получава

$$Z_{вх}=0,95 R_T=3,8 \Omega.$$

Входният импеданс на филтъра ще бъде само с 5% по-малък от големината на товара. Тази разлика е в границите на производствения толеранс.

д. Приема се по-малкият стандартен капацитет на кондензатора $C_s''=8 \mu\text{F}$, също тип МБГП-2, но 2 броя по $4 \mu\text{F}$.

е. Новата разделителна честота ще бъде $f_p''=3250 \text{ Hz}$.

Разделителната честота се получи по-висока от зададената, а това е за предпочитане при високочестотните филтри.

ж. За Q_s се получава $Q_s''=1,53$.

Тази стойност на Q_s е приемлива независимо от това, че нивото на изходното напрежение при разделителната честота ще бъде по-ниско от -3 dB — $L_{Ув}=-3,7 \text{ dB}$.

Елементите на този филтър може да се определят и от зависимостите (2.85) и (2.86). Получава се

$$C_s'''=8,4 \mu\text{F} \text{ и } L_s''=0,33 \text{ mH}.$$

Капацитетът на кондензатора трябва да се приеме $8 \mu\text{F}$, както бе прието в т. *д.* Бобината може да се приеме обаче с индуктивност $0,33 \text{ mH}$. При тези стойности на елементите се получава $f_p'''=3100 \text{ Hz}$ и $Q_s'''=1,61$.

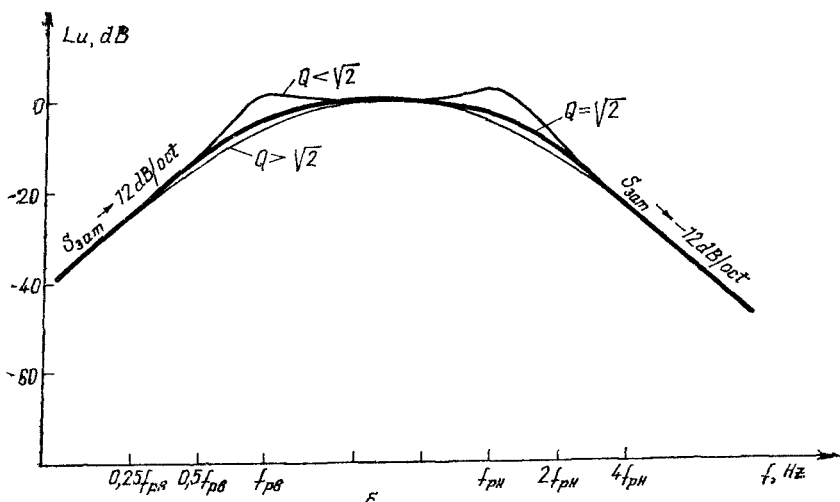
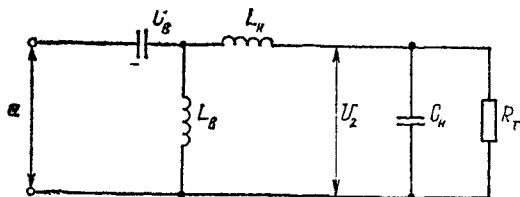
Нивото на изходното напрежение при разделителната честота ще бъде $L_{Ув}=-4,15 \text{ dB}$ — приемлива стойност.

Окончателно се приема: $C_s=8 \mu\text{F}$ и $L_s=0,33 \text{ mH}$.

2.4.2. Средночестотен разделителен филтър от втори ред

Принципната електрическа схема на филтъра е дадена на фиг. 2.16 *а*. Той е изграден от 4 елемента — две бобини и два кондензатора. Строгийт математичен анализ изисква да се определи напрежението върху товара R_T и от него да се определи коефициентът на предаване, но по този начин се получават твърде сложни математични изрази, чийто анализ най-добре може да се извърши с помощта на електронна изчислителна машина. В следващото разглеждане ще се $\frac{1}{2}$ поясни, че влиянието на входния импеданс на високоговорителя, който не е чисто активен, по начало дава отражение върху параметрите на филтрите и винаги се

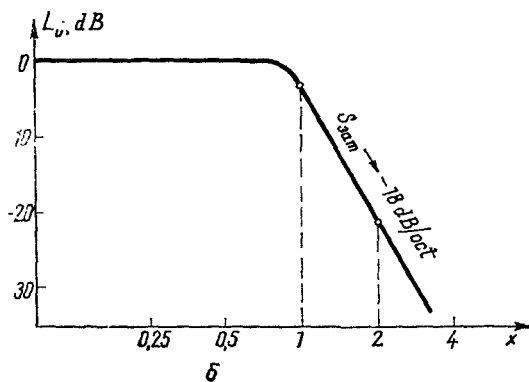
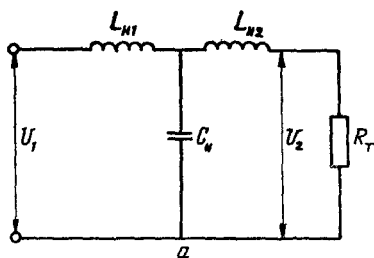
налага донастройка при конкретните условия. Поради това средночестотният филтър от втори ред може да се разглежда, като се направят някои опростявания. Приема се, че средночестотният филтър е изграден от две звена на филтри от втори ред — нис-



Фиг. 2.16 II

кочестотно и високочестотно. Елементите L_n , C_n и R_T образуват един нискочестотен филтър от втори ред, който бе подробно анализиран в т. 2.4.1. При правилно проектиране той ще пропуска сигналите с честота от нула до честотата f_{p0} , която се определя от зависимостта (2.48). В този обхват входният импеданс на филтъра ще бъде приблизително активен по характер, а по стойност — равен на R_T . Това дава основание да се приеме, че зве-

ното, изградено от C_s и L_s , е натоварено с R_T , т. е. това звено представлява един високочестотен филтър с товар R_T . Той ще пропуска сигналите с честота от f_{ps} до много високи честоти, като характеристиката му трябва да бъде плоска. Грешката, която се допуска при това приемане, зависи от съотношението между двете разделителни честоти f_{pn} и f_{ps} . Ако те са близки една до друга, грешката ще бъде значителна, но ако тяхното отношение е от порядъка на 10, допусканата грешка ще бъде в рамките на производствените толеранси. При анализа на средночестотен филтър от първи ред това бе потвърдено. На фиг. 2.16б са показани честотни характеристики на средночестотния филтър при параметър Q , като е прието $Q_n = Q_s$.



Фиг. 2.17

Елементите на филтъра се изчисляват от съответните зависимости за нискочестотния и високочестотния филтър от втори ред, като L_s и C_s се изчисляват за по-ниската разделителна честота, а L_n^1 и C_n — за по-високата.

Пример 1. Да се изчисли средночестотен филтър от втори ред по зададени $R_T = 4 \Omega$, $f_{p\sigma} = 630 \text{ Hz}$ и $f_{p\kappa} = 6300 \text{ Hz}$.

а. Капацитетът на кондензаторите е

$$C_{\kappa} = 4,48 \mu\text{F}; \quad C_{\sigma} = 44,8 \mu\text{F}.$$

За C_{κ} се приема $4,4 \mu\text{F}$ — ще се реализира от паралелното свързване на два кондензатора със стандартен капацитет $C_{\kappa 1} = 2,2 \mu\text{F}$.

За C_{σ} се приема $44 \mu\text{F}$ — ще се реализира от паралелното свързване на два кондензатора с капацитет $C_{\sigma 1} = 22 \mu\text{F}$. Кондензаторите трябва да бъдат неполярни, а нашата промишленост засега не произвежда електролитни неполярни кондензатори.

б. Индуктивностите на бобините са: $L_{\kappa} = 0,142 \text{ mH}$; $L_{\sigma} = 1,42 \text{ mH}$.

в. Разделителните честоти са със стойности $f_{p\kappa} = 6360 \text{ Hz}$; $f_{p\sigma} = 636 \text{ Hz}$, които са съвсем близки до зададените.

г. Стойностите на Q_{κ} и Q_{σ} са $Q_{\kappa} = 1,48$ и $Q_{\sigma} = 1,48$.

С тези стойности се получават гладки честотни характеристики.

2.5. Разделителни филтри от трети ред.

На фиг. 2.17 а е показана принципната схема на нискочестотен филтър от трети ред, а на фиг. 2.17 б — неговата честотна характеристика. Принципната схема на високочестотен филтър от трети ред е дадена на фиг. 2.18 а, а честотната му характеристика — на фиг. 2.18 б. Средночестотният филтър от трети ред се изгражда от свързването на един нискочестотен и един високочестотен филтър от същия ред. Принципната му схема е дадена на фиг. 2.19 а, а честотната му характеристика — на фиг. 2.19 б. При тези филтри коефициентът на предаване в областта на непропускане зависи от третата степен на честотата и затова се наричат от трети ред. Стръмността на срязване е 18 dB/oct .

Елементите на тези филтри се изчисляват от зависимостите:

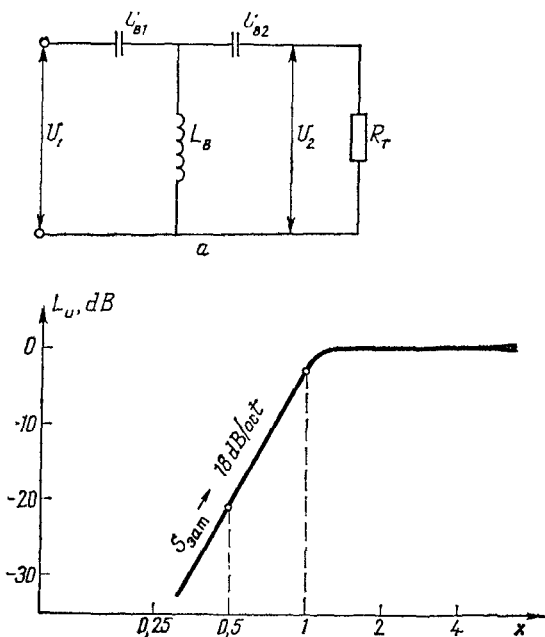
$$L_{\kappa 1} = \frac{(1+m)R_T}{2\pi f_{p\kappa}}; \quad L_{\kappa 2} = \frac{R_T}{2\pi f_{p\kappa}}; \quad C_{\kappa} = \frac{1}{\pi f_{p\kappa} R_T}. \quad (2.87)$$

$$C_{\sigma 1} = \frac{1}{2\pi(1+m)f_{p\sigma}R_T}; \quad C_{\sigma 2} = \frac{1}{2\pi f_{p\sigma}R_T}; \quad L_{\sigma} = \frac{R_T}{\pi f_{p\sigma}R_T}. \quad (2.88)$$

Параметърът m се избира в границите от 0,4 до 0,6.

Разделителните филтри от трети ред рядко се използват, и то предимно като високочестотни. До употреба на такива филтри се прибегва само в случаите, когато високочестотният високоворител не може да издържа въздействието на сигнали с ниска

честота и тяхното ниво трябва да се понижава рязко с намаляване на честотата. Разделителни филтри от трети ред трябва да се използват и в случаите, когато резонансната честота на високочестотния високоговорител е близка до разделителната че-



Фиг. 2.18

стота на филтъра — малко е по-ниска от нея. Трябва да се има предвид обаче, че при филтрите от трети ред в честотния обхват около разделителната честота фазовата разлика се изменя много бързо с изменение на честотата.

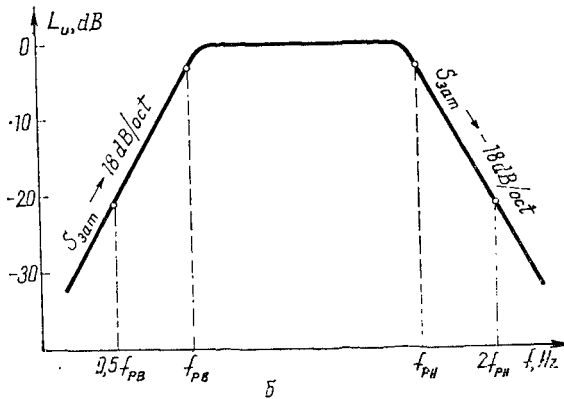
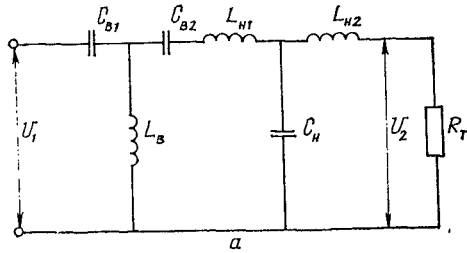
Пример 1. Да се изчисли нискочестотен филтър от трети ред с разделителна честота $f_p=2000$ Hz и $R_T=4$ Ω .

Приема се $m=0,5$ и се определят елементите на филтъра от (2.87): $L_{H1}=0,484$ mH; $L_{H2}=0,321$ mH; $C_H=40$ μ F.

За C_H може да се приеме 39 μ F неполярен електролитен или 40 μ F, като ще се реализира от два паралелно свързани кондензатора с капацитет по 20 μ F, тип МБГ1-2, но трябва да се има предвид, че последните са със значителни размери.

Пример 2. Да се изчисли високочестотен филтър от трети ред с разделителна честота $f_p = 2000$ Hz и $R_T = 4$ Ω .

Приема се $m = 0,5$ и от (2.90) се определят елементите на филтъра: $C_{\theta 1} = 13,3$ μF ; $C_{\theta 2} = 20$ μF ; $L_{\theta} = 0,16$ mH.



Фиг. 2.19

Пример 3. Да се изчисли средночестотен филтър от трети ред с разделителни честоти $f_{p1} = 600$ Hz; $f_{p2} = 5000$ Hz и $R_T = 8$ Ω .

Приема се $m = 0,5$.

Елементите на нискочестотното звено се определят от (2.87) за $f_{p2} = 5000$ Hz: $L_{H1} = 0,386$ mH; $L_{H2} = 0,256$ mH; $C_H = 8$ μF .

Елементите на високочестотното звено се определят от (2.88) за $f_{p1} = 600$ Hz: $C_{\theta 1} = 22$ μF ; $C_{\theta 2} = 33$ μF ; $L_{\theta} = 1,06$ mH.

Капацитетите на всички изчислени кондензатори могат да се реализират точно.

3.1. АКУСТИЧНО ОФОРМЯНЕ НА ВИСОКОГОВОРИТЕЛИТЕ

а. Високоговорител без акустично оформяне

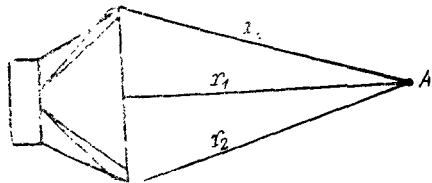
Трептящата система на високоговорителя предизвиква противоположни изменения на състоянието на въздуха от двете си страни — сгъстяването на въздуха от едната страна винаги е съпроводено с разреждането му от другата страна.

Възникват предна и задна звукова вълна, които са дефазирани помежду си на 180° (половин дължина на звуковата вълна). Звуковото налягане в дадена точка от пространството ще бъде сума от звуковите налягания, създавани от предната и задната звукова вълна. На фиг. 3.1 е показан схематично един високоговорител без акустично оформяне. Моментната стойност на звуковото налягане p_A в т. A от работната му ос ще бъде

$$p_A = p_1 + p_2, \quad (3.1)$$

където p_1 е моментната стойност на звуковото налягане, създавано от предната звукова вълна в т. A ;

p_2 — моментната стойност на звуковото налягане, създавано в т. A от задната звукова вълна.



Фиг. 3.1

Ако се допусне, че $p_1 > p_2$, p_A ще зависи главно от фазовата разлика φ_A между p_1 и p_2 , която се определя от разликата между пътищата r_1 и r_2 на двете звукови вълни, изразена в дължина на разпространяваната звукова вълна. При това r_2 —

r_1 е постоянна величина, но за различните честоти тя е различна част от дължината на звуковата вълна.

При много ниските честоти разликата $r_2 - r_1$ е незначителна част от дължината на вълната. Допълнително дефазирание между

p_1 и p_2 не се получава; те остават дефазирани на 180° . Звуковото налягане p_A е минимално.

Условията, при които звуковото налягане в дадена точка е минимално (в частния случай нула) поради създаването на противофазни налягания от предната и задната звукова вълна на високоговорителя, се наричат условия на акустично късо съединение. При тези условия високоговорителят почти не създава звуково налягане в пространството. С увеличаване на честотата дължината на звуковата вълна намалява и разликата $r_2 - r_1$ става съизмерима с нея. При определена честота f_{k1} тя става равна на половин дължина на вълната и фазовата разлика между p_1 и p_2 става равна на 0° (или на 360°). Звуковото налягане p_A достига максимална стойност. Така с увеличаване на честотата от 0 до f_{k1} звуковото налягане в т. А нараства от 0 до някаква максимална стойност. При увеличаване на честотата над f_{k1} между p_1 и p_2 се появява фазова разлика, която расте от 0 до 180° . Звуковото налягане p_A се намалява отново до някакъв минимум, който се получава при честота f_{k2} . Разликата $r_2 - r_1$ за честотата f_{k1} е равна на цяла дължина на вълната. Падини в честотната характеристика на високоговорителя ще се получава за всяка честота, за която

$$r_2 - r_1 = n \lambda. \quad (3.2)$$

Увеличаване на звуковото налягане в т. А ще се получава за честотите, за които разликата $r_2 - r_1$ е равна на нечетен брой полувълни:

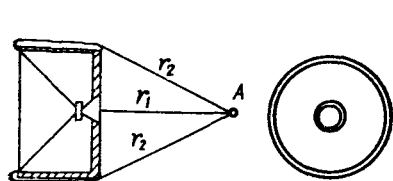
$$r_2 - r_1 = (2n - 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (3.3)$$

б. Акустичен екран

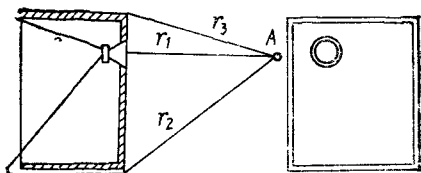
За избягване на акустичното късо съединение в областта на ниските честоти високоговорителите се монтират към някаква акустична преграда, която разделя предното и задното звуково поле и се нарича акустичен екран. Ако преградата е безкрайно голяма, не съществува никакво влияние между тези две полета. В този случай се говори за предно и задно полупространство.

Практически високоговорителите се монтират към акустичен екран с крайни размери, например кутията на радиоприемник или телевизионен приемник. Звуковото налягане в т. А се създава също от предната и задната звукова вълна. Ако високоговорителят е разположен в средата на кутия с цилиндрична форма (фиг. 3.2), условията на акустично късо съединение при ниските честоти се запазват, но разликата в разстоянията $r_2 - r_1$ е по-голяма, т. е.

акустично късо съединение се осъществява само за най-ниските честоти. Съществува обаче честотата f_{r2} , за която звуковото налягане p_A ще бъде минимално. За всяка честота, удовлетворяваща (3.2), ще се получава минимум в звуковото налягане. Висо-



Фиг. 3.2



Фиг. 3.3

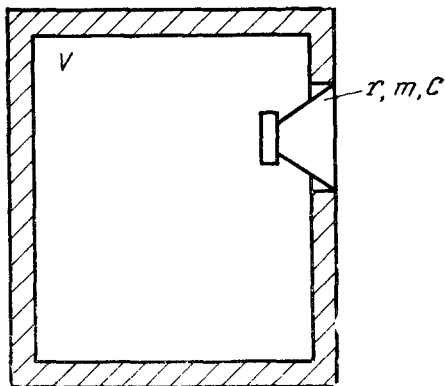
коговорител с акустично оформяне съгласно с фиг. 3.2 ще възпроизвежда твърде неестествено звуковата картина поради наличието на поредица от падни в честотната му характеристика.

На фиг. 3.3 е показан високоговорител, монтиран несиметрично в кутия с паралелепипедна форма. Пътищата, които изминава задната звукова вълна, заобикаляйки кутията в различни точки, са различни. Сумарното звуково налягане, което се създава от задната звукова вълна в т. А, ще се изменя по големина и фаза с изменение на честотата, но не може да стане равно по големина и противоположно по фаза на звуковото налягане, създавано от предната звукова вълна, т. е. не съществуват условия за акустично късо съединение. При най-ниските честоти разликата в пътищата r_2 , r_3 и т. н. е много по-малка от дължината на звуковата вълна и съществуват условия за акустично късо съединение. Но с увеличаване на честотата звуковото налягане нараства плавно, като в честотната характеристика не съществуват стръмни падни.

в. Затворен обем

Прието е долната гранична честота f_0 на системите от Hi-Fi клас да не бъде по-висока от 50 Hz. Стремежът е да се реализират системи с $f_0=30-40$ Hz, а по възможност и 20 Hz. Ако се използва акустичен екран, който осигурява възпроизвеждането на тези ниски честоти без акустично късо съединение, неговите размери трябва да бъдат по-големи от размерите на жилищната стая. Това са явно неприемливи условия.

Начин да се избегне акустично късо съединение е високоговорителят да се монтира към определен затворен обем, при което звукото налягане в пространството ще се създава само от предната звукова вълна. Високоговорител с такова акустично оформяне се нарича озвучително тяло със затворен обем. Обикновено се използва кутия със стени от дървен материал — шперплат или плоскости от дървени частици. Основното изискване към кутията е нейните стени да не се разтрептяват под влияние на звуковото налягане в обема ѝ. Затова в последно време се използват кутии от мрамор или алуминиеви отливки.



Фиг. 3.4

Всеки идеално затворен обем въздух, който се разтрептява през определен отвор, може да се разглежда за ниските честоти (докато размерите са по-малки от дължината на вълната) като съсредоточен акустичен елемент — гъвкавост. Акустичната гъвкавост се определя с израза

$$c_v = \frac{V}{\psi p_s} \quad (3.4)$$

където V е обемът, заграден от кутията;

ψ — константа, която се определя от отношението на специфичните топлини на газа при постоянно налягане и постоянен обем; за въздуха $\psi=1,4$;

p_s — статично налягане; за въздуха от атмосферата на морско равнище $p_s=10^5$ Pa.

Механичната гъвкавост се определя от зависимостта

$$c_{vm} = \frac{c_v}{S^2} = \frac{V}{\psi p_s S^2} \quad (3.5)$$

В случая S е площта на отвора, през който се възбужда звуковото налягане в затворения обем.

3.2. ОЗВУЧИТЕЛНО ТЯЛО СЪС ЗАТВОРЕН ОБЕМ

Трептящата система на озвучително тяло със затворен обем (фиг. 3.4) включва трептящата система на високоговорителя и затворения зад него обем. На фиг. 1.2 е дадена електрическа заместваща схема на електродинамичен високоговорител, монтиран на безкраен акустичен екран. Монтирането на високоговорителя към затворен обем променя някои от неговите параметри. Измененията са следните:

а. Затвореният зад високоговорителя обем въздух за ниските честоти в идеалния случай представлява съсредоточен акустичен елемент — гъвкавост. Масата на присъединения въздух от задната страна на високоговорителя се свежда на нула. В резултат на това се намалява общата маса m на трептящата система на високоговорителя, монтиран към затворения обем, спрямо масата m_0 на монтирания към безкраен екран високоговорител. Тя се определя с израза

$$m = m_0 - \frac{1}{2} m_R. \quad (3.6)$$

б. Високоговорителят излъчва акустична енергия само в предното полупространство. Активните загуби r на високоговорителя, монтиран към затворен обем, се определят с израза

$$r = r_0 - \frac{1}{2} r_R. \quad (3.7)$$

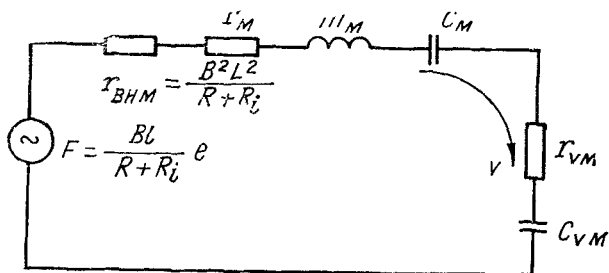
където r_0 са активните загуби на високоговорителя, монтиран към безкраен акустичен екран, а r_R е съпротивлението на излъчване.

В действителност активните загуби r и масата m на монтирания към затворен обем високоговорител ще бъдат по-големи от определените от (3.6) и (3.7) стойности поради това, че обемът не може да се затвори идеално. Освен това звукопоглъщащият материал също оказва известно влияние. Обаче грешката, която се допуска, като се приемат равенствата (3.6) и (3.7), не е съществена.

Гъвкавостта на окачване на трептящата система на високоговорителя остава непроменена.

Сгъстяването (свиването) и разреждането на въздушния обем зад високоговорителя се осъществява със същата скорост на трептене, с която трепти подвижната система на високоговорителя. Изменението на състоянието на затворения обем въздух поражда една сила на реакцията, която се сумира със силите на реакцията на елементите на трептящата система на високогово-

рителя. Сумата от всички сили на реакцията се уравновесява от електродинамичната сила, възникваща при функционирането на високоговорителя. Следователно механичният импеданс на затворения обем е свързан във възел с механичните импеданси на еле-



Фиг. 3.5

ментите на трептящата система и в електрическата еквивалентна заместваща схема на електромеханичния преобразувател гъвкавостта на затворения обем ще се окаже последователно свързана с останалите елементи на трептящата система на високоговорителя.

На фиг. 3.5 е показана еквивалентната електрическа схема на озвучително тяло със затворен обем. Означенията са:

B — средната за височината на звуковата бобина стойност на магнитната индукция в работната въздушна междина на магнитната система на високоговорителя;

l — дължина на проводника на звуковата бобина;

R — електрическото съпротивление на звуковата бобина на високоговорителя;

R_t — вътрешното съпротивление на усилвателя, захранващ високоговорителя, което обикновено се пренебрегва;

e — е. д. н. на усилвателя;

$r_{\text{в.м}}$ — активни механични загуби в обема на озвучителното тяло;

$C_{\text{в.м}}$ — механичната гъвкавост на затворения в обема въздух;

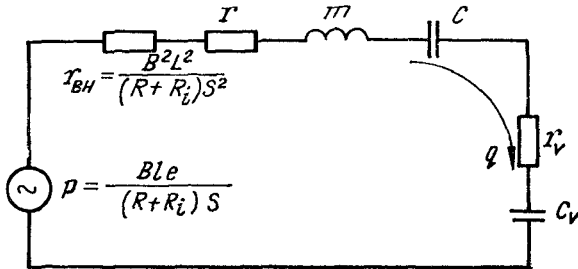
v — скоростта на трептене на трептящата система;

F — електродинамичната сила, движеща системата.

На фиг. 3.6 е дадена същата схема, като механичните елементи са заместени с акустични, а скоростта v — с обемната скорост q :

$$r = \frac{r_M}{S^2}; \quad m = \frac{m_M}{S^2}; \quad c = c_M S^2; \quad (3.8)$$

$$r_v = \frac{r_{vM}}{S^2}; \quad c_v = c_{vM} S^2.$$

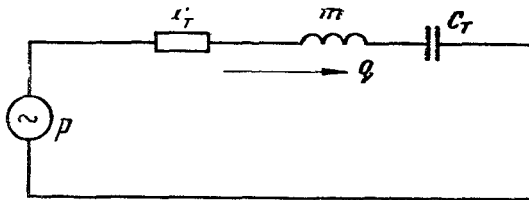


Фиг. 3.6

Схемата от фиг. 3.6 може да се опрости, като се обединят последователно свързаните еднакви елементи в нея и се получава схемата, дадена на фиг. 3.7. Елементите в нея са:

$$r_T = r + r_v + r_{вн}; \quad (3.9)$$

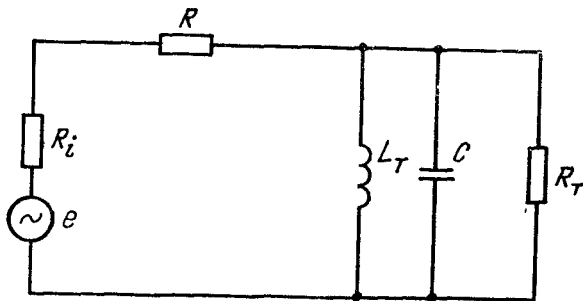
$$c_T = \frac{c c_v}{c + c_v}. \quad (3.10)$$



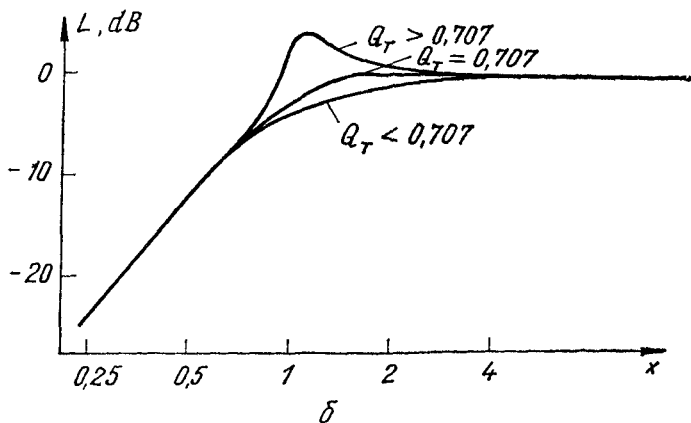
Фиг. 3.7

За анализа на озвучително тяло със затворен обем е необходимо да се състави и неговата електрическа еквивалентна схема. То се разглежда като консуматор на електрическа енергия, свързан към усилвател с е. д. н. e и изходно съпротивление R_i . Та-

зи схема може да се състави на базата на схемата от фиг. 1,2, като се приведат акустичните елементи към електрическия вход на преобразувателя. Получава се схемата, дадена на фиг. 3.8 а, в която елементите имат следното значение:



а



Фиг. 3.8

$$C = \frac{mS^2}{B^2 l^2}; \quad (3.11)$$

$$R_T = \frac{B^2 l^2}{(r+r_0)S^2}; \quad (3.12)$$

$$L_T = \frac{c_T B^2 l^2}{S^2}. \quad (3.13)$$

Индуктивността на звуковата бобина е пренебрегната, тъй като разглеждането е за областта на ниските честоти, където влиянието ѝ е незначително.

За да се получат по-прости математични зависимости, целесъобразно е да се направят следните полагания:

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{m c_T}} = \frac{1}{\sqrt{C L_T}} \quad \text{— резонансна честота на озвучителното тяло;} \quad (3.14)$$

$$Q_m = \omega_0 C R_T \quad \text{— механичен качествен фактор;} \quad (3.15)$$

$$Q_e = \omega_0 C R \quad \text{— електрически качествен фактор;} \quad (3.16)$$

$$Q_{T1} = \frac{Q_m Q_e}{Q_m + Q_e} \quad \text{— пълен качествен фактор при } R_i = 0; \quad (3.17)$$

$$Q_T = \frac{1}{\omega_0 c_T r_T} \quad \text{— пълен качествен фактор;} \quad (3.18)$$

$$\alpha = \frac{c}{c_v}. \quad (3.19)$$

Обемът, съответстващ на акустичната гъвкавост на окачането на високоговорителя, е

$$V_c = \psi p_s c \quad (3.20)$$

или
$$V_c = \psi p_s c_m S^2. \quad (3.21)$$

От сравняването на (3.19), (3.10), (3.14), (1.12), (3.16) и (1.13 б) се получава

$$\frac{c}{c_T} = \alpha + 1, \quad (3.22)$$

$$\frac{f_0}{f_p} = \sqrt{\alpha + 1}, \quad (3.23)$$

$$\frac{Q_e}{Q_{ep}} = \sqrt{\alpha + 1}. \quad (3.24)$$

Полага се

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0} = x. \quad (3.25)$$

Предавателната характеристика на системата за обхвата на ниските честоти, за който са в сила еквивалентните схеми от фиг. 3.7 и фиг. 3.8 а, се определя със зависимостта

$$G(j\omega) = \frac{x^2}{x^2 - 1 - j \frac{x}{Q_T}}. \quad (3.26)$$

Модулът на функцията е

$$G = \frac{x^2}{\sqrt{(x^2-1)^2 + \frac{x^2}{Q_T^2}}} = \frac{x^2}{\sqrt{x^4 + \left(\frac{1}{Q_T^2} - 2\right) x^2 + 1}}, \quad (3.27)$$

а нивото ѝ спрямо $G=1$ е

$$L = 20 \lg \frac{x^2}{\sqrt{x^4 + \left(\frac{1}{Q_T^2} - 2\right) x^2 + 1}}. \quad (3.28)$$

На фиг. 3.8 б са дадени няколко честотни характеристики при параметър Q_T , изчислени теоретично от (3.28). По принцип зависимостта (3.28) е еквивалентна на зависимостта за коефициента на предаване на високочестотен филтър от втори ред. Максимално плоската характеристика се получава при $Q_T = 0,707$, а функцията (3.28) в този случай е функция на високочестотен филтър на Батърворт от втори ред. При $Q_T < 0,707$ предавателните характеристики имат плосък характер, но не максимално плосък. При $Q_T > 0,707$ предавателните характеристики не са плоски, тъй като се проявява подем в околността на $x=1$, който нараства с увеличаването на Q_T . При $x \gg 1$ всички криви клонят към $G=1$, $L=0$ dB. Честотата, за която отдаваната акустична мощност намалява 2 пъти или с 3 dB, може да се определи, като (3.27) се приравни на 0,707. Получава се

$$x_3 = \frac{f_3}{f_0} = \sqrt{\frac{1}{Q_T^2} - 2 + \sqrt{\left(\frac{1}{Q_T^2} - 2\right)^2 + 4}}. \quad (3.29 a)$$

Обикновено неравномерността на честотната характеристика на озвучителните тела е голяма и понижаването на нивото за граничните честоти на честотния обхват е 6 до 8 dB спрямо средното ниво. От тези съображения е по-целесъобразно да се определи честотата, за която нивото се понижава с 6 dB. Като се приравни (3.27 б) на 0,5 и се реши спрямо x , се получава

$$x_6 = \frac{f_6}{f_0} = \sqrt{\frac{1}{Q_T^2} - 2 + \sqrt{\left(\frac{1}{Q_T^2} - 2\right)^2 + 12}}. \quad (3.29 б)$$

Изведените зависимости са достатъчни за точното конструиране на озвучителни тела със затворен обем. Разбира се, става

въпрос само за точното определяне характеристиката на озвучителното тяло за обхвата на ниските честоти.

Пример 1. Да се определят нискочестотните параметри на озвучително тяло със затворен обем по зададени обем $V=20 \text{ dm}^3$ и високоговорител тип НД20В25Н2С9.

За високоговорителя е известно:

$$f_p=27 \text{ Hz}, \quad c_m=1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1}, \quad m_u=20,9 \text{ g}, \\ S=0,02 \text{ m}^2, \quad Q_{mp}=4,21, \quad Q_{ep}=0,53, \quad Q_{Tp}=0,47.$$

Необходимо е да се определи коефициентът α . За целта се определя $V_c=95,2 \text{ dm}^3$.

$$\text{Коефициентът } \alpha = \frac{V_c}{V} = 4,76.$$

Като се знае α , могат да се определят основните параметри на озвучителното тяло:

резонансна честота $f_0=65 \text{ Hz}$;

електрически качествен фактор $Q_e=1,27$;

пълен качествен фактор (при $R_i=0$) $Q_{TI}=0,98$;

номиналният импеданс на използвания високоговорител е 4Ω , високоговорителят трябва да се захранва от усилвател с много малко вътрешно съпротивление, затова се приема $R_i=0$;

качествен фактор $>0,707$;

честотата f_3 , за която изходното ниво се понижава с 3 dB спрямо средното, се определя от (3.29 а) — $x_3=0,783$, а $f_3=50,5 \text{ Hz}$;

честотата f_6 , за която изходното ниво се понижава с 6 dB спрямо средното, се определя от (3.29 б) — $x_6=0,655$; а $f_6=42,5 \text{ Hz}$.

Следователно озвучителното тяло със затворен обем ще възпроизвежда ефективно сигналите с честота, по-висока от $42,5 \text{ Hz}$

Нивото на звуковото налягане, което ще създава озвучителното тяло, зависи от характеристикната чувствителност на високоговорителя, тъй като акустичното наговарване не допринася за съществено намаляване на чувствителността на високоговорителя. След монтиране в озвучително тяло нивото, създавано от високоговорителя, се понижава с 1 до 2 dB , и то за обхвата на най-ниските честоти.

При направените изчисления бе прието, че активните механични загуби в обема на озвучителното тяло са пренебрежимо малки — $r_v=0$, което е вярно само ако в обема не е поставен звукопоглъщащ материал.

Пример 2. Да се определи подходящ високоговорител за озвучително тяло с обем $V=20 \text{ dm}^3$, чиято честотна характеристика в обхвата на ниските честоти трябва да бъде максимално

пловка, а честотата, за която нивото се понижава с 3 dB, $f_3 = 45$ Hz.

За максимално пловка характеристика е необходимо $Q_T = 0,707$.

От (3.29 a) за $Q_T = 0,707$ се определя $x_3 = 1$; $f_3 = f_0 = 45$ Hz.

В обема на озвучителното тяло ще се постави звукопоглъщащ материал, който ще внесе механични загуби и общият механичен качествен фактор може да се приеме $Q_m = 4,5$. Приема се $\alpha = 5$.

От (3.17) (при $R_i = 0$, $Q_T = Q_{T1}$) се получава $Q_e = 0,84$.

Резонансната честота на високоговорителя трябва да бъде $f_p = 18,5$ Hz, а електрическият му качествен фактор $Q_{ep} = 0,342$.

Обемът V_c , еквивалентен на гъвкавостта на окачване на високоговорителя, при незапълнен със звукопоглъщащ материал обем на озвучителното тяло трябва да бъде $V_c = \alpha V = 100$ dm³.

Акустичната гъвкавост на високоговорителя трябва да бъде $c_p = 0,71 \cdot 10^{-6}$ m⁵ N⁻¹.

Обикновено в каталозите на фирмите се обявява механичната гъвкавост на произведените от тях високоговорители и еквивалентната звукопоглъщаща повърхност. Следователно трябва да се търси високоговорител, за който производението от механичната му гъвкавост и квадрата на еквивалентната звукоизлъчваща повърхност да дава изчислената стойност — $c_{mp} S^2 = c_p = 0,71 \cdot 10^{-6}$ m⁵ N⁻¹. Акустичната маса на трептящата система на високоговорителя трябва да бъде $m_p = m = 104$ kg · m⁻⁴.

За масата също трябва да се има предвид, че се обявява механичната маса на трептящата система и трябва да се търси високоговорител, за който частното от масата и квадрата на звукоизлъчващата повърхност да е равно на изчислената стойност.

Изчислените параметри за високоговорителя са достатъчни за избирането му. За съжаление изборът не може да се направи точно, тъй като дадена фирма произвежда 10—15 типа ниско-честотни високоговорители и на два или три от тях някои от параметрите ще съвпадат с изчислените.

От българските високоговорители с най-близки параметри е тип ВВК201Б4. За него $c_{mp} S^2 = 0,64 \cdot 10^{-6}$ m⁵ N⁻¹, динамичната акустична маса обаче е $m_p = 0,45 \cdot 10^2$ kg · m⁻⁴, т. е. много по-малка от изчислената. В резултат на това и резонансната честота не отговаря на изискванията — тя е 30 Hz, а съгласно изчисленията се изисква 18,5 Hz. Електрическият качествен фактор също значително се различава от изчисления. Следователно няма подходящ български високоговорител, с който да се реализира озвучително тяло, отговарящо на изискванията на заданието.

От направената справка се оказа, че няма подходящ високоговорител, произвеждан и от други фирми.

Налага се един твърде важен извод — ако са зададени определени изисквания за създаване на озвучително тяло, ще трябва да се конструира и специален за него високоговорител.

За решаване на поставената задача може да се приеме друга стойност на α , например $\alpha' = 2$.

За резонансната честота на високоговорителя се получава $f'_{p_{\text{рез}}} = 26$ Hz, за електрическият му качествен фактор $Q_e = 0,484$, за акустичната гъвкавост на окачване $c'_p = 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^5 \text{ N}^{-1}$ и за акустичната трептяща маса $m'_p = 134 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4}$.

Със сравнително близки параметри се оказа високоговорителят HD17B25H4C12 на френската фирма Audax. Неговата резонансна честота е $27,5 \pm 3$ Hz — отговаря на изискването; акустичната му гъвкавост на окачване е $c_p = 0,284 \cdot 10^{-6} \text{ m}^5 \text{ N}^{-1}$; акустичната му маса е $m_p = 124 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4}$ — отговаря на изискването. Електрическият качествен фактор обаче е $Q_{ep} = 0,20$, т. е. той е значително по-малък от изчисления. Може да се приеме по-малка стойност на механичния качествен фактор на озвучителното тяло.

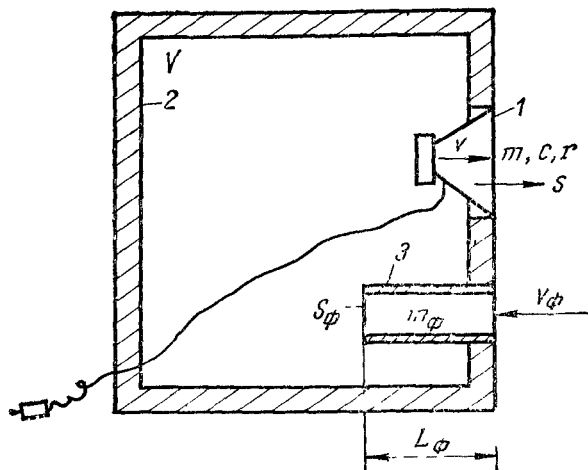
3.3. ОЗВУЧИТЕЛНО ТЯЛО С ФАЗОИНВЕРТОР

Принципната конструкция (в разрез) на озвучително тяло с фазоинвертор (басрефлекс) е дадена на фиг. 3.9 а. Това е озвучително тяло, към което е направен допълнителен отвор, свързващ затворения обем с пространството, в което високоговорителят създава звуковото поле. Обикновено отворът представлява една тръба 3 със сечение S_ϕ и дължина L_ϕ . Предназначението на басрефлекса е да подобри излъчването на озвучителното тяло в областта на ниските честоти.

Мембраната на високоговорителя при движението си навътре към затворения обем предизвиква съгъстяване на въздуха; налягането в обема се увеличава. На входа на фазоинвертора действа определена сила, породена от налягането в обема. Тя привежда в движение въздушната маса на фазоинвертора. От изхода на фазоинвертора в околното пространство се предизвиква съгъстяване на въздуха, т. е. възбужда се звукова вълна. В следващия момент мембраната на високоговорителя се придвижва назад и също предизвиква съгъстяване на въздуха пред себе си, т. е. също възбужда звукова вълна. Ако двете звукови вълни, създадени от мембраната на високоговорителя и от изходния от-

вор на фазоинвертора, са във фаза, звуковото налягане p_A в пространството пред озвучителното тяло ще се увеличи; то ще бъде равно на алгебричната сума от двете звукови налягания:

$$p_A = p_s + p_\phi, \quad (3.30 a)$$



Фиг. 3.91

където p_s е моментната стойност на звуковото налягане, създавано от високоговорителя;

p_ϕ — моментната стойност на звуковото налягане, създавано от фазоинвертора.

По такъв начин фазоинверторът използва енергията на задната звукова вълна за излъчване на звукова енергия в пространството на предната звукова вълна.

Двете звукови вълни могат да бъдат във фаза само ако фазоинверторът създава звуковата вълна със закъснение от половин период. Във всички останали случаи те са дефазирани помежду си и общото звуково налягане ще бъде по-малко от сумата на p_s и p_ϕ . Разбира се, и в този случай звуковото налягане p_A може да бъде по-голямо от звуковото налягане p_s , създавано само от високоговорителя. Това се получава при малка фазова разлика между p_s и p_ϕ или ако $p_\phi \gg p_s$. Звуковото налягане p_ϕ се създава чрез гъвкавостта на обема на кутията и масата на въздуха, който се намира във фазоинвертора, и възниква със закъснение в пространството пред озвучителното тяло. Когато това

закъснение е малко в сравнение с периода на възпроизвеждания сигнал, p_ϕ е почти в противофаза на p_s и ако двете налягания са приблизително равни, резултатното налягане е по-малко от p_s , т. е. ефектът е отрицателен.

За дадена честота, определена от акустичната гъвкавост на обема c_v и акустичната маса на фазоинвертора m_ϕ , трептящата система се намира в състояние на резонанс. Тази честота се нарича резонансна честота на фазоинвертора f_ϕ . Тя се определя от зависимостта

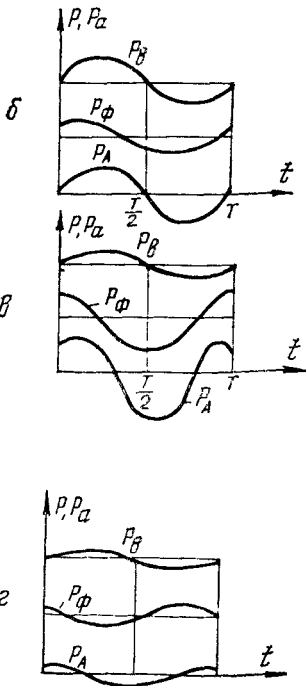
$$f_\phi = \frac{1}{2\pi \sqrt{c_\phi m_\phi}} \quad (3.30 б)$$

Обикновено резонансната честота на фазоинвертора е равна или малко по-ниска от резонансната честота на високоговорителя.

На фиг. 3.9 е показано как се получава общото звуково налягане в резултат на излъчването на високоговорителя и фазоинвертора за различни честоти. Фиг. 3.9 б отразява състоянието за сигнал с честота f , малко по-ниска от резонансната честота на фазоинвертора f_ϕ . Звуковото поле, създавано от високоговорителя p_s , е по-голямо от това, създавано от фазоинвертора p_ϕ , но все пак общото звуково налягане p_A е по-голямо от p_s .

Фиг. 3.9 в отразява състоянието за $f = f_\phi$. В случая $p_\phi > p_s$ и общото звуково налягане p_A е значително по-голямо от p_s . Фиг. 3.9 г отразява състоянието за $f < f_\phi$. В този случай $p_\phi \approx p_s$, като двете налягания са почти противофазни и общото звуково налягане е $p_A < p_s$.

В обхвата на ниските честоти мембраната на високоговорителя трепти като бутало. В този обхват елементите на трептящата система на високоговорителя може да се разглеждат като съсредоточени и независещи от честотата механични или акустични



Фиг. 3.9 II

параметри, затвореният от обема на озвучителното тяло въздух — като съсредоточена гъвкавост, а масата на трептящия в гърлото на фазоинверсията отвор въздух и предизвиканите от това трептене загуби — като съсредоточени маса и съпротивление на активните механични (акустични) загуби. Освен това известна част от звуковата енергия се поглъща в обема на озвучителното тяло и трябва да се предвидят загуби в обема. Друга част от звуковата енергия се губи поради преминаване на звукови вълни от обема на озвучителното тяло към околното пространство, тъй като самата кутия не винаги е затворена херметически, уплътняването на високоговорителя към лицевия панел трудно може да се херметизира, звукопроницаема (слабо) е самата мембрана на високоговорителя, звукови вълни преминават през въздушната междина на магнитната система (заобикаляйки звуковата бобина) и предпазната шапка на високоговорителя. Тези загуби също трябва да се вземат предвид.

Еквивалентната електрическа схема на трептящата система на озвучителното тяло с фазоинвертор може да се състави, като се приеме за база аналогичната схема за озвучително тяло със затворен обем и направените по-горе уточнения. Тя е дадена на фиг. 3.10 а, където означенията са като на фиг. 3.5 и са следните:

c_{vm} — гъвкавост на затворения обем;

r_{vm} — активни механични загуби в обема;

r_{Lm} — активни механични загуби, дължащи се на общата звукопроницаемост на озвучителното тяло;

$m_{фм}$ — маса на въздуха, който трепти в отвора на фазоинвертора, включваща и масата на присъединения въздух;

$r_{фм}$ — активни механични загуби в отвора на фазоинвертора; v, v_1, v_L и v_2 са съответните скорости на трептене.

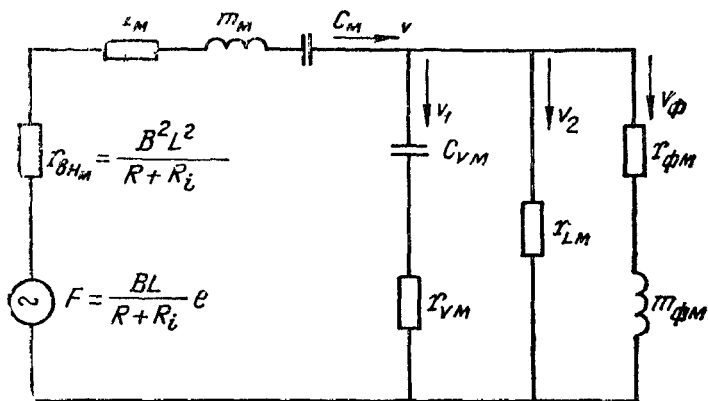
При съставяне на схемата са пренебрегнати: индуктивността на звуковата бобина, чийто реактанс в областта на ниските честоти е пренебрежимо малък, и съпротивлението на излъчване поради малката му стойност.

За рационализиране на анализа е целесъобразно да се опрости схемата от фиг. 3.10 а. Активните механични съпротивления r_{vm} и $r_{фм}$ могат да се пренебрегнат, тъй като на практика се оказват много по-малки от r_{Lm} . Тяхното влияние върху акустичната система може да се включи в r_{Lm} . Освен това могат да се обединят r_m и $r_{вн}$:

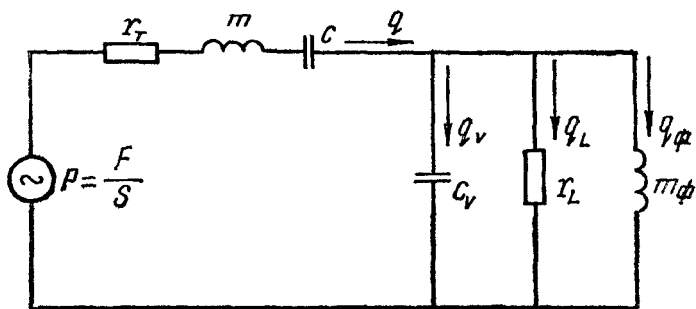
$$r_{Tm} = r_m + r_{вн} = r_m + \frac{B^2 L^2}{R + R_i} \quad (3.31)$$

Опростената по този начин схема може да се замени с еквивалентна електрическа схема с акустични параметри — фиг. 3.10 б. Това е направено, като силата е разделена на S , а съответните импеданси — на S^2 , където S е еквивалентната звукоизлъчваща повърхност на мембраната на високоговорителя. Например:

$$r_T = \frac{R_{T_M}}{S^2}; \quad p = \frac{F}{S}; \quad c_v = c_{v_M} S^2.$$



а

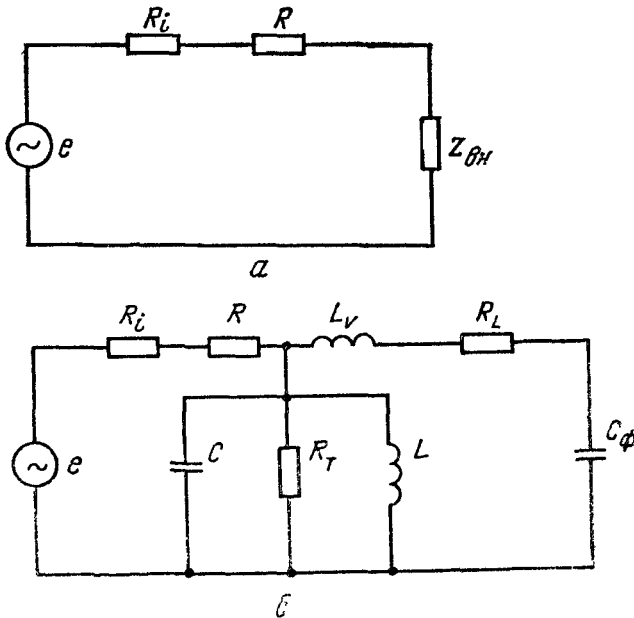


б

Фиг. 3.10

Еквивалентната електрическа заместваща схема на озвучителното тяло с фазоинвертор (на неговата електрическа страна) може да се състави, като се вземе предвид, че електрическите параметри са същите, както и за един високоговорител без аку-

стично оформяне и към тях се прибавя внесеният електрически импеданс $Z_{вн}$, дължащ се на процесите в механичния изход на високоговорителя — фиг. 3.11 а. Акустичният товар на високоговорителя, монтиран в озвучително тяло с фазоинвертор, е една



Фиг. 3.11

сравнително сложна акустична система. Схемата на внесения електрически импеданс може да се получи, като механичните параметри се приведат към електрически съгласно зависимостта

$$Z_{вн} = \frac{B^2 L^2}{Z_{м}}. \quad (3.32)$$

В електрическата схема се свързват последователно онези импеданси, които в механичната схема са били свързани паралелно и обратно. По този начин е изградена пълната електрическа заместваща схема на озвучителното тяло с фазоинвертор, дадена на фиг. 3.11 б. Елементите в нея са:

$$L_v = c_{vm} B^2 L^2 \text{ — съответствува на гъвкавостта на обема;} \quad (3.33 \text{ а})$$

$$R_L = \frac{B^2 L^2}{r_{Lm}} \text{ — съответствува на механичните загуби от звукопроницаемост на обема; } \quad (3.33 \text{ б})$$

$$C_\phi = \frac{m_{\phi m}}{B^2 L^2} \text{ — съответствува на масата на трептящия във фазоинверсията отвор въздух; } \quad (3.34)$$

$$R_T = \frac{B^2 L^2}{r_m} \text{ — съответствува на механичните загуби в окачването на високоговорителя; } \quad (3.35)$$

$$C = \frac{m_m}{B^2 L^2} \text{ — съответствува на динамичната маса на високоговорителя; } \quad (3.36)$$

$$L = c_m B^2 L^2 \text{ — съответствува на гъвкавостта на окачването на високоговорителя. } \quad (3.37)$$

За опростяване анализа на работата на озвучителното тяло и интерпретацията на аналитичните зависимости, описващи неговото функциониране, е целесъобразно да се въведат някои обобщени параметри на озвучителното тяло:

$$\omega_\phi = 2\pi f_\phi = \frac{1}{T_\phi} = \frac{1}{\sqrt{c_v m_\phi}} = \frac{1}{\sqrt{C_\phi L_v}} \text{ — } \quad (3.38)$$

резонансна честота на масата на фазоинверсията отвор с гъвкавостта на обема;

$$Q_L = \omega_\phi c_v r_L = \frac{1}{\omega_\phi C_\phi R_L} \text{ —}$$

качествен фактор от звукопроницаемостта на обема; (3.39 а)

$$Q_\phi = \frac{1}{\omega_\phi c_v r_\phi} \text{ —}$$

качествен фактор от загубите във фазоинверсията отвор. (3.39 б)

Параметри, отразяващи взаимодействието на високоговорителя с кутията на озвучителното тяло:

$$\alpha = \frac{c}{c_v} = \frac{L}{L_v} = \frac{V_c}{V} \text{ — коефициент на гъвкавост; } \quad (3.40)$$

$$h = \frac{f_\phi}{f_p} = \frac{\omega_\phi}{\omega_p} = \frac{T_p}{T_\phi} \text{ — коефициент на настройка; } \quad (3.41)$$

$$Q_T = \frac{1}{\omega_p c r_T} \text{ — пълен качествен фактор. } \quad (3.42)$$

Точният и пълен анализ на озвучителното тяло с фазоинвертор трябва да се извърши на базата на еквивалентната му заместваща схема, като се използват въведените обобщени параметри и се изведе аналитична зависимост за създаването звуково налягане в

пространството. Изводът на аналитична зависимост е свързан с редица математични операции, които излишно ще затруднят читателя. В редица литературни източници [1, 34] се съдържа търсената зависимост, която ще бъде приведена съобразно възприетите в книгата означения. В [1] е доказано, че к. п. д. на озвучително тяло с фазоинвертор може да се представи във вида

$$\eta = \frac{\rho}{4\pi c} \cdot \frac{B^2 L^2}{RmS^2} \cdot \eta_{11}(f), \quad (3.43)$$

където

ρ е плътността на въздуха;
 c — скоростта на разпространение на звука във въздуха;
 $\eta_{11}(f)$ — функция на честотата.

Първите два множителя на (3.43) не зависят от честотата и нямат отношение към хода на честотната характеристика, а само към нивото ѝ. Последният множител определя хода на честотната характеристика. Множителят $\eta_{11}(f)$ има вида

$$\eta_{11}(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{A_1}{x^2} + \frac{A_2}{x^4} + \frac{A_3}{x^6} + \frac{A_4}{x^8}}}, \quad (3.44)$$

където $x = \frac{f}{f_p}$; (3.45)

$$A_1 = \frac{1}{Q_T^2} - 2 - 2\alpha - 2h^2; \quad (3.46)$$

$$A_2 = \left(1 + \alpha\right)^2 + h^2 \left(4 + 2\alpha + h^2 - \frac{2}{Q_T^2}\right); \quad (3.47)$$

$$A_3 = h^2 \left(\frac{h^2}{Q_T^2} - 2 - 2\alpha - 2h^2\right); \quad (3.48)$$

$$A_4 = h^4. \quad (3.49)$$

Зависимостта (3.44) е функцията на високочестотен филтър от четвърти ред. Неговата честотна характеристика освен от нормираната честота x зависи от обобщените параметри на озвучителното тяло — α , h и Q_T . Явно е, че четирите коефициента пред степените на x не могат да бъдат едновременно нули, тъй като те зависят само от три величини.

Сравнително големият брой параметри на системата, които могат да се изменят в определени граници, дава възможност да се

реализират голям брой озвучителни тела с фазоинвертор, чиито честотни характеристики могат съществено да се различават помежду си. Естествено е, че трябва да се търси такова решение, при което честотната характеристика да бъде равномерна, а честотният обхват на ефективно възпроизвеждане — по възможност по-широк. Съществува възможност за реализация на няколко типа честотни характеристики, всяка от които е оптимална за своя тип.

Честотна характеристика, съответстваща на *филтър на Батърворт от четвърти ред*, може да се получи, като се приравнят на нула коефициентите пред x^2 , x^4 и x^6 :

$$A_1 = \frac{1}{Q_T^2} - 2 - 2\alpha - 2h^2 = 0;$$

$$A_2 = \left((1 + \alpha)^2 + h^2(4 + 2\alpha + h^2) - \frac{2}{Q_T^2} \right) = 0;$$

$$A_3 = h^2 \left(\frac{h^2}{Q_T^2} - 2 - 2\alpha - 2h^2 \right) = 0.$$

От решаването на системата се получава:

$$h = 1; \alpha = 1,414; Q_T = 0,383. \quad (3.50 a)$$

При тези условия аналитичната зависимост на високочестотния филтър на Батърворт от четвърти ред има вида

$$\eta_n(f) = \frac{x^4}{\sqrt{1+x^8}}, \quad (3.50 б)$$

Честотната характеристика на озвучително тяло с фазоинвертор, изчислена от (3.50 б), е дадена на фиг. 3.12 — *крива 1*.

Честотна характеристика, съответстваща на *филтър на Чебишев от четвърти ред*, се получава при следните условия:

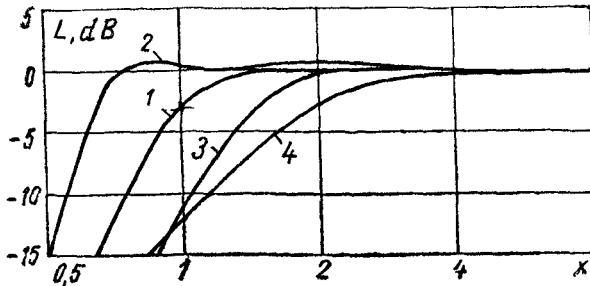
$$A_1 < 0, A_3 < 0, A_2 > 0, A_4 > 0. \quad (3.51)$$

Решението на неравенствата дава

$$Q_T > 0,383, h < 1, \alpha < 1,414.$$

Характеристиките на високочестотен филтър на Чебишев от четвърти ред се характеризират с наличие на честотни обхвати от областта на пропускане, в които има подем. Те се наричат равновълнови характеристики. В зависимост от допустимата неравномерност на честотната характеристика в областта на пропускане могат да се получат различни честотни характеристики. Възможно

е да се реализира озвучително тяло с фазоинвертор, чиято долна гранична честота (f_3) е по-ниска от резонансната честота на високоговорителя, ако честотната му характеристика съответствува на високочестотен филтър на Чебишев от четвърти ред.



Фиг. 3.12

На фиг. 3.12 (крива 2) е дадена честотната характеристика на озвучително тяло с фазоинвертор, съответстваща на филтър на Чебишев от четвърти ред при $Q_T=0,5$; $\alpha=0,61$ и $h=0,78$, съгласно [1].

Ако се положи

$$A_1 = \frac{1}{Q_T^2} - 2 - 2\alpha - 2h^2 = 0, \quad (3.52 \text{ а})$$

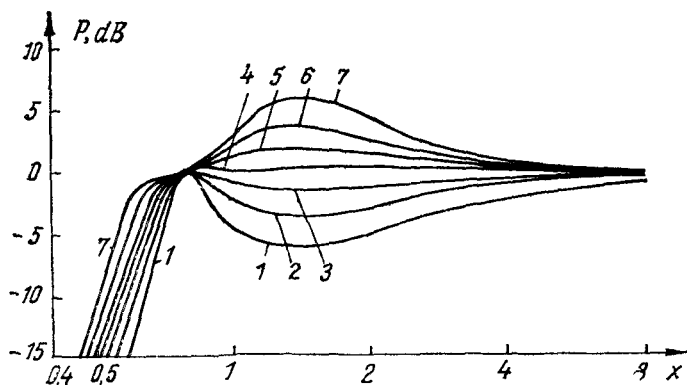
$$A_2 = (1 + \alpha)^2 + h^2 \left(4 + 2\alpha + h^2 - \frac{2}{Q_T^2} \right) = 0, \quad (3.52 \text{ б})$$

се получава

$$\gamma_{11}(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{A_2}{x^6} + \frac{A_4}{x^8}}}. \quad (3.53)$$

Аналитичната зависимост (3.53) дава честотна характеристика, съответстваща непълно на филтър на Батърворт от трети ред, и се нарича *квази-Батърворттов филтър от трети ред*. Анализът на (3.51) и (3.52) показва, че решение съществува само при $Q_T < 0,563$. При избрана стойност на Q_T от (3.52 а) и (3.52 б) се получават стойности за α и h , които се заместват в (3.48) и (3.49) и се получават определени стойности на коефициентите A_2 и A_4 . На тях съответствува определена честотна характеристика.

Ако обаче се приеме друга стойност за Q_T , се получават други стойности за A_3 и A_4 и съответно — друга честотна характеристика. Така може да се получат цяла фамилия от квази-Батървортови честотни характеристики от трети ред. Характерно за



Фиг. 3.13

тях е, че са гладки криви без върхове и падини в целия честотен обхват. Долната гранична честота на такива озвучителни тела е по-висока от резонансната честота на високоговорителя. Резонансната честота на фазоинвертора също е по-висока от тази на високоговорителя. На фиг. 3.12 (крива 3) е дадена честотната характеристика на озвучително тяло с фазоинвертор, изчислена от (3.53), при $Q_T=0,3$; $\alpha=3,02$; $h=1,26$.

Дадените на фиг. 3.12 честотни характеристики се отнасят за оптимално проектирани озвучителни тела с фазоинвертор. Ако проектирането не е оптимално, честотните характеристики могат да се получат с голяма неравномерност. На фиг. 3.13 са дадени честотни характеристики, за които $\alpha=0,61$ и $h=0,78$ (както за крива 2 от фиг. 3.12), но при различни стойности на Q_T . Вижда се, че разликите са много големи.

От направения анализ се установява, че озвучителните тела с фазоинвертор могат да се реализират с различни параметри и съответно да се получат най-различни честотни характеристики. Съществуват големи възможности за избор на тип честотна характеристика и за търсене на оптималния ѝ ход.

Пълният анализ на озвучителното тяло с фазоинвертор изисква да се изследва зависимостта на амплитудата на отклонение на мембраната, к. п. д., входният импеданс и др. от честотата и пара-

метрите на системата. Но това изследване няма да помогне на читателя при конкретното проектиране, а само излишно ще го затрудни с математичен материал. Тези въпроси са анализирани в дадената литература.

Достатъчно е да се посочи, че първите два множителя на (3.43) могат да се преработят до вида

$$\eta_0 = \frac{\rho}{4\pi c} \cdot \frac{B^2 L^2}{R m S^2} = k \frac{2\pi^2 f_3^3 V}{c^3}, \quad (3.54)$$

където $k=3 \div 4$ е константа.

Вижда се, че с намаляване на f_3 намалява, и то в трета степен, η_0 за честоти над f_3 . Разширяването на честотния обхват към ниските честоти е за сметка на понижаване на нивото на характеристичната чувствителност. За създаване на определено звуково налягане трябва да се увеличава електрическата мощност. При разширяване на честотния обхват с една октава к. п. д. намалява 8 пъти, т. е. 8 пъти трябва да се увеличи консумираната от усилвателя мощност, за да се поддържа определено ниво на звуковото налягане.

Параметрите на озвучително тяло с фазоинвертор трябва да се изчислят така, че да се получи ефективно възпроизвеждане на сигнали с колкото е възможно по-ниска честота. Ефективността на преобразуване на сигналите с ниска честота не зависи от формата на кутията или от вида на фазоинвертора, а само от обема ѝ и резонансната честота на фазоинвертора. При зададен високоговорител тези величини трябва да се определят така, че озвучителното тяло да има възможно най-гладка честотна характеристика и най-ниска честота f_3 . Като основа на изчисленията трябва да се използва формата на честотната характеристика, която трябва да притежава озвучителното тяло. Ако тя е определена или избрана, определени са и стойностите на някои от коефициентите A на (3.44), т. е. определени са някои зависимости между обобщените параметри α , h , Q_T .

Ако е определена честотна характеристика, съответстваща на филтър на Батърворт от четвърти ред, трите обобщени параметъра са точно определени по стойност съгласно (3.50 а). От (3.40) се определя обемът, който трябва да има озвучителното тяло, а от (3.41) — резонансната честота f_ϕ на фазоинвертора. Накрая трябва да се регулира пълният качествен фактор на озвучителното тяло така, че при зададен пълнен качествен фактор на високоговорителя да получи $Q_T=0,383$. В противен случай ще се получи озвучително тяло с фазоинвертор, чиято честотна характери-

стика е от друг тип. Честотата x_3 , респ. f_3 , се определя от (3.50 б). Получава се

$$x_3=1, f_3=f_p,$$

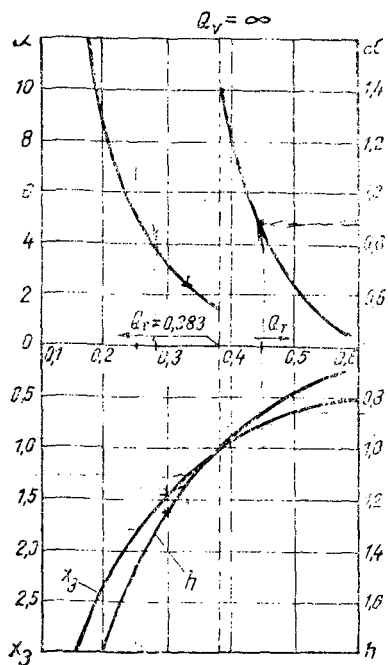
т. е. нивото на характеристиката се понижава с 3 dB за честота, равна на резонансната честота на високоговорителя.

Трябва да се има предвид, че не от всеки високоговорител може да се реализира озвучително тяло с фазоинвертор, чиято честотна характеристика да съответствува на филтър на Батърворт от четвърти ред. Ако качественият фактор на високоговорителя е по-малък от 0,383, неговата стойност лесно може да се повиши до 0,383, но ако е по-голям, намаляването му е трудно.

Ако е зададено честотната характеристика да съответствува на филтър на Чебишев от четвърти ред, се избира стойността на Q_T и от неравенствата (3.51) за стойностите на A - параметрите се определят стойностите на α и h .

Ако е зададена честотна характеристика от типа квази-Батърворт от трети ред, също се приема стойността на Q_T и от (3.52 а) и (3.52 б) се определят стойностите на α и h .

Посочените изчисления могат значително да се опростят, като се използват номограми за различните случаи. На фиг. 3.14 е дадена обобщена номограма за изчисляване параметрите на озвучително тяло с фазоинвертор, която може да се използва за изчисляване на озвучителни тела с характеристики, съответстващи на филтър на Батърворт от четвърти ред, квази-Батърворт от трети ред и Чебишев от четвърти ред. Видът на характеристика



Фиг. 3.14

ката се определя от стойността на Q_T . При $Q_T=0,383$ се получават параметрите за характеристика, съответстваща на филтър на Батърворт от четвърти ред, при $Q_T < 0,383$ — квази-Батърворт от трети ред и при $Q_T > 0,383$ — Чебишев от четвър-

ти ред, чиято характеристика има неравномерност, не по-голяма от 2 dB. От номограмата че вижда, че характеристиката Чебишев от четвърти ред има честота f_3 , по-малка от резонансната честота на високоговорителя f_p , характеристиката квази - Батърворт от трети ред има честота f_3 , която е по-голяма от f_p , а характеристиката Батърворт от четвърти ред — $f_3=f_p$. Обаче обемът на озвучителното тяло с характеристика Чебишев от четвърти ред е значително по-голям от обема на озвучителното тяло с характеристика квази - Батърворт от трети ред. Тези съотношения трябва да се имат предвид предварително при избора на типа на характеристиката. Ако се изисква малка стойност на f_3 , респ. на x_3 при зададен високоговорител, трябва да се избере характеристика от типа Чебишев от четвърти ред, но този избор може да се направи само ако е възможно озвучителното тяло да бъде със значително голям обем. Функцията $\alpha(Q_T)$ е разделена при $Q_T=0,383$, като за $Q_T>0,383$ е увеличен мащабът.

С решаването на примери ще се изясни методът на изчисляване с номограмата.

Пример 1. Да се изчисли озвучителното тяло с фазоинвертор с оптимална честотна характеристика, ако са известни параметрите на използвания високоговорител:

$$f_p=40 \text{ Hz}; Q_m=3,8; Q_e=0,35; V_c=100 \text{ dm}^3.$$

Приема се, че захранващият усилвател е с изходно съпротивление $R_i=0$ и се определя $Q_T=0,32$. Реализира се озвучително тяло с честотна характеристика от типа квази - Батърворт от трети ред. На номограмата се отбелязва стойността $Q_T=0,32$ и се издига перпендикуляр спрямо абсцисната ос и в двете посоки. От пресечните точки с кривите на номограмата се отчита: $\alpha=2,8$; $h=1,2$ и $x_3=1,35$. От тези стойности се определя:

честота на среза $f_3=54 \text{ Hz}$;

резонансна честота на фазоинвертора $f_{\phi}=48 \text{ Hz}$;

обем на озвучителното тяло $V=35 \text{ dm}^3$.

Ако получените резултати са задоволителни, се пристъпва към практическата реализация на озвучителното тяло. Конструира се кутия с вътрешен обем 35 dm^3 с форма, определена от съображения на модерен дизайн. Реализира се фазоинверсен отвор и се настройва на честота 48 Hz. Закрепва се високоговорителят, като добре се уплътнява повърхността, в която той се допира към кутията. При изчисленията бе прието, че механичните загуби в кутията са равни на нула, т. е. кутията е добре уплътнена и в нея не се поставя звукопоглъщащ материал. Такива озвучителни тела рядко се произвеждат — в обема почти винаги се поставя

звукпоглъщащ материал, а това трябва да се вземе предвид още при изчисляването. На фиг. 3.15 е дадена номограма за изчисляване параметрите на озвучително тяло с фазоинвертор, която е подобна на тази от фиг. 3.14, но са взети предвид загубите в обема както от звукпоглъщане, така и от звукопроницаемост. Номограмата се отнася за загуби, определени от двата честотни фактора — $Q_v = 5$ и $Q_L = 5$, където

$$Q_v = \frac{1}{\omega_{\phi} c_v r_v} \quad \text{— качествен фактор на загубите от поглъщане в обема;} \quad (3.55 \text{ а})$$

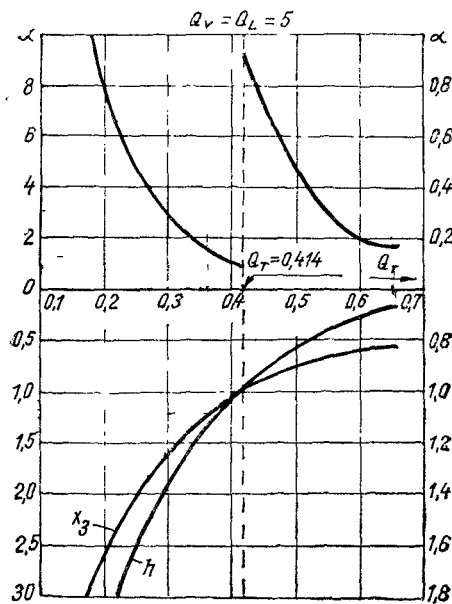
$$\frac{1}{Q_{T0}} = \frac{1}{Q_v} + \frac{1}{Q_L} + \frac{1}{Q_{\phi}} \quad \text{— качествен фактор на общите загуби в обема на фазоинверсията отвор.} \quad (3.55 \text{ б})$$

За определяне параметрите на озвучителното тяло с фазоинвер-

тор, изчислено в *пример 1* по номограмата от фиг. 3.15, е необходимо да се намери точката, съответстваща на $Q_T = 0,32$, и да се издигнат перпендикулярите.

От фиг. 3.15 се определя: $\alpha = 2,50$; $h = 1,32$ и $x_3 = 1,5$, а от тези стойности се получава: $V = 40 \text{ dm}^3$; $f_{\phi} = 52,8 \text{ Hz}$; $f_3 = 60 \text{ Hz}$.

Получава се по-голям обем и по-висока долна гранична честота. Обикновено това не е желателно. В повечето случаи се цели да се получи по-ниска долна гранична честота и затова е за предпочитане този показател да се избере или зададе като изходна величина. За случая от *пример 1* може да се зададе $f_3 = 32 \text{ Hz}$. Тъй като трябва честотата на среза f_3 да се получи по-ниска от резонанс-



Фиг. 3.15

ната честота на високоговорителя, това може да се осъществи само ако характеристиката на озвучителното тяло съответствува на филтър на Чебишев от четвърти ред. Определя се $x_3 = \frac{f_3}{f_p} = 0,8$. На номограмата от фиг. 3.15 тази стойност на x_3 се

получава при $Q_T = 0,48$, на което съответствува $h = 0,84$ и $\alpha = 0,44$. За обема на озвучителното тяло се получава $V = 225 \text{ dm}^3$, а резонансната честота на фазоинвертора $f_\phi = 33,6 \text{ Hz}$. Общият качествен фактор трябва да се регулира до стойност 0,48. Вижда се, че при зададен високоговорител разширяването на възпроизвеждането към обхвата на ниските честоти с около една октава е съпроводено с увеличаване на обема на озвучителното тяло с около 6 пъти.

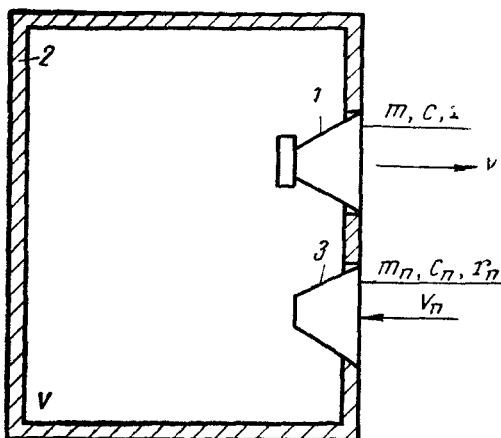
Изчисляването по зададени показатели на озвучителното тяло не винаги може да се реализира, тъй като трудно може да се намери високоговорител, който точно да отговаря на изчислените стойности.

3.4. ОЗВУЧИТЕЛНО ТЯЛО С ПАСИВНА МЕМБРАНА

Озвучителните тела с пасивна мембрана са акустични системи с директно излъчване, които са изградени от два акустични излъчвателя. Акустичното им оформяне е кутия от звуконепроницаем материал, която трябва да бъде херметически уплътнена в местата на свързване на съставните ѝ части. Кутията е с два отвора, към единия от които се закрепва високоговорителят, а към другия — пасивната мембрана. Външно пасивната мембрана прилича на високоговорителя, но към нея няма звукова bobина, няма магнитна система и не се захранва от източника на електрическа енергия, т. е. тя не е консуматор, както е високоговорителят. Пасивната мембрана се нарича още пасивен радиатор, пасивен излъчвател, пасивен бас или пасивен конус.

При ниски честоти пасивната мембрана се привежда в движение под действие на звуковото налягане в затворения обем и създава звуково поле в пространството във от затворения обем, където се създава от високоговорителя. Създаваното звуково поле е дефазирано спрямо това, създавано от високоговорителя, защото пасивната мембрана се измества напред тогава, когато подвижната система на високоговорителя се премества назад. На пръв поглед би следвало да се очаква, че създаваното звуково поле ще бъде дефазирано на 180° спрямо това на високоговорителя и двете звукови полета ще се неутрализират, т. е. за ниските честоти ще се получи акустично късо съединение, реализирано през пасивната мембрана. В действителност такова явление не се наблюдава. Пасивната мембрана се възбужда през гъвкавостта c_v на обема, а и самата тя съдържа реактивни акустични елементи — m_n и c_n . В резултат на това трептенията на пасивната мембрана

са дефазирани спрямо действащото в обема звуково налягане. Ако дефазирането е точно един полупериод, пасивната мембрана ще създава звуково поле, съвпадащо по фаза с това на високоговорителя. Оптимално проектираното озвучително тяло с пасивна



Фиг. 3.16

мембрана трябва да осигурява именно такова фазово съотношение в обхвата на ниските честоти.

Пасивната мембрана е чисто механична или акустична трептяща система — тя има акустичен вход и изход. Тя създава звуково поле, като черпи енергия от звуковото поле, което се установява в затворения обем на озвучителното тяло под действието на високоговорителя.

Принципната конструкция на озвучително тяло с пасивна мембрана е дадена на фиг. 3.16. Вижда се, че по конструкция то много прилича на озвучително тяло с фазоинвертор. На мястото на отвора с тръба е поставена пасивната мембрана 3. От описания принцип на действие се установява, че тези два типа озвучителни тела почиват на един и същи принцип. В единия случай (фазоинвертора) към направения втори отвор се закрепва една тръба с цел да се създаде определен обем въздух с определена маса, която да внесе фазово изместване на трептенията във фазоинвертора спрямо тези на високоговорителя. Във втория случай към допълнителния отвор се закрепва пасивната мембрана, притежаваща определена маса, която също внася дефазиране на трептенията на мембраната спрямо тези на високоговорителя. Съществува

и една съществена разлика. Трептящият в тръбата на фазоинвертора въздух може да се разколебае с произволна амплитуда. Той е установен или „свързан“ към тръбата посредством безкрайно голяма гъвкавост. Амплитудата на пасивната мембрана е ограничена, тъй като тя е закрепена към отвора с определена гъвкавост, която не е безкрайно голяма. Наличието на гъвкавост с крайна големина намалява ефективността на пасивната мембрана спрямо тази на фазоинвертора.

Пасивната мембрана притежава и някои предимства, поради които намира непрекъснато растящо приложение. Първото е в премахване на възможността от завихряния на въздуха в тръбата на фазоинвертора при големи амплитуди и свързаното с него свистене или характерен шум. Второто е в това, че мембраната представлява твърда преграда между обема на озвучителното тяло и звуковото поле вън от него и не позволява да се излъчва звукова вълна през допълнителния отвор, от което би се получила допълнителна окраска на възпроизвежданата звукова картина. Това предимство трябва да се приеме с известен резерв. Пасивната мембрана е звуконепроницаема, що се отнася до преминаване на звуковата вълна през материята на мембраната, но ако звуковата вълна разтрепти пасивната мембрана, тя също може да създаде окраска към създаването от високоговорителя звуково поле. Разбира се, ако за тази честота пасивната мембрана може да излъчва звукова енергия.

От казаното за идентичността на функциониране на фазоинвертора и пасивната мембрана следва, че те могат да допринесат за подобряване ефективността на преобразуване на сигналите с ниска честота от озвучителните тела, разбира се, ако са правилно изчислени. Във връзка с идентичността на функционирането би следвало озвучителното тяло с пасивна мембрана да се нарича озвучително тяло с пасивна фазоинвертираща мембрана.

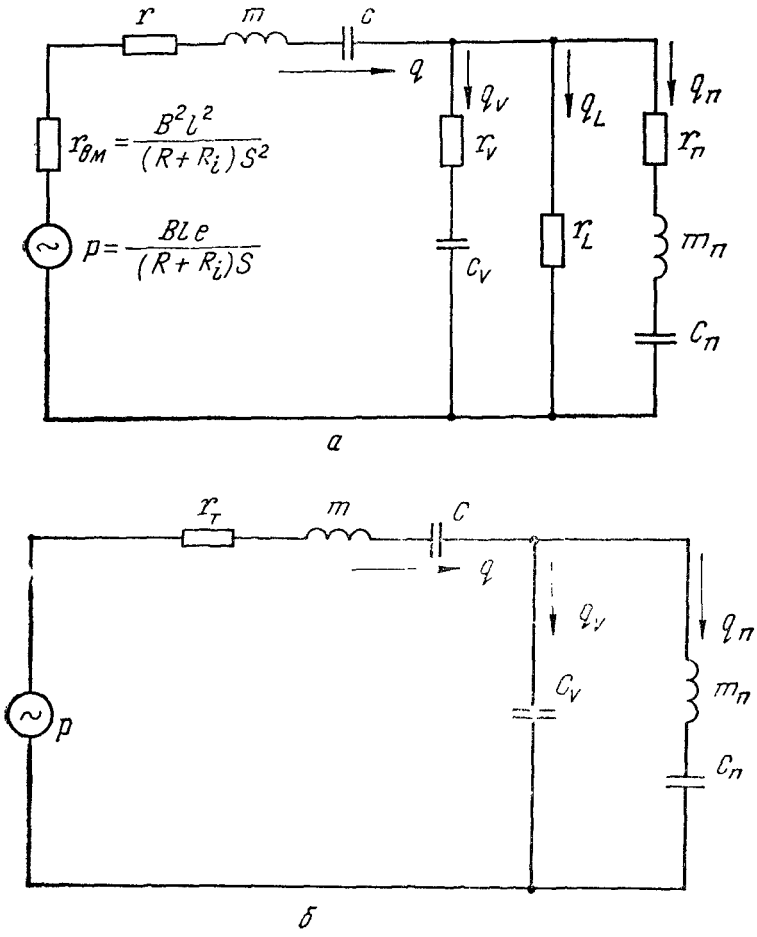
Анализът на озвучително тяло с пасивна мембрана може да се извърши на базата на еквивалентните схеми за него. Заместващата еквивалентна схема на трептящата му система може лесно да се състави, като се приеме за база аналогичната схема на озвучително тяло с фазоинвертор. На мястото на масата m_ϕ и активните загуби r_ϕ трябва да се поставят последователно свързани параметрите на трептящата система на пасивната мембрана:

m_n — акустичната динамична маса на пасивната мембрана, включваща и масата на присъединения при трептенето въздух;

c_n — акустичната гъвкавост на окачване на пасивната мембрана;

r_n — съпротивление на активните загуби в елементите на окачване на пасивната мембрана.

Еквивалентната електрическа заместваща схема на трептящата система на озвучително тяло с пасивна мембрана, изградена с акустични параметри, е дадена на фиг. 3.17 а. Символите на параметрите съвпадат с въведените в предишните разглеждания.



Фиг.3.17

Необходимо е да се направят някои опростявания. Могат да се пренебрегнат следните загуби: в обема r_v поради звукопроницаемост на обема r_L и в пасивната мембрана r_n . Освен това могат

да се обединят последователно свързаните активни съпротивления r_{en} и r и да се заменят с r_T . Получава се схемата, дадена на фиг. 3.17 б.

Електрическата еквивалентна схема на озвучителното тяло, разглеждано от електрическия си вход като консуматор на електрическа енергия, може да се състави, като акустичните съпротивления от схемата на фиг. 3.17 б се трансформират в съответни внесени електрически съпротивления към входния електрически импеданс. Използува се връзката

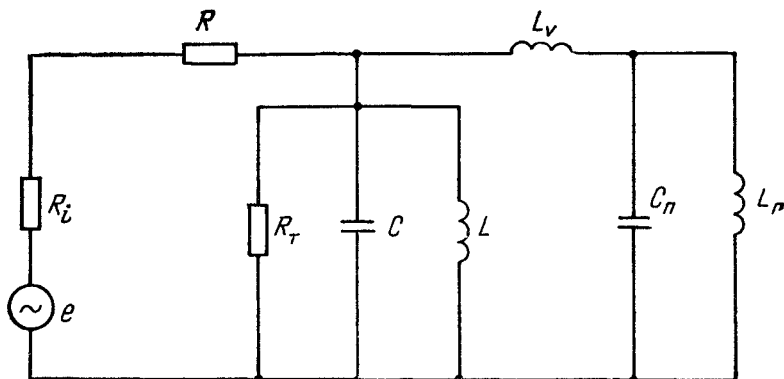
$$Z = \frac{B^2 l^2}{z S^2}, \quad (3.56)$$

където z е даден акустичен импеданс;

Z — еквивалентният му електрически импеданс.

Необходимо е да се спази и правилото, че последователно свързаните акустични импеданси се трансформират в паралелно свързани електрически импеданси, а паралелните — в последователни.

Получава се схемата, дадена на фиг. 3.18. Значенето на символите е идентично с това при озвучително тяло с фазоинвертор с допълнението:



Фиг. 3 18

електрическата индуктивност, съответстваща на гъвкавостта на окачване на пасивната мембрана, е

$$L_n = -\frac{c_n B^2 l^2}{S^2} - ; \quad (3.57 a)$$

електрическият капацитет, съответстващ на масата на пасивната мембрана, е

$$C_n = \frac{m_n S^2}{B^2 l^2}. \quad (3.57 \text{ б})$$

Еквивалентните схеми са валидни само за честотния обхват, в който високоговорителят трепти като бутало. В този обхват елементите на еквивалентните схеми се приемат за честотнонезависими.

За извеждане на аналитични зависимости е целесъобразно да се въведат обобщени параметри за озвучителното тяло, за високоговорителя и за пасивната мембрана. За улеснение ще бъдат използвани въведените вече обобщени параметри при озвучителното тяло с фазоинвертор. Допълнително ще се въведат:

резонансната честота на пасивната мембрана

$$\omega_n = 2\pi f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{1}{\sqrt{m_n c_n}} = \sqrt{C_n L_n}; \quad (3.58)$$

качествен фактор на пасивната мембрана

$$Q_n = \frac{1}{\omega_n c_n r_n} = \omega_n C_n R_n; \quad (3.59)$$

обем на гъвкавостта на пасивната мембрана

$$V_{cn} = \psi p_s c_n. \quad (3.60)$$

Параметрите на пасивната мембрана си взаимодействуват с гъвкавостта на обема на озвучителното тяло и образуват една акустична трептяща система. За определена честота f_v в тази система настъпва резонанс. Резонансната честота се определя от зависимостта

$$\omega_v = 2\pi f_v = \frac{1}{T_v} = \sqrt{\frac{1 + \frac{c_v}{c_n}}{c_v m_n}} = \sqrt{\frac{1 + \frac{L_v}{L_n}}{C_n L_v}}. \quad (3.61)$$

Загубите в пасивната мембрана, в обема и от звукопроницаемост на обема се отразяват чрез въвеждането на три качествени фактора, които се отнасят при резонансната честота на пасивната мембрана

$$Q_n = \frac{1}{\omega_v c_v r_n}; \quad (3.62 \text{ а})$$

$$Q_L = \frac{1}{\omega_v c_v r_L}; \quad (3.62 \text{ б})$$

$$Q_v = \frac{1}{\omega_v c_v r_v} . \quad (3.62_{\theta})$$

Общите загуби при резонансната честота f_v ще бъдат

$$\frac{1}{Q_{T0}} = \frac{1}{Q_n} + \frac{1}{Q_L} + \frac{1}{Q_v} . \quad (3.63)$$

При анализа се налага използването и на някои относителни коефициенти:

коефициент на гъвкавост на окачване на високоговорителя

$$\alpha = \frac{c}{c_v} = \frac{L}{L_v} ; \quad (3.64)$$

коефициент на гъвкавост на окачване на пасивната мембрана

$$\delta = \frac{c_n}{c_v} = \frac{L_n}{L_v} ; \quad (3.65)$$

коефициент на разстройка на резонансната честота на обема

$$h = \frac{f_v^2}{f_p^2} = \frac{\omega_v}{\omega_p} = \frac{T_p}{T_v} ; \quad (3.66)$$

коефициент на разстройка на резонансната честота на пасивната мембрана

$$g = \frac{f_n}{f_p} = \frac{\omega_n}{\omega_p} = \frac{T_p}{T_n} ; \quad (3.67)$$

пълен качествен фактор на високоговорителя, свързан към захранващия го усилвател

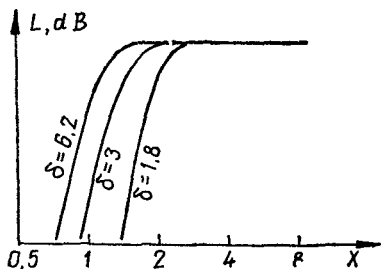
$$Q_T = \frac{1}{\omega_p c_T} . \quad (3.68)$$

Между въведените коефициенти съществуват зависимостите

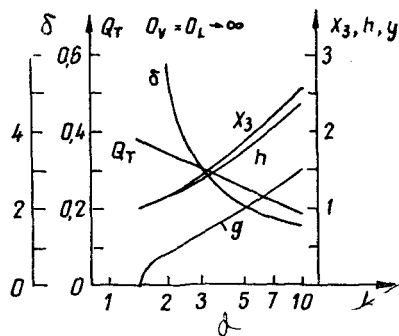
$$\frac{T_n}{T_v} = \frac{f_v}{f_n} = \frac{h}{g} = \sqrt{1 + \delta} . \quad (3.69)$$

Въз основа на еквивалентните схеми от фиг. 3.17 и 3.18 и като се използват въведените коефициенти и обобщени параметри, може да се изведе нормализован аналитичен израз за предавателната функция на озвучителното тяло. Обаче както извеждането, така и самият израз са сравнително сложни и излишно ще обременяват книгата. В [35] е даден аналитичният израз на предавателната характеристика и е показано, че честотната характеристика на озвучително тяло с пасивна мембрана е честотна

характеристика на филтър, чиято предавателна характеристика е елиптична функция. Методиката за изчисляване на озвучителни тела с пасивна мембрана се базира на номограми [35], които са построени на базата на споменатата аналитична зависимост. В



Фиг. 3.19



Фиг. 3.20

същия източник е показано, че петте параметъра (f_p , f_n , Q_T , α и δ) са свързани с пет коефициента от аналитичната функция и на всяка конструкция на озвучителното тяло съответствува една единствена система от параметри. Все пак при озвучителното тяло с пасивна мембрана изискванията за получаване на максимално плоска характеристика се удовлетворяват от повече от една система уравнения. Това означава, че съществуват безкраен брой максимално плоски характеристики. За ограничаване броя на възможните за получаване честотни характеристики се налага един от параметрите на системата да бъде определен на база на натурпан опит или в резултат на проведени експерименти.

На фиг. 3.19 са дадени три максимално плоски характеристики, които са получени за различни стойности на δ при еднакви други параметри. Вижда се, че с увеличаване на δ честотният обхват се разширява към ниските честоти, но това трябваше да се очаква — при $\delta \rightarrow \infty$ би се получил най-широк честотен обхват, като характеристиката ще съответствува на филтър на Батърворт от четвърти ред. С това още веднъж се потвърждава твърдението, че крайната стойност на гъвкавостта на окачване на пасивната мембрана намалява ефективността на озвучителното тяло с пасивна мембрана спрямо озвучително тяло с фазоинвертор.

Номограмата за изчисляване параметрите на озвучително тяло с пасивна мембрана при пренебрегване загубите в обема му е дадена на фиг. 3.20. Използуването ѝ за практическо изчисляване ще бъде разяснено с решаването на една примерна конструкция.

Пример 1. Да се изчисли озвучително тяло с пасивна мембрана, ако е известно, че високоговорителят, който ще се използва, има следните параметри: $f_p = 40$ Hz; $Q_m = 2,4$; $Q_e = 0,35$ и $V_c \approx 80$ dm³.

Приема се, че захранващият усилвател е с много малко вътрешно съпротивление и $Q_T = Q_{T1} = 0,305$.

Върху кривата за Q_T от номограмата на фиг. 3.20 се определя точката, съответстваща на $Q_T = 0,305$. Спуска се перпендикуляр към абсцисната ос и се определя $\alpha = 2,9$. На тази стойност на α съответствуват $\delta = 3,2$; $x_3 = 1,4$; $h = 1,35$.

По тези данни се определя:

обемът на озвучителното тяло $V = 27,6$ dm³;

резонансната честота на озвучителното тяло $f_v = 54$ Hz;

резонансната честота на пасивната мембрана, $f_n = 26,3$ Hz;

параметърът $g = 0,657$;

честотата $f_3 = 56$ Hz.

Получената стойност за f_3 е сравнително висока. Тя може да се получи по-ниска, ако се приеме по-голям еквивалентен качествен фактор, определен от високоговорителя и усилвателя. Точната му стойност се определя от желаната долна гранична честота. Например, ако се постави изискване $f_3 = 50$ Hz, се определя $x'_3 = 1,25$.

От графиките на фиг. 3.20 се определя, че на тази стойност не съответствуват $\alpha' = 2,4$; $Q'_T = 0,33$; $h' = 1,24$; $\delta' = 4,5$; $g' = 0,52$.

По тези данни се определят новите параметри на озвучителното тяло:

обем на озвучителното тяло $V' = 33,4$ dm³;

резонансна честота на озвучителното тяло $f'_v = 49,6$ Hz;

резонансна честота на пасивната мембрана $f'_n = 20,8$ Hz;

гъвкавост на пасивната мембрана $c'_n = 4,5$ cv.

За сметка на сравнително малкото намаляване на долната гранична честота на озвучителното тяло се получи неголямо увеличение на обема, намаляване резонансните честоти на обема на озвучителното тяло и на пасивната мембрана и значително увеличаване гъвкавостта на окачване на пасивната мембрана.

Същественото в случая е, че трябва да се увеличи качественият фактор на високоговорителя след свързването му към усилвателя. Това е възможно, като се увеличи електрическият качествен фактор на високоговорителя. Той трябва да се донастрои до стойност $Q'_e = 0,388$.

Q_e се определя от (3.16) и за промяната му трябва да се измени R , т. е. $Q'_e = \omega_0 C R'$, където $R' = R + R_i$.

От отношението на двете равенства се получава

$$\frac{Q_e}{Q_e'} = \frac{R}{R'}$$

Решението спрямо R' дава

$$R' = R \frac{Q_e'}{Q_e}$$

За вътрешното съпротивление на усилвателя се получава

$$R_i = R \left(\frac{Q_e'}{Q_e} - 1 \right) \quad (3.70)$$

За разглеждания случай $R_i = 0,11 R$.

Вътрешното съпротивление на усилвателя трябва да е 11% от съпротивлението на звуковата бобина.

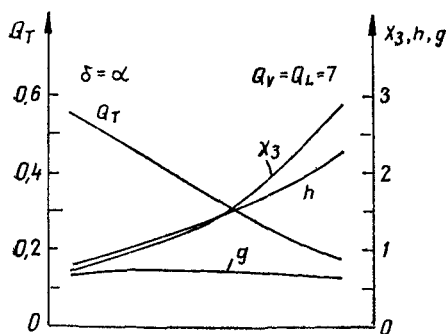
Всички необходими параметри за реализиране на озвучителното тяло са определени.

Може да се определи и масата на пасивната мембрана

$$m_n = \frac{1}{4\pi^2 f_n^2 c_n} = \frac{1}{4\pi^2 f_n^2 \frac{\delta}{\alpha} c} \quad (3.71)$$

За целта трябва да е зададена еквивалентната звукоизлъчваща повърхност на високоговорителя S , за да може да се определи c .

Обикновено загубите в обема на озвучителното тяло и в окачването на пасивната мембрана не могат да се пренебрегнат. Изчисляването на параметрите на озвучително тяло с пасивна мембрана със загуби може да се проведе, като се използва номограмата, дадена на фиг. 3.21 [35]. Освен това на практика почти винаги двата параметъра α и δ са равни помежду си и имат стойности, по-големи от 3. Номограмата от фиг. 3.21 е съставена за $\delta = \alpha$. С приемането за това равенство всъщ-



Фиг. 3.21

ност броят на параметрите, които трябва да се определят се намалява с единица, така че на всяка характеристика, която може да се получи за дадено озвучително тяло, съответства точно една система от параметри. Всички загуби в обема се приема, че

се представят от загубите поради звукопроницаемост, дефинирани от Q_L , като за номограмата от фиг. 3.21 $Q_L = 7$. Определянето на параметрите на озвучителното тяло се извършва, както и в случая без загуби, което ще бъде илюстрирано с решаването на един пример.

Пример 2. Да се определят параметрите на озвучително тяло с пасивна мембрана, ако са зададени параметрите на високоговорителя: $f_p = 40$ Hz; $Q_{mp} = 3,4$; $Q_{ep} = 0,35$; $V_c = 100$ dm³.

Необходимо е да се подчертае, че за озвучителни тела с пасивна мембрана са подходящи високоговорители с пълен качествен фактор Q_{T1} , не по-голям от 0,5. При по-големи стойности на Q_{T1} се получава неравномерна честотна характеристика на озвучителното тяло в обхвата на ниските честоти. В случая това изискване е изпълнено и може да се пристъпи към изчисляване.

От графиките на номограмата като отправна се използва зависимостта $Q_T(\alpha)$. Приема се, че захранващият усилвател има пренебрежимо малко изходно съпротивление и $Q_T = Q_{T1} = 0,316$.

Върху графиката $Q_T(\alpha)$ се намира стойността 0,316 и се определя α , съответстваща на Q_T . Намира се $\alpha = 2,8$. Останалите параметри са функции на α и лесно се отчитат:

$$h = 1,5, \quad x_3 = 1,6, \quad g = 0,76.$$

От обобщените параметри се определят конкретните:

$$V = 35,6 \text{ dm}^3.$$

Тъй като по начало е присто $\delta = \alpha$, за гъвкавостта на пасивната мембрана се определя $c_n = \delta c_v = \alpha c_v = c$.

Пасивната мембрана трябва да има същата гъвкавост на окачване, каквато има и използваният високоговорител. В действителност условието $\delta = \alpha$ се базира на факта, че на практика се използват за пасивни мембрани същите мембрани и със същото окачване, каквито се използват за самите високоговорители.

Резонансната честота на обема трябва да бъде $f_v = 60$ Hz.

Резонансната честота на пасивната мембрана е $f_n = 30,4$ Hz.

Долната гранична честота е $f_3 = 64$ Hz.

Трябва да се има предвид, че f_3 в действителност не е долна гранична честота. Тази честота е въведена по аналогия от филтрите. Изискването за долна гранична честота на озвучителните тела от Hi Fi клас е нивото ѝ да бъде по-ниско от средното ниво с 8 dB. Поради това по-правилно е честотата f_3 да се нарича честота на среза. Фактическата долна гранична честота ще бъде по-ниска от f_3 , като стойността ѝ зависи от стръмността на характеристиката под f_3 . За озвучителните тела с пасивна мем-

брана обикновено стръмността е по-голяма и долната гранична честота е много близка по стойност до f_3 . В случая може да се очаква долна гранична честота от порядъка 55 до 57 Hz, в никакъв случай по-ниска.

Резонансната честота на пасивната мембрана се получи по-ниска от резонансната честота на високоговорителя, а бе прието, че гъвкавостта на окачване и на двете трептящи системи ще бъде еднаква. Следователно масата на пасивната мембрана трябва да бъде по-тежка от масата на трептящата система на високоговорителя. От (3.71) лесно се намира съотношението

$$m_n = \frac{f_n^2}{f_n^2} m = \frac{m}{g^2}. \quad (3.72)$$

Масата на пасивната мембрана трябва да бъде по-голяма от тази на трептящата система на високоговорителя с отношението от квадратите на двете резонансни честоти. За конкретния случай

$$m_n = 1,74 m.$$

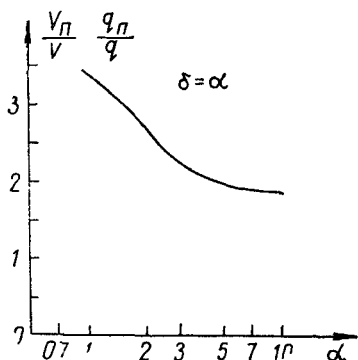
Следователно към масата на пасивната мембрана трябва да се прибави някаква допълнителна маса, която да бъде 74% от тази на трептящата система на високоговорителя.

По принцип изборът на вида и конструкцията на пасивната мембрана трябва да се направи много внимателно и прецизно.

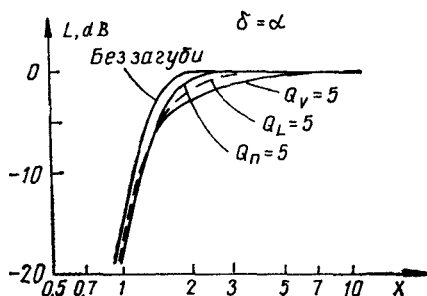
Доказано е в литературата [35], че обемът от въздух, който трябва да измества пасивната мембрана, е значително по-голям от този, който измества високоговорителят. Ако двете мембрани имат еднакви площи, това означава, че пасивната мембрана трябва да трепти със значително по-голяма амплитуда. На фиг. 3.22 е представена графично зависимостта на отношението на амплитудата на трептене на пасивната мембрана към амплитудата на трептене на високоговорителя от параметъра α . Графиката е съставена [35] при условие $\delta = \alpha$. В действителност тази графика се отнася за зависимостта на отношението между обемите, които изместват пасивната мембрана и високоговорителя. При условие, че двете мембрани са с еднаква повърхност, обемите са пропорционални на съответните амплитуди на трептене, а за дадената диаграма е прието $S_n = S$. Означено е u_n — амплитуда на трептене на пасивната мембрана, и u — амплитуда на трептене на високоговорителя. От графиката се вижда, че при постоянна амплитуда u амплитудата u_n намалява с увеличаването на α . При $\alpha = 1,5$ пасивната мембрана трябва да трепти с около 3 пъти по-голяма амплитуда

от тази на високоговорителя. При $\alpha > 3$ отношението от амплитудите е около 2.

Тук изниква въпросът целесъобразно ли е да се използва мембраната на високоговорителя и за пасивна мембрана. Отгово-



Фиг. 3.22



Фиг. 3.23

рът зависи от няколко фактора. От производствена гледна точка това е много целесъобразно — не се налага конструирането на нови детайли и свързаните с неговото производство инструменти, а се използват детайли от усвоеното производство. От техническа гледна точка обаче има редица допълнителни условия. Основното условие е пасивната мембрана да може да прави два пъти по-големи амплитуди от тези на високоговорителя, без да внася изкривявания, т. е. изместването ѝ да се осъществява по линеен закон. Това зависи от конструкцията на високоговорителя или по-точно от съображенията, които са определили номиналната мощност на високоговорителя. Възможни са три основни случая. Първият от тях е номиналната мощност да е определена от топлинни съображения, т. е. звуковата bobина не може да понесе по-голямо електрическо натоварване, а подвижната система на високоговорителя може да извършва значително по-големи амплитуди, запазвайки линейността на възвръщащата сила от изместването. В този случай мембраната на високоговорителя може да се използва и за пасивна мембрана. Втори случай — номиналната мощност е определена от ограничения на линейността на изместването на трептилката, а мембраната запазва линейността на изместването си и при значително по-големи амплитуди. В този случай също може да се използва мембраната на високоговорителя и за пасивна мембрана. Трети случай — номиналната

мощност е определена от границата на линейността на възвръщащата сила от изместването на самата мембрана. В този случай мембраната на високоговорителя не може да се използва и за пасивна мембрана. Може да се допусне компромис, като се използва същата мембрана, но тогава мощността на озвучителното тяло трябва да се намали. За предпочитане е обаче да се използва същата мембрана, но с други гънки, позволяващи по-големи амплитуди на мембраната при запазване линейността на възвръщащата сила от изместването. В този случай гъвкавостта на гънките трябва да бъде равна или по-голяма от гъвкавостта на високоговорителя.

От фиг. 3.21 се вижда, че параметърът g слабо зависи от α . От (3.72) се установява, че масата на пасивната мембрана е равна на масата на трептящата система на високоговорителя, умножена по $\frac{1}{g^2}$, като $\frac{1}{g^2} \approx 2$. Следователно масата на пасивната мембрана трябва да бъде приблизително два пъти по-голяма от масата на трептящата система на високоговорителя.

Препоръките за избор на пасивна мембрана могат да се обобщят в следните четири:

акустична гъвкавост — равна или по-голяма от акустичната гъвкавост на окачване на високоговорителя;

акустична маса — приблизително два пъти по-голяма от акустичната маса на трептящата система на високоговорителя;

амплитуда на линейно изместване — приблизително два пъти по-голяма от амплитудата на високоговорителя;

механични загуби в окачването — колкото е възможно по-малки, т. е. Q_n да бъде по възможност по-голям.

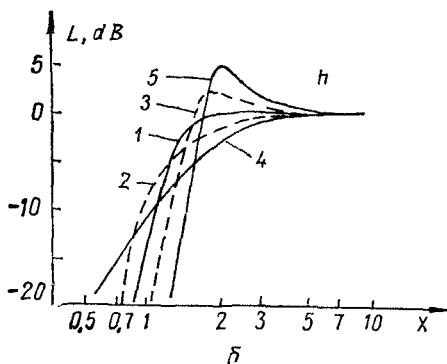
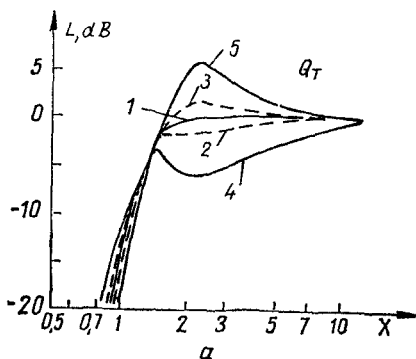
Последното изискване е поставено, тъй като е установено, че загубите стесняват честотния обхват в областта на ниските честоти. На фиг. 3.23 съгласно с [35] е дадена една максималноплоска характеристика на озвучително тяло с пасивен излъчвател без загуби и изменението ѝ от загуби в пасивната мембрана при $Q_n = 5$. При наличие на загуби долната гранична честота се увеличава.

Озвучителните тела с пасивна мембрана притежават редица предимства, които могат да се реализират на практика без съществени проблеми, докато реализацията им при озвучителни тела с фазоинвертор срещу значителни затруднения, а в някои случаи е и невъзможна. Това се отнася преди всичко до постигането на по-ниска долна гранична честота. За определен обем на озвучителното тяло с пасивна мембрана и при зададен високоговорител може да се получи същата честотна характеристика и същата максимално допустима мощност, каквито могат да се по-

лучат и от озвучително тяло с фазоинвертор със същия обем. При това, ако гъвкавостта на окачването е достатъчно голяма, а загубите в окачването — малки, необходимата резонансна честота на обема може да се получи без особени затруднения. Ако се спазват дадените препоръки за избор на пасивна мембрана, конструирането на озвучително тяло с пасивна мембрана не е по трудно от конструирането на озвучително тяло с фазоинвертор. Основната разлика е в това, че желаната резонансна честота на обема f_0 се получава чрез промяна на масата на пасивната мембрана вместо акустичната маса на въздуха в тръбата на фазоинвертора. Разбира се, това е предимство за озвучителното тяло с пасивна мембрана.

Все пак трябва да се има предвид, че ако озвучителното тяло с пасивна мембрана не бъде конструирано правилно, може да се получат много нежелани характеристики. На фиг. 3.24 а съгласно [35] са дадени честотните характеристики на озвучително тяло с пасивна мембрана с параметри, точно отговарящи на изискванията за максимално плоска характеристика (крива 1), и при реализиране на Q_T , различаващ се от тези изисквания, като останали-

те параметри са запазени непроменени. Във всички случаи $\delta = \alpha$. Крива 2 е за стойност на Q_T , която е с 20% по-малка от оптималната, крива 3 — с 20% по-голяма, крива 4 — с 50% по-малка и крива 5 — със 100% по-голяма. На фиг. 3.24 б съгласно същия източник са дадени честотните характеристики на озвучително тяло с пасивна мембрана при различни стойности на



Фиг. 3.24

резонансната честота f_0 на обема, т. е. на параметъра h . Крива 1 съответствува на изискванията за максимално плоска характеристика. Крива 2 е за случая, когато f_0 е с 20% от по-малка стойност от оптималната, крива 3 — с 20% по-голяма, крива 4 — с 50% по-малка и крива 5 — с 50% по-голяма.

От графиките се установява, че разбросът на параметрите оказва много голямо влияние върху хода на честотната характеристика и следователно върху показателите на озвучително тяло с пасивен излъчвател. Затова трябва да се приеме за основателно становището, че озвучителни тела с пасивна мембрана могат да произвеждат само реномирани производители. За организиране на такова производство са необходими две основни предпоставки:

Първата предпоставка е наличие на висококвалифицирани специалисти със значителен опит в конструирането на озвучителни тела.

Втората предпоставка е наличието на стабилно производство на високоговорители, при което се гарантират в определени тесни граници параметрите на високоговорителите, оказващи влияние върху точната настройка на озвучителните тела с пасивна мембрана. Задължително е производството да разполага с необходимата измервателна апаратура за контрол на основните параметри на високоговорителя.

В извънпроизводствени (любителски) условия конструирането на озвучителни тела с пасивна мембрана може да има успех само ако точно се знаят основните параметри на използвания високоговорител. Освен това е желателно да се измерят основните параметри на реализираното озвучително тяло с пасивна мембрана — обезателно трябва да се измери импедансната му характеристика. В областта на ниските честоти тя трябва да бъде крива с два максимума (почти равни по ниво) и минимум между тях, който настъпва при честота, приблизително равна на f_0 .

3.5. ОСНОВНИ СВЕДЕНИЯ И ПАРАМЕТРИ НА ОЗВУЧИТЕЛНИТЕ ТЕЛА

3.5.1. Класификация на озвучителните тела

Според броя на обхватите, на които е разпределен възпроизвежданият звуков спектър, озвучителните тела се класифицират, както следва:

а. *Еднолентови озвучителни тела* — целият звуков спектър

се възпроизвежда само от един високоговорител или от група паралелно работещи високоговорители.

б. Двулентови озвучителни тела — съставени са от два високоговорителя, всеки от които възпроизвежда определена част от звуковия спектър. Могат да се използват и групи от паралелно работещи еднотипни високоговорители.

в. Трилентови озвучителни тела — съставени са от три високоговорителя или от три паралелно работещи групи от еднотипни високоговорители, всеки от които възпроизвежда определена част от звуковия спектър.

По аналогия се получава класификация за четирилентови, петлентови и т. нар. озвучителни тела.

Според обема на озвучителните тела те могат да се класифицират на *малки, средни и големи*, но границите ще се изменят с времето, тъй като озвучителните тела непрекъснато намаляват своя обем. Считаните доскоро озвучителни тела със среден обем вече изглеждат с голям обем.

В зависимост от електроакустичните показатели озвучителните тела се класифицират на:

а. Озвучителни тела от Hi-Fi клас.

б. Озвучителни тела за обща употреба.

3.5.2. Геометрични определения

Определенията, дадени при високоговорителите, по принцип са в сила и за озвучителните тела. Тук се налага да се даде известно пояснение за работния център. Ако не е посочен в документацията на озвучителното тяло, той се определя по следния начин:

за озвучителни тела, изградени от еднотипни високоговорители, работният център съвпада с геометричния център на симетрия на работните центрове на високоговорителите;

за озвучителни тела, изградени от разнотипни високоговорители, работният център съвпада с геометричния център на симетрия на работните центрове само на високочестотните високоговорители.

3.5.3. Основни електрически и електроакустични параметри на озвучителните тела

Основните размери на едно озвучително тяло представляват параметрите на монтирания в тялото високоговорител. Веднага трябва да се поясни, че те се различават от параметрите на ви-

сокоговорителя, измерени на стандартен акустичен екран. Промяната се дължи на влиянието на акустичното оформяне. Използването на повече от един високоговорител в дадено озвучително тяло по принцип не променя същността на явленията. Особеностите ще бъдат пояснявани за всеки конкретен случай. Необходимо е тук да се пояснят някои общи положения като:

а. Резонансна честота на озвучителното тяло. Това е резонансната честота на монтирания в озвучителното тяло нискочестотен високоговорител. Понятието има смисъл при озвучителните тела само ако използваните високоговорители са еднотипни или ако резонансната честота на един или няколко еднотипни високоговорителя е значително по-ниска от резонансната честота на останалите. Това условие е изпълнено при озвучителните тела, функциониращи на многоленков принцип. При тях нискочестотните високоговорители имат значително по-ниска резонансна честота от тази на средночестотните и високочестотните.

За резонансна честота на озвучително тяло се говори само при озвучителните тела със затворен обем. За тази честота входният импеданс на озвучителното тяло със затворен обем получава максимална стойност. При озвучителните тела с фазоинвертор и озвучителните тела с пасивна мембрана входният импеданс се характеризира с два максимума.

б. Паспортна мощност. Определя се в резултат на изпитване на озвучителното тяло при въздействие на шумов сигнал, чиято спектрална плътност съответствува на средната спектрална плътност на музикални и говорни програми. Установяването на тази средностатистична крива става с много проблеми, свързани с голямото разнообразие на музикалните изпълнения. Все пак в резултат на дългогодишни изследвания МЕК препоръчва използването на шумов сигнал с определена спектрална плътност, която се получава на изхода на филтъра, като на входа на филтъра се подава бял шум. Честотната характеристика на филтъра има спадещ характер в обхвата над 160 Hz, а белият шум се характеризира с това, че при нарастване на честотата енергията му нараства с 3 dB/oct. В крайна сметка нивото на напрежението се понижава с нарастване на честотата. Следователно мощността, която се подава на средночестотните и високочестотните високоговорители, е значително по-малка от мощността на озвучителното тяло. Например за озвучително тяло с паспортна мощност 40 W на високочестотния високоговорител се подава мощност не повече от 0,5 W (при разделителна честота 5000 Hz), а на средночестотния високоговорител (при обхват от 1000 до 5000 Hz) — не повече от 5 W. Крайно грешно е мнението, че

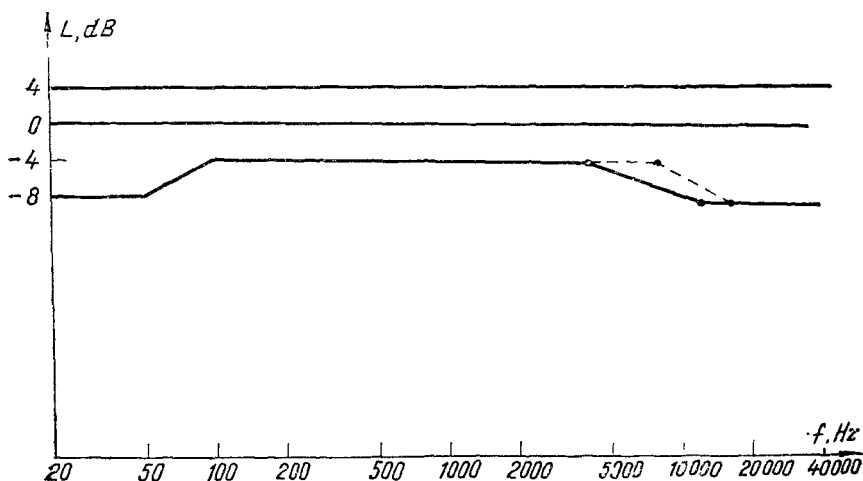
ако за едно озвучително тяло е обявена паспортна мощност 40 W, може да му се подава синусоидален сигнал с произволна честота от номиналния му честотен обхват и с големина, съответстваща на 40 W. Ако озвучителното тяло се изпитва при тези условия, почти е сигурно, се високочестотните му високоговорители ще бъдат повредени, а е възможно да се повредят и средночестотните високоговорители.

Средностатистичната крива за спектралното разпределение на енергията на музикалните и говорните програми, утвърдена от МЕК, се препоръчва и в рекомендациите на СИВ. Тя е стандартизирана в нашата страна и във всички останали социалистически страни. Възприета е и от почти всички западноевропейски производители на озвучителни тела. Независимо от това съществуват мнения, че тази крива не съответствува на съвременните изисквания или по-точно не съответствува на средностатистичното спектрално разпределение на енергията в съвременните музикални творби. Известно е, че съвременната естрадна и джазова музика съдържа високочестотни компоненти с много високо енергийно ниво. В резултат на това не са редки случаите на дефектиране на високочестотните високоговорители. Съобразявайки се с това, производителите осигуряват значителен резерв на високочестотните си високоговорители. Измененията в енергийното разпределение са взети предвид и от МЕК. От няколко години е предложена за обсъждане нова крива за спектралното разпределение на енергията на шумовия сигнал, с който ще се изпитват електроакустичните преобразуватели. Предложени са съответно и два филтъра, с които може да се получи това разпределение, като на входа на единия филтър трябва да се подава бял шум, а на входа на втория филтър — розов шум. След окончателното им утвърждаване от МЕК тези изменения ще намерят своето отражение и в националните ни стандарти.

3.5.4. Основни параметри на озвучителните тела от Hi-Fi клас

Изискванията за озвучителни тела от Hi-Fi клас са твърде различни в отделните страни. Доскоро единственият документ, който определяше тези изисквания, беше националният стандарт на ФРГ *DIN 45500*. Той бе приет неофициално като международен стандарт за Hi-Fi изделия. През 1978 г. СИВ утвърди стандарт № 1356 за Hi-Fi озвучителни тела. Изискванията в двата документа са твърде близки. Те са следните:

— Честотният обхват да бъде с долна гранична честота, не по-висока от 50 Hz, и горна гранична честота, не по-ниска от 12 500 Hz (съгласно DIN 45500 е 16 000 Hz). Долната и горната гранична честота се определят като честоти, за които звуково-



Фиг. 3.25

то налягане е с 8 dB по-ниско от средното звуково налягане за обхвата 100—4000 Hz.

— Неравномерността на честотната характеристика да бъде не по-голяма от допусковото поле, показано на фиг. 3.25 (с пунктир са дадени изискванията по DIN 45 500). Нивото 0 dB трябва да съвпада с нивото на средното звуково налягане за обхвата 100—4000 Hz. Върхове и падини с широчина, по-малка от $\frac{1}{8}$ от октавата, се пренебрегват.

— Нивото на средното за октава звуково налягане в обхвата 250—8000 Hz не трябва да се различава за отделните образци от даден тип озвучително тяло с повече от 3 dB.

— Честотните характеристики, определени по работната ос и на $\pm 15^\circ$ от нея в хоризонталната и вертикалната равнина на озвучителното тяло, при наслагване една върху друга не трябва да се различават с повече от 4 dB за нито една честота в обхвата 250—8000 Hz. Ако е определено еднозначно положението на озвучителното тяло при експлоатацията му, достатъчно е то да удовлетворява изискването само в хоризонталната равнина.

Честотната характеристика се определя задължително чрез шумов сигнал (розов шум) с широчина $\frac{1}{3}$ от октавата. Препоръчва се измерването да се извършва в условията на свободно полупространство.

— Озвучителното тяло трябва да може да създава в обхвата 100—4000 Hz средно звуково налягане на 1 m от работния център по работната ос с ниво 96 dB. Това налягане се нарича номинално звуково налягане. Консумираната при това електрическа мощност не трябва да бъде по-голяма от паспортната мощност на озвучителното тяло. Тя се нарича работна мощност.

— Коефициентът на хармонични изкривявания трябва да бъде: в обхвата 250—1000 Hz $\leq 3\%$;

в обхвата 1000—2000 Hz да не превишава стойностите, определени от правата линия, получена от свързването на точките, съответстващи на 3% при 1000 Hz и на 1% при 2000 Hz;

в обхвата 2000—8000 Hz $\leq 1\%$.

Измерването на коефициента на хармонични изкривявания се извършва при подаване на озвучителното тяло на следната електрическа мощност:

в обхвата 250—1000 Hz — на цялата работна мощност;

в обхвата 1000—2000 Hz — на 0,5 от работната мощност;

в обхвата 2000—8000 Hz — на 0,25 от работната мощност.

Всички върхове в честотната характеристика на коефициента на хармонични изкривявания с широчина до $\frac{1}{8}$ от октавата се пренебрегват. Допуска се пренебрегването и на три върха с широчина $\frac{1}{3}$ от октавата.

— Препоръчва се номиналният импеданс да бъде 4 или 8 Ω .

— Музикалната мощност трябва да бъде не по-малка от 10 W.

Озвучителните тела, които не отговарят дори на едно от изискванията за категория Hi-Fi, се категоризират като озвучителни тела за обща употреба.

3.5.5. Фактори, които определят основните параметри на озвучителните тела

a. Резонансна честота

Резонансната честота на високоговорителите зависи от акустичното им оформяне и от акустичното им натоварване. Ако се измери резонансната честота на високоговорител без акустичен

екран и със стандартен акустичен екран, ще се установи, че във втория случай тя е по-ниска. Това се дължи на обстоятелството, че реакцията на средата в двата случая е различна. В условията на акустично късо съединение присъединената маса на въздуха към трептящата система на високоговорителя е по малка. Монтираният на безкраен акустичен екран високоговорител ще има най-ниска резонансна честота, защото масата на присъединения въздух ще бъде най-голяма — сътрептящи маси има от двете страни на трептящата система.

Резонансната честота f_0 на озвучителното тяло със затворен обем, т. е. на високоговорител, монтиран към затворен обем, се определя съгласно с фиг. 3.5 от зависимостта

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{m'c_e}}, \quad (3.72)$$

където

$$c_e = \frac{cc_v}{c+c_v}. \quad (3.73)$$

Ако се приеме $m' \approx m$ и се замести c_e от (3.73), получава се

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{m \frac{c}{c+c_v}}} = f_p \sqrt{1 + \frac{c}{c_v}}. \quad (3.74)$$

Вижда се, че резонансната честота на озвучителното тяло е по-висока от тази на високоговорителя, монтиран на безкраен акустичен екран. При това нарастването на f_0 зависи от отношението $\frac{c}{c_v}$. С намаляване гъвкавостта на обема c_v отношението $\frac{c}{c_v}$ се увеличава и резонансната честота на озвучителното тяло също нараства. Зависимостта не е линейна и зависи от това, дали са изпълнени неравенствата $1 \gg \frac{c}{c_v}$ или $1 \ll \frac{c}{c_v}$.

Зависимостта (3.74) показва, че за да не се увеличава резонансната честота на озвучителното тяло, необходимо е гъвкавостта на обема c_v да бъде голяма — по възможност значително по-голяма от c . Ако се замести c_v от (3.5) в (3.74), за резонансната честота на озвучителното тяло се получава

$$f_0 = f_p \sqrt{1 + \phi p_s c \frac{S^2}{V}}. \quad (3.75)$$

Съгласно (3.75) възможно е $f_0 \approx f_p$ само ако S е много малко, а V е много голямо. Оттук се налага много важният извод, че при зададен обем на озвучителното тяло, ако се използва високоговорител с по-малка звукоизлъчваща повърхност S , резонансната честота на озвучителното тяло ще бъде по-ниска или точно резонансната честота на високоговорителя в озвучителното тяло ще нарасне в по-малка степен. Ако обаче високоговорителят с по-малка звукоизлъчваща повърхност има значително по-висока резонансна честота, тогава и резонансната честота на озвучителното тяло ще бъде също по-висока.

Нискочестотните високоговорители имат твърде големи стойности на гъвкавостта на окачване. Например за високоговорител с резонансна честота 30 Hz и маса на подвижната му система 20 g гъвкавостта на окачване е $c = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ mN}^{-1}$.

Гъвкавостта на затворен обем 20 dm^3 с диаметър на отвора 18 cm е $c_v = 0,22 \cdot 10^{-3} \text{ mN}^{-1}$.

Ако високоговорителят се монтира към този затворен обем, неговата резонансна честота ще бъде $f_0 = 80 \text{ Hz}$. (3.75)

От приведенния пример се вижда, че резонансната честота на озвучителното тяло се определя главно от масата на трептящата система на високоговорителя и гъвкавостта на затворения обем. С цифровите данни от примера се получава

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{mc_v}} = 76 \text{ Hz}. \quad (3.75 \text{ б})$$

Разликата между f_0 и f'_0 е незначителна (само 5%).

Зависимостта (3.74) може да се представи и в следния вид:

$$f_0 = f'_0 \sqrt{1 + \frac{c_v}{c}}. \quad (3.76)$$

Ако е изпълнено условието $1 \gg \frac{c_v}{c}$, се получава $f_0 \approx f'_0$.

Този резултат се потвърждава и от примера.

Зависимостта (3.76) показва, че гъвкавостта c не бива да бъде малка, защото ще се получи $f_0 \gg f'_0$, което е крайно нежелателно. В същото време обаче е излишно конструкторите да се стремят да увеличават в значителна степен гъвкавостта на високоговорителя, тъй като това няма да доведе до чувствително намаляване резонансната честота на озвучителното тяло, а динамичната стабилност на високоговорителя ще се намали. От (3.75 а) и (3.75 б) се вижда, че увеличаването на c от $1,38 \cdot 10^{-3}$ до безкрайност води до намаляване резонансната честота на озвучителното

тяло от 80 на 76 Hz. При зададения обем и диаметър на високоговорителя чрез изменение на c по-ниска резонансна честота от 76 Hz не може да се получи, разбира се, ако е постоянна масата на подвижната система.

Ако в същия затворен обем се постави високоговорител с висока резонансна честота ($f_{p1}=50$ Hz), но със същата маса, т. е. с по-малка гъвкавост ($c_1=0,47 \cdot 10^{-3}$ mN $^{-1}$), резонансната честота на озвучителното тяло ще бъде $f_{01}=88$ Hz.

Вижда се, че резонансната честота f_{01} на озвучителното тяло се е увеличила спрямо f_0 само с 10% при увеличаване резонансната честота на високоговорителя с близо 70%.

В случая, когато $c_v \ll c$, се казва, че е реализирано *въздушно окачване* на подвижната система на високоговорителя (казва се и *акустично окачване*).

От извършения анализ може да се направи заключението, че за реализиране на ниска резонансна честота на озвучително тяло със затворен обем е необходимо използваният високоговорител да бъде с достатъчно ниска собствена резонансна честота и малка звукоизлъчваща повърхност, а затвореният обем да бъде голям.

б. Качествен фактор

Пълният качествен фактор на озвучително тяло със затворен обем съгласно с фиг. 3.6 се определя от следната зависимост:

$$Q_T = \frac{1}{r'} \sqrt{\frac{m'}{c_e}} \approx \frac{1}{r} \sqrt{\frac{m}{c}} \left(1 + \frac{c}{c_v} \right) = Q_{Tp} \sqrt{1 + \frac{c}{c_v}}. \quad (3.77)$$

В (3.77) е прието, че $m' \approx m$ и $r' \approx r$. При тези условия качественият фактор на озвучителното тяло Q_T е толкова по-голям от качествения фактор на високоговорителя Q_{Tp} , колкото е по-голяма резонансната честота на озвучителното тяло от тази на високоговорителя.

От (3.77) се вижда, че Q_T ще има малка стойност (близка до Q_{Tp}) само ако c_v има голяма стойност, т. е. обемът V да бъде голям.

Следователно за реализиране на озвучително тяло със затворен обем с нисък качествен фактор е необходимо използваният високоговорител да има нисък качествен фактор и обемът на озвучителното тяло да бъде голям. Ако тези условия не са изпълнени, трябва да се търсят начини за допълнително намаляване на Q_T .

Върху качествения фактор оказва влияние и големината на

еквивалентната звукоизлъчваща повърхност на високоговорителя. При по-малка повърхност нарастването на Q_T спрямо Q_{T_p} е в по-малка степен. По отношение на качествения фактор на озвучителни тела с обем до 30 dm^3 добри резултати се получават също с високоговорители с диаметър 200 и 160 mm.

Върху качествения фактор на озвучителните тела може да се влияе по различни начини. Тук се посочва само най-универсалният — използването на звукопоглъщащ материал, с който се запълва обемът (или част от него) на озвучителното тяло. По този начин се увеличават активните загуби на трептящата система на високоговорителя и се увеличава гъвкавостта на обема (намалява ψ).

Количеството на звукопоглъщащия материал зависи от това, с колко трябва да се понижи Q_T и какъв материал се използва. Обикновено то се определя опитно. На нашия пазар се продават възглавници от ямболен (на влакна). Този материал е много подходящ за звукопоглъщащ материал в озвучителните тела. За обем до 30 dm^3 е достатъчно да се постави половината от съдържанието на една възглавница. За обем около 50 dm^3 трябва да се постави цяла възглавница.

Не бива да се забравя, че запълването на обема на озвучителното тяло със звукопоглъщащ материал води до промяна на начина на свиване и разреждане на въздуха в него — процесът става изотермичен вместо адиабатичен, в резултат на което $\psi=1$ и гъвкавостта на обема се увеличава 1,4 пъти. Това е еквивалентно на увеличаване на обема на тялото с 40 %. Увеличаването на гъвкавостта намалява качествения фактор и резонансната честота на озвучителното тяло. Например при $\psi=1$ вместо обем $V_1 = 28 \text{ dm}^3$ ще се получи нова стойност $V'_1=20 \text{ dm}^3$ (литра).

в. Ефективен честотен обхват и неравномерност на честотната характеристика

Ефективният честотен обхват на възпроизвеждане на озвучителните тела трябва да се разглежда в два аспекта. Първо трябва да се осигури малка неравномерност на честотната характеристика в обхвата от 100 до 8000 Hz. В този обхват неравномерността се определя главно от неравномерността на използваните високоговорители (като известно влияние оказва акустичното оформление). Голямо влияние обаче оказва разделителният филтър. Ако не е правилно конструиран, той може да предизвика както ядини, така и върхове в честотната характеристика и с

това да се увеличи неравномерността ѝ. При използване на повече от един високоговорител за възпроизвеждане на даден под-обхват (с цел да се увеличи номиналната мощност) съществува опасност от интерференции, които също може да предизвикат появата на върхове и падини в честотната характеристика. Използуваните високоговорители за възпроизвеждане на различните подобхвати трябва да създават средно звуково налягане, чието ниво да не се различава помежду си с повече от 1 dB в частта от обхвата 100—8000 Hz, който възпроизвежда съответният високоговорител.

В честотния обхват под 100 Hz ефективността на преобразуване зависи от типа на акустичната система на озвучителното тяло — затворен обем, с фазоинвертор или с пасивна мембрана. Получаването на възможно по-ниска долна гранична честота при запазване на условията за максимално плоска характеристика бе достатъчно задълбочено анализирано.

Горната гранична честота се определя единствено от тази на високоговорителя, който е предназначен да възпроизвежда високите честоти (поне теоретично). На практика известно влияние оказва декоративното оформяне на озвучителното тяло — намиращата се пред високоговорителя декоративна решетка от плат, метал, пластмаса или друг материал. Желателно е този елемент да не оказва влияние върху качествените показатели на озвучителното тяло. Преди всичко той не бива да поглъща звукова енергия, както се казва, да бъде акустично прозрачен. В този смисъл за добри се приемат декоративните елементи, които намаляват нивото на звуковото налягане за сигнали с честота 20 kHz с не повече от 0,5 до 1 dB. Металните и пластмасовите решетки предизвикват и интерференции за сигналите с честота над 10 kHz и е възможно да предизвикат дълбока падина в честотната характеристика (над 10 dB) с много стръмни склонове. Такива явления се наблюдават по-често при решетките с кръгли отвори, поради което е за предпочитане пред високочестотните високоговорители да се използват декоративни решетки с овални или квадратни отвори.

г. Чувствителност

Съгласно изискванията на националните ни стандартизационни документи, а също и на редица чуждестранни стандарти или международни документи със стандартизационен или препоръчителен характер чувствителността на озвучителните тела се определя в честотния обхват от 250 до 5000 или до 8000 Hz.

В този обхват чувствителността на озвучителното тяло се определя предимно от чувствителността на използваните високоговорители. В областта на ниските честоти върху чувствителността оказва известно влияние и видът на акустичното оформяне, а също и избраните параметри за системата, но то не е значително и се отнася за обхвата до 800—1000 Hz.

д. Нелинейни изкривявания

Влиянието на обема на озвучителното тяло върху нелинейните му изкривявания е значително. В областта на ниските честоти нелинейните изкривявания на озвучителното тяло със затворен обем са значително по малки от тези на високоговорителя. Това се дължи на обстоятелството, че гъвкавостта на обема линеаризира общата гъвкавост на системата и че гъвкавостта на подвижната система на високоговорителя е значително по-голяма от тази на озвучителното тяло. При по-малък обем на озвучителното тяло неговата трептяща система ще трепти с по-малки амплитуди и нелинейните изкривявания в областта на ниските честоти ще бъдат по малки. Вижда се, че влиянието на обема на озвучителното тяло върху параметрите му е различно. За ниска резонансна честота и нисък качествен фактор е необходим голям обем, а за по-малки нелинейни изкривявания в областта на ниските честоти е необходим малък обем. Следователно конструкторът на озвучителни тела трябва да търси оптимума между тези противоречиви изисквания. Естествено този оптимален обем зависи от размерите на високоговорителя. Конструиранияте от различни фирми голям брой озвучителни тела дават достатъчно основание да се обобщят резултатите и да се даде в табл. 3.1 следната препоръка за оптимален обем V_{opt} на озвучителните тела в зависимост от номиналния диаметър $D_{ном}$ на високоговорителя:

Таблица 3.1

$D_{ном}$	mm	125	160	200	250	315
V_{opt}	dm ³	8—12	14—18	20—25	30—35	45—60

Нелинейните изкривявания при озвучителните тела с фазоинвертор и с пасивна мембрана зависят в значителна степен от избора на системата от параметри и на вида на честотната харак-

теристика. При честотата, за която входният импеданс получава минимум, нелинейните изкривявания намаляват поради това, че за тази честота амплитудата на трептене на мембраната е малка.

В областта на средните и високите честоти нелинейните изкривявания на озвучителното тяло се определят предимно от самите високоговорители, акустичното оформяне не оказва влияние.

е. Насоченост на озвучителните тела

Насочеността за дадена честота се определя единствено от размерите на високоговорителите. Известно влияние може да окаже акустичното оформяне на височестотните високоговорители. Ако тези високоговорители се монтират от вътрешната страна на лицевата дъска на озвучителното тяло, отворът в дъската ще представлява рупор, който увеличава насочеността на високоговорителите. Затова височестотните високоговорители (особено куполните) се монтират от предната страна на лицевата дъска.

ж. Преходни процеси

За озвучително тяло със затворен обем те се определят главно от качествения фактор — колкото по-нисък е качественият фактор, толкова по-кратки ще бъдат преходните процеси. Запълването на обема на озвучителното тяло със звукопоглъщащ материал намалява продължителността на преходните процеси, тъй като увеличава активните загуби на системата и намалява качествения фактор. Озвучително тяло без звукопоглъщащ материал възпроизвежда твърде размазано, неясно дадена музикална картина поради значителната продължителност на преходните процеси. След поставяне на звукопоглъщащ материал възпроизвеждането става чисто и ясно, защото преходните процеси са станали кратки.

Преходните процеси при озвучителните тела с фазоинвертор зависят от вида на избраната честотна характеристика. Озвучителни тела, чиито честотни характеристики имат по-плавен характер в обхвата на ниските честоти (около и под f_3), имат и по-кратки преходни процеси, т. е. имат по-добра преходна характеристика. Ако изискванията към преходната характеристика са големи, би следвало да се приеме честотната характеристика на озвучителното тяло да съответствува на височестотен филтър квази-Батърворт от трети ред.

Разбира се, подобряването на преходната характеристика е за сметка на влошаване възпроизвежда нето на сигналите с ниска честота, т. е. за сметка на стесняване на честотния обхват. Озвучително тяло, чиято честотна характеристика съответствува на високочестотен филтър на Батърворт от четвърти ред, има по-добра преходна характеристика от озвучително тяло, чиято честотна характеристика съответствува на филтър на Чебишев от четвърти ред.

Преходните процеси при озвучителните тела с пасивна мембрана са подобни на тези при озвучителните тела с фазоинвертор. Особеното тук е, че продължителността на преходните процеси зависи от стойността на обобщения коефициент δ . Ако δ е много голям, продължителността на преходните процеси на озвучително тяло с пасивна мембрана е еднаква с тази при озвучително тяло с фазоинвертор. Ако δ има сравнително малка стойност, продължителността на преходните процеси се увеличава, т. е. преходната характеристика се влошава. Чистото прозрачно възпроизвеждане на музикалните програми изисква озвучителните тела да имат кратки преходни процеси. Това е още едно съображение, налагащо при озвучителните тела с пасивна мембрана да се изисква колкото е възможно по-голяма стойност на δ .

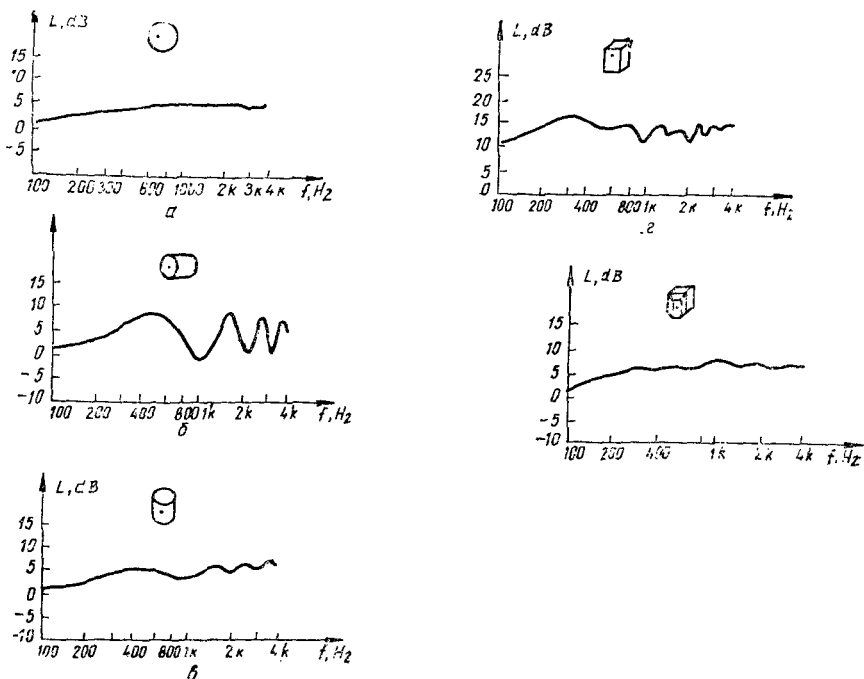
3.6. ВЛИЯНИЕ НА ВИДА НА АКУСТИЧНОТО ОФОРМЯНЕ ВЪРХУ ЧЕСТОТНАТА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ОЗВУЧИТЕЛНИТЕ ТЕЛА

Независимо от типа на озвучителното тяло (затворен обем, с фазоинвертор или с пасивна мембрана) неговата кутия може да се оформи по различен начин, тя може да представлява една или друга геометрична фигура. Установено е, че формата на кутията оказва влияние върху хода на честотната характеристика на озвучителното тяло. По-обстойно изследване по този въпрос е провел Хари Олсон [32]. Той е изследвал 12 вида акустични оформяния, като за звукоизточник е използвал един високоговорител с много малък диаметър на мембраната — около 22 mm. Мембраната е била с конусна форма. Изследванията са проведени в обхвата от 100 до 4000 Hz. Поради малките размери на високоговорителя той излъчва ненасочено в изследвания обхват — понижаването на излъчването на 90° от оста спрямо излъчването по оста е било само 1 dB. Изследванията са били проведени при еднакви условия, като измерванията са проведени в звукозаглушена камера в условията на свободно звуково поле. Високоговорителят е бил захранван със синусоидален електрически сигнал. Кутиите са били изработени от метал, за да не поглъщат енер-

гия от звуковите вълни, които отразяват. По такъв начин влиянието на интерференционните явления ще се проявява по-отчетливо. Тук ще бъдат дадени някои от получените резултати.

а. Сферична кутия

Честотната характеристика е дадена на фиг. 3.26 а. Вижда се, че в обхвата от 100 до 600 Hz нивото на създаваното звуково налягане нараства общо с 5 dB, след което остава почти



Фиг. 3.26

постоянно до 4000 Hz. Честотната характеристика е плавна, няма върхове и падини. Нейният ход се дължи на липсата на остри върхове, в които би се получил рязък преход на отразяване на звуковите вълни.

б. Цилиндрична кутия

Високоговорителят е монтиран в средата на една от основите на цилиндъра. Честотната характеристика е дадена на фиг. 3.26б. Както се вижда, тя е много неравномерна — общата ѝ неравномерност е 11 dB. Характерно за нея е наличието на върхове и падини, които определят голямата неравномерност. Те свидетелствуват за силни интерференции между преките звукови вълни и отразените и за рязък преход в ръбовете. Основно влияние оказва основният ръб, който има формата на окръжност.

в. Цилиндрична кутия

Високоговорителят е монтиран в средата на околната повърхнина. Честотната характеристика за този случай е дадена на фиг. 3.26 в. Вижда се, че тя е много по-пласка, върховете и падините са по-слабо изразени. Общата неравномерност е 6 dB. Изглаждането на характеристиката спрямо цилиндрична кутия, в която високоговорителят е монтиран в основата ѝ, се дължи на по-малкото ръбове — около високоговорителя има един пояс без ръбове, а от горната и долната му страна са ръбовете на основите

г. Кутия с формата на правоъгълен паралелепипед

Високоговорителят е монтиран несиметрично на една от по-големите стени на кутията. Честотната характеристика е показана на фиг. 3.26 г. Вижда се, че това е най-често срещаната честотна характеристика на произвежданите озвучителни тела. И това е естествено — формата на кутията съвпада с най-често използваната за озвучителните тела. Общата неравномерност не е голяма — около 7 dB. Около 320 Hz има един максимум, след който следват няколко минимума и максимума с неголямо отклонение от средното ниво. Тази характеристика е по-лоша от характеристиката, която се получава със сферична кутия, но е по-добра от характеристиката при случай б. Обяснението за хода на характеристиката е: разстоянието от високоговорителя до различните точки на ръбовете е различно и интерференчните явления не са ярко изразени.

д. Кутия с формата на пресечена пирамида и правоъгълен паралелепипед

Високоговорителят е монтиран на малката основа на пресечената пирамида, несиметрично по направление на по-дългата страна на тази стена. Честотната характеристика е дадена на фиг. 3.26 д. Вижда се, че тя е много близка до честотната характеристика, която се получава със сферична кутия. Този ход се обяснява с наклонените стени на пресечената пирамида, които спомагат за по-плавен преход на отраженията на звуковите вълни. Общата неравномерност е около 7 dB, но в обхвата от 300 до 4000 Hz е не повече от 2 dB.

В заключение може да се каже, че формата на кутията на озвучителното тяло има съществено значение за формиране на честотната характеристика. От значение е също така и мястото на закрепване на високоговорителя. Явленията се усложняват още повече при използване на повече от един високоговорител, особено ако тези високоговорители функционират в един и същи честотен обхват.

Полезно е да се имат предвид следните основни препоръки: високоговорителят не трябва да се монтира симетрично в кутия, която има остри ръбове;

желателно е кутията на озвучителните тела да се изработват със заоблени ръбове, особено страничните (по-дългите).

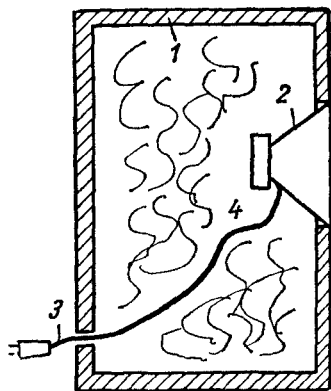
КОНСТРУИРАНЕ НА ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА ЗА ДОМАШНО ПОЛЗВАНЕ

4.1. ЕДНОЛЕНТОВИ ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА

Принципната конструкция на еднолентово озвучително тяло със затворен обем е дадена на фиг. 4.1.

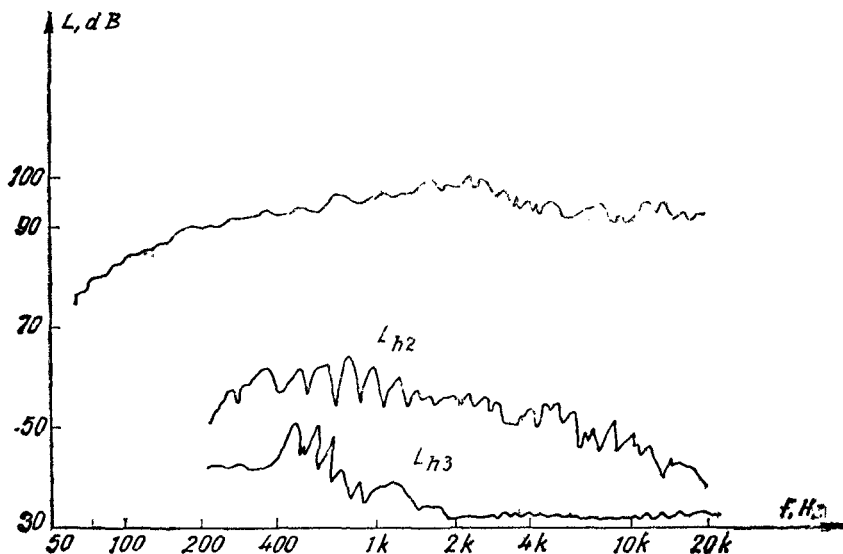
Еднолентовите озвучителни тела са изградени от кутия 1 (акустично оформяне), един или повече високоговорители 2, изведен шнур със съединител 3 и лицев декоративен елемент — решетка от плат, метал, полистирол или друг подобен материал. В обема на озвучителното тяло се поставя звукопоглъщащ материал. Високоговорителите (ако са повече от един) се свързват паралелно или последователно и на всички се подава целият честотен спектър от електрически сигнали, съответстващ на възпроизвежданата музикална или говорна програма.

За практическа реализация на еднолентови озвучителни тела се използват широколентови високоговорители, които обикновено не отговарят на изискванията за Hi-Fi клас. Затова еднолентовите озвучителни тела се характеризират със сравнително ниски качествени показатели и се причисляват към категорията озвучителни тела за обща употреба. Използват се предимно за комплектуване към радиоприемни устройства, телевизионни приемници, грамофони и усилватели в моно- и стереоизпълнение от втори и трети клас. Най-често еднолентовите озвучителни тела имат сравнително голяма чувствителност за сметка на по-тесен че-



Фиг. 4.1

стотен обхват и по-големи велинейни изкривявания. Поради високата им чувствителност те създават сравнително високо диво на звуковото налягане при консумиране на малка електрическа мощност. Затова се използват към устройства с малка изходна



Фиг. 4.2

мощност. Тези озвучителни тела са обикновено с неголям обем и често могат да се вместят между книгите в библиотеката. Основното при тях е ниската им цена.

Промисленото производство и асортиментът на произвежданите еднолентови озвучителни тела не са големи. В нашата страна се произвежда само озвучително тяло тип ОТМ2-07, което принадлежи към този клас. Основните му параметри са: паспортна мощност 6 W, номинален честотен обхват от 100 до 15 000 Hz при неравномерност на честотната характеристика не повече от 14 dB, характеристична чувствителност, не по-малка от $0,6 Pa W^{-0,5}$, коефициент на хармонични изкривявания, не по-голям от 3%. Номиналният му импеданс е 4 Ω . Честотната му характеристика, снета при 4 W на 1 m по оста, е дадена на фиг. 4.2, където са дадени и характеристиките на втория и третия хармоник. Посочените па-

раметри на озвучителното тяло са фактически измерени. Паспортната мощност може да се приеме за 8 W. Пред високоговорителя е поставена решетка от декоративен плат.

С произвежданите български широколентови високоговорители могат да се конструират и изработят в домашни условия еднолентови озвучителни тела със затворен обем, с които да се подобри звученето на притежавано радиотехническо устройство — радиоприемник, телевизионен приемник, грамофон и др. Озвучително тяло със затворен обем ще възпроизвежда много по-добре музикалните програми, отколкото монтираният към кутията високоговорител. Дори и при използване на същия високоговорител ще се получи по-добър ефект.

За озвучителните тела, които са обект на изчисление в книгата и не се произвеждат у нас (нямат промишлено типово означение), е възприето следното означение: първа цифра — брой на лентите; OT — озвучително тяло; две цифри, показващи паспортната мощност; цифра, определяща поредния номер от даден тип.

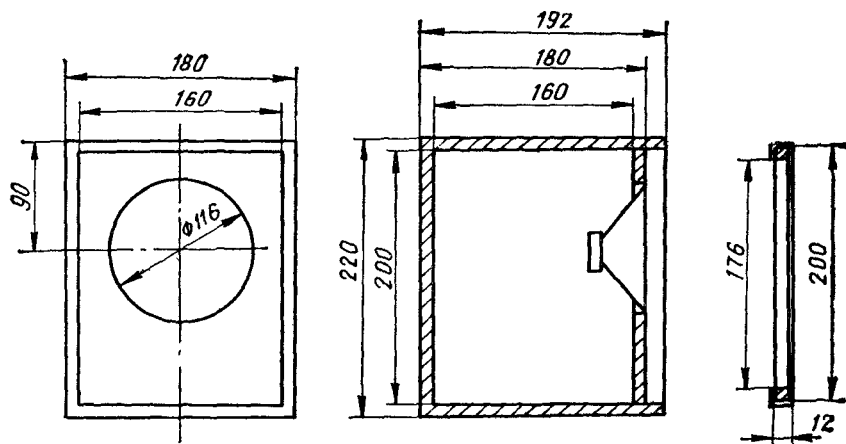
Еднолентово озвучително тяло тип 10Т6-1. Използва се кръгъл високоговорител с номинален диаметър $\varnothing 125$ mm тип ВК0822. По дадените в гл. I данни на високоговорителя може да се избере обем на озвучителното тяло и да се определи какви ще бъдат параметрите му. По-добре е обаче да се зададе резонансната му честота, която при озвучителните тела със затворен обем гарантира в значителна степен долната гранична честота. Ако се приеме за задоволителна долната гранична честота (на ниво — 10 dB) да бъде 80 Hz, тогава резонансната честота на озвучителното тяло може да се приеме 100 Hz. За еквивалентната гъвкавост на обема и на високоговорителя се получава $c_{me} = 0,48 \cdot 10^{-3} \text{ mN}^{-1}$. За гъвкавостта на обема се получава $c_{mv} = c_m = 0,96 \cdot 10^{-3} \text{ mN}^{-1}$, а обемът е $V = 5,4 \text{ dm}^3$.

В действителност обемът може да бъде и малко по-малък, тъй като в него ще се постави звукопоглъщащ материал, в резултат на което се намалява ϕ , а оттам и обемът V . Размерите на кутията на озвучителното тяло са дадени на фиг. 4.3*. При тези размери обемът на кутията ще бъде $V = 5,12 \text{ dm}^3$. Той е достатъчен за получаване на избраната долна гранична честота. За звукопоглъщащ материал може да се използва ямболова вата, минерална вата, изкуствен памук и други подобни материали. В това озвучително тяло е достатъчно да се постави 50 g звукопоглъщащ материал.

Кутията може да се изработи от шперплат с дебелина 10 mm

* Всички размери на кутиите на озвучителните тела са в mm.

или от плочи от дървесни частици (талашит) с дебелина 8—10 mm. Външната повърхност трябва да се фурнирова, а може и да се оцвети с черна лакова боя. Принципната конструкция на кутията е дадена на фиг. 4.3. Отворът за високоговорителя на лицевата



Фиг. 4.3

та повърхност на кутията трябва да се разположи несиметрично по височина. Това спомага за изглаждане на честотната характеристика на озвучителното тяло. Лицевата част на кутията трябва да се оцвети с черна лакова боя. Със същата боя трябва да се оцвети и видимата лицева повърхност на шасито на високоговорителя (ако не е оцветена от завода-производител). Това се налага от естетични съображения — да не прозират през декоративната решетка блестящи метални частици или неравностите по повърхността на кутията.

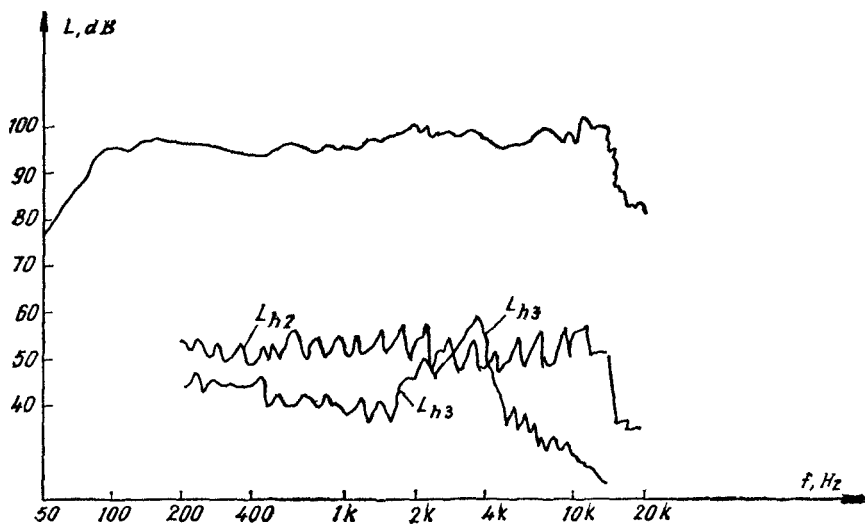
Високоговорителят трябва да се закрепи лицево (от външната страна на кутията) с рапидни (самонарязващи) винтове. Между високоговорителя и кутията трябва да се постави материал, който да осигури звуконепроницаемост. Може да се използва лента от гума или мек изкуствен материал. Най-добре е обаче да се постави болкит трайнопластичен, който намира широко приложение в строителството.

Декоративната лицева решетка може да се оформи като дървена рамка, върху която е добре опънат плат. Закрепването му става към задната страна на рамката, но без да се натрупват по

няколко слоя плат един върху друг. Той може да се залепи към рамката или да се закове с машинка за телбод. За декоративен плат може да се използва тревира, за предпочитане черна.

Изводният проводник трябва да бъде $2 \times 0,5 \text{ mm}^2$ или с по голямо сечение, с дължина около 5 m и да завършва на двуцифтов съединител. В отвора на кутията, през който преминава изводният проводник, трябва да се постави също болкит, за да се уплътни.

Паспортната мощност на озвучителното тяло е 6 W и то може да се комплектува към усилватели с номинална изходна мощност до 10 W без опасност от претоварване. Разбира се, усилвателят трябва да е разчетен за номинален товар 4Ω , неговото изходно съпротивление трябва да бъде много малко. Номиналният честотен обхват на озвучителното тяло ще бъде от 80 до 15 000 Hz при неравномерност на честотната характеристика до 12 dB. Коефициентът на хармонични изкривявания е малък — отговаря на изискванията за озвучителни тела от Hi-Fi клас.

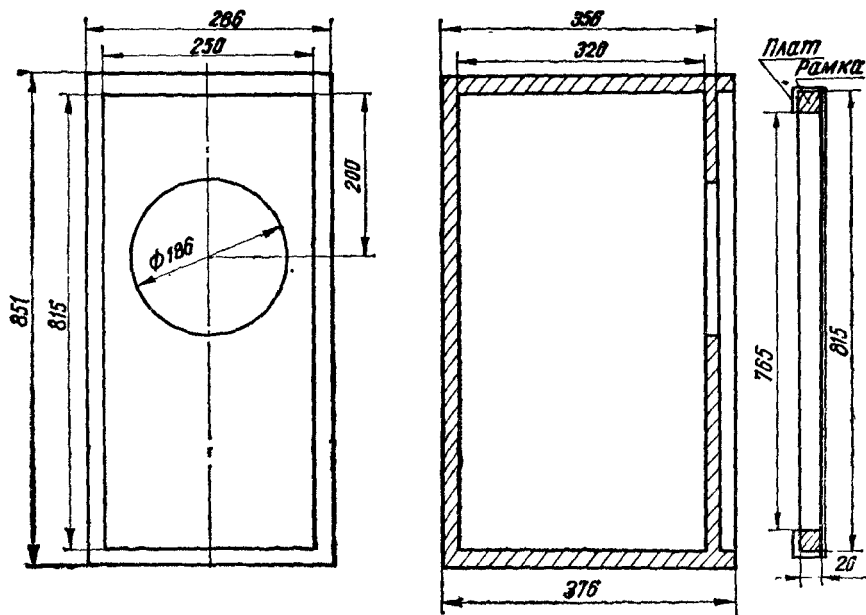


Фиг. 4.4

На фиг. 4.4 е показана честотната характеристика на озвучително тяло тип 1ОТ6-1 заедно с честотните характеристики на втория и третия хармоник. Измерванията са проведени със синусоиден сигнал.

Еднолентово озвучително тяло тип ИОТ20-1. За комплектуване към по-мощни радиотехнически устройства за обща употреба може да се конструират озвучителни тела с един високоговорител, но с по-голяма мощност. Подходящ за такива озвучителни тела е широколентовият високоговорител с номинален диаметър $\varnothing 200$ mm тип ВК201Б4. Гъвкавостта на високоговорителя е малка, а звукоизлъчващата му повърхност е сравнително голяма. За създаване на озвучително тяло, което ефективно да преобразува сигналите с ниска честота, ще бъде необходим сравнително голям обем. Приема се озвучителното тяло да бъде с резонансна честота $f_0=85$ Hz. От това условие се определя необходимата еквивалентна гъвкавост $c_{ем}=0,232 \cdot 10^{-3} \text{ mN}^{-1}$. Гъвкавостта на обема е $c_{v.м}=0,52 \cdot 10^{-3} \text{ mN}^{-1}$.

Обемът на озвучителното тяло се получава $V=42 \text{ dm}^3$.



Фиг. 4.5

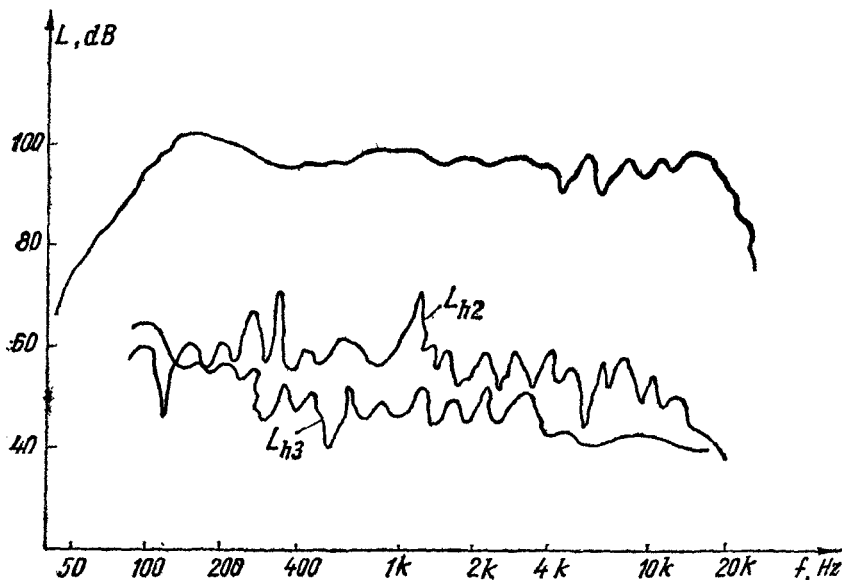
Този обем е голям и кутията трябва да бъде голяма със значително висока цена. Като се използва звукопоглъщащ материал, може да се намали обемът поради намаляване на ψ . Ако процесът в озвучителното тяло стане изотермичен, тогава $\psi=1$ и обемът

може да се намали до 30 dm^3 . На практика не се запълва целият обем със звукопоглъщащ материал и затова може да се приеме $\phi = 1,1 \div 1,2$, при което за обема се получава $V = 33 \div 36 \text{ dm}^3$.

Поради малките загуби в трептящата система на високоговорителя и високия му качествен фактор озвучителното тяло ще има честотна характеристика с подем в областта на резонансната му честота. Долната му гранична честота ще бъде около 70 Hz .

Паспортната мощност на това озвучително тяло ще бъде 20 W , като то може да се комплектува към усилвателни устройства с номинална изходна мощност до 30 W без опасност от повреди поради претоварване. Номиналният му честотен обхват е от 70 до $12\,500 \text{ Hz}$ при неравномерност на честотната характеристика 14 dB , а характеристикната му чувствителност е не по-малка от $0,7 \text{ Pa W}^{-0.5}$.

Поради по-големите размери на кутията и по-голямата мощност на озвучителното тяло, при която налягането в обема ще бъде по-голямо, се налага кутията да се изработи от плочи от



Фиг. 4.6

дървесни частици (талашит) с дебелина 18 mm . Високоговорителят се закрепва несиметрично по направлението на височината, за да се получи по-гладка честотна характеристика на озвучителното тяло. На фиг. 4.5 е показана конструкцията на кутията.

В обема на кутията трябва да се постави 150—200 g звукопоглъщащ материал или (ако не се определя масата му) — да се напълни добре обемът, но без да се натъпква.

Честотната характеристика на озвучителното тяло с характеристиките на втория L_{h2} и третия L_{h3} хармоник е дадена на фиг.4.6. Тези характеристики са снети при подаване на високоговорителя на мощност 4 W, при което нивото на средното звуково налягане е 97 dB. За високоговорителите с по-голяма паспортна мощност е за предпочитане коефициентът на хармоничните им изкривявания да се определя при условия, близки до условията, при които се провежда измерването за озвучителни тела от Hi-Fi клас.

Озвучително тяло със същите параметри, но с номинален импеданс 8 Ω може да се реализира, като се използва високоговорител тип ВК201Б8.

Казаното за кутията, закрепването на високоговорителя, оцветяването и др. при ЮТ6-1 трябва да се има предвид и при изпълнение на това озвучително тяло.

По илюстрирания начин може да се конструират еднолентови озвучителни тела и с редица други български или чуждестранни високоговорители, като се познават или измерят основните параметри на използвания високоговорител.

Обикновено широколентовите високоговорители имат електрически и пълен качествен фактор с големи стойности, поради което са неподходящи за създаване на озвучителни тела с фазоинвертор или с пасивна мембрана.

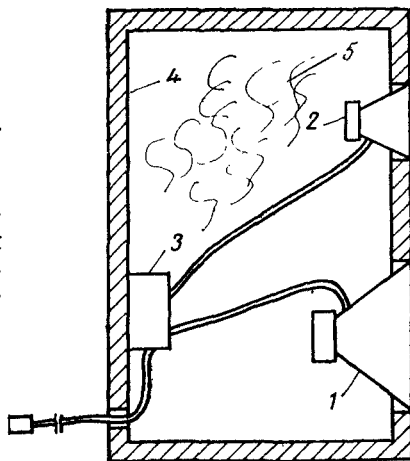
4.2. ДВУЛЕНТОВИ ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА — ОБЩИ СВЕДЕНИЯ

Посочено бе, че изискванията за ефективно възпроизвеждане на сигналите с ниска честота са противоречиви на изискванията за ефективно преобразуване на сигналите с висока честота. Освен широколентовите високоговорители, при които е намерено компромисно решение на противоречивите изисквания, се произвеждат и високоговорители, които да преобразуват ефективно само сигналите от определен честотен подобхват на звуковия спектър — това са нискочестотните, средночестотните и високочестотните високоговорители.

Интермодулационните изкривявания и изкривяванията, дължащи се на доплеровия ефект¹, могат да се избягнат само като сиг-

¹ Доплеров ефект — изменение честотата на излъчвания сигнал при движение на излъчвателя със скорост v . Изменението зависи от отношението на скоростта v към скоростта на разпространение на звука c .

налите с ниска и висока честота се излъчват от различни високоговорители. При това трябва да се има предвид следното: интермодулационните изкривявания са продукт на нелинейност на системата и ако преобразувателят се направи една абсолютно линейна система, интермодулационните изкривявания се свеждат до нула. Не така стои обаче въпросът с изкривяванията, дължащи се на доплеровия ефект — те са продукт на движението на излъчващата система и не зависят от това, дали системата е линейна или не. При една абсолютно линейна система изкривявания от доплеров ефект пак ще има, защото даден високочестотен сигнал се излъчва от същата мембрана, която трепти, движи се и под действието на нискочестотен сигнал. Така се стига до заключението, че висококачествените озвучителни тела трябва да се изграждат от два или повече високоговорители, излъчващи сигналите само от определен подобхват на звуковия спектър.



Фиг. 4.7

На фиг. 4.7 е показана принципната конструкция на двуленово озвучително тяло.

Възпроизвеждането на сигналите с ниска честота се определя главно от използвания нискочестотен високоговорител и от вида на акустичното му оформяне. Ако то е затворен обем — от големината на този обем, респ. от големината на гъвкавостта на обема. Ако е затворен обем с фазоинвертор или с пасивна мембрана — от съотношението на параметрите, което определя един или друг вид честотна характеристика. Обемът на озвучителното тяло се запълва със звукопоглъщащ материал.

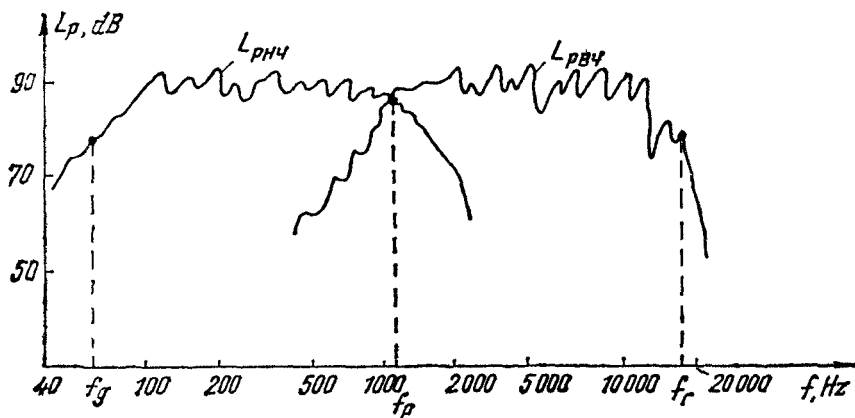
Възпроизвеждането на сигналите с висока честота се определя почти единствено от високочестотния високоговорител, като известно влияние може да окаже намиращият се пред него декоративен елемент. За избягване влиянието на нискочестотния високоговорител върху високочестотния звуковото налягане в обема не трябва да действа върху трептящата система на високочестот-

ния високоговорител. Това се постига, като последният се изолира от обема на озвучителното тяло — ако е високоговорител с конусна мембрана, трябва да се затвори в собствен обем от $1-2 \text{ dm}^3$, ако е куполен или лентов високоговорител, трябва да се вземат мерки за добро уплътняване между елементите на конструкцията му. Ако звуковото налягане в обема действа върху трептящата система на високочестотния високоговорител, тя ще трепти в такт с изменението на звуковото налягане в обема, т. е. в такт с трептенията на нискочестотния високоговорител, и към тези трептения ще се наслагват високочестотните трептения, породени от действието на излъчвания сигнал. При тези условия изкривяванията от доплеров ефект си остават. Ефектът от разделянето на звуковия спектър и възпроизвеждането му от отделни високоговорители ще бъде незначителен. Освен това, ако звуковото налягане в обема действа върху лентичката на лентовия високоговорител, ще предизвика деформации в нея, от което ще се появят допълнителни изкривявания.

Основен въпрос при двулентовите озвучителни тела е въпросът за съгласуване излъчването на двата високоговорителя, така че честотната характеристика да се получи с много малка неравномерност. Друг важен въпрос е импедансът на озвучителното тяло да не става по-малък от 80% от обявената номинална стойност.

Едно сполучливо решение би се получило, ако характеристикните чувствителности на двата високоговорителя са равни, а ефективните им честотни обхвати са ограничени, така че да се застъпват, без да се припокриват. За честотата f_p , за която двете честотни характеристики се пресичат, всеки високоговорител трябва да създава звуково налягане, чието ниво е с 3 dB по-ниско от нивото на средното му звуково налягане, както е показано на фиг. 4.8. Честотата f_p се нарича разделителна честота. При тези условия двата високоговорителя може да се свържат паралелно (или последователно), като честотната характеристика на озвучителното тяло ще бъде идеална. Но в този случай на двата високоговорителя се подава целият честотен спектър от електрически сигнали, т. е. на входа на високочестотния високоговорител постъпват и сигналите с ниска честота, а на входа на нискочестотния — и сигналите с висока честота. Независимо че не излъчват във всички честотни си честотен обхват, двата високоговорителя консумират електрическа енергия. Това означава, че високочестотният високоговорител трябва да може да издържа (топлинно и механично) въздействието на сигналите с ниска честота, без да се разрушава. Друг недостатък на това решение е, че половината от отда-

ваната мощност се изразходва, като се превръща в топлина в звуковата бобина на високоговорителя, който не излъчва в дадения подобхват. Импедансът на високоговорителите трябва да бъде два пъти по-голям при паралелно свързване или два пъти



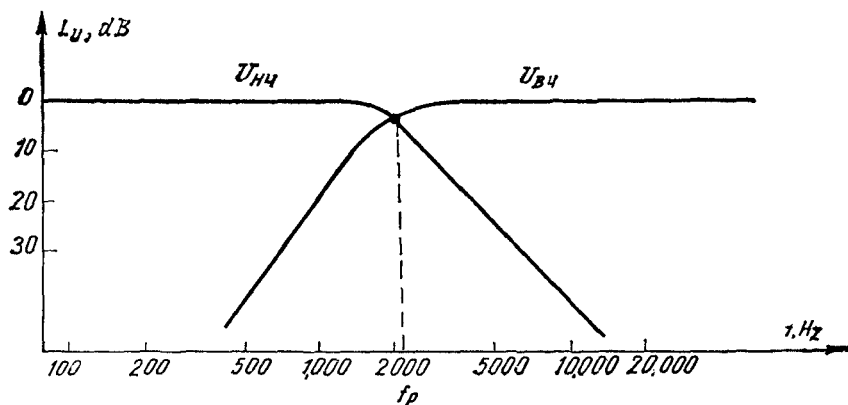
Фиг. 4.8

по-малък при последователно свързване от номиналния импеданс на озвучителното тяло. На практика е трудно да се реализират високоговорители, чиито честотни характеристики да бъдат близки до дадените на фиг. 4.8. Освен това високочестотните високоговорители в никакъв случай не могат да издържат въздействието на сигналите с ниска честота. Като се вземе предвид и намалявата ефективност на преобразуването, се стига до заключение, че това решение не е целесъобразно. Затова се налага спектрално разделяне на електрическия сигнал, който се подава към високоговорителите. За целта се използват електрически разделителни филтри. С помощта на електрическите филтри електрическа енергия се подава само на този високоговорител, който излъчва в дадения подобхват.

При конструиране на филтрите също се приема, че двата високоговорителя имат равни характеристични чувствителности и в обхватите, в които функционират, трябва да им се подават равни по големина напрежения. За разделителната честота нивото на напрежението на всеки от високоговорителите трябва да бъде с 3 dB по-ниско от нивото в обхвата, в който функционират. Честот-

ната характеристика на напрежението, подавано на входа на всеки от високоговорителите, трябва да има вида, даден на фиг. 4.9.

В честотния обхват на пропускане на филтъра неговият входен електрически импеданс е равен на електрическия импеданс на



Фиг. 4 9

високоговорител^а, включен като товар на филтъра. Вън от обхвата на пропускане входният импеданс на филтъра нараства постепенно и достига много големи стойности. Но обхватът на непропускане за единия филтър е честотен обхват на пропускане за другия филтър. За получаване на импедансно съгласуване с усилвателя двата високоговорителя обикновено са с равни по стойност входни импеданси; номиналният импеданс на озвучителното тяло ще има същата стойност. Тук е необходимо да се направи пояснение — *номиналният импеданс на единия от високоговорителите може да бъде и по-голям от номиналния импеданс на другия, обаче за номинален импеданс на озвучителното тяло се приема по-малката стойност.* Това е така, защото за номинална се приема най-малката стойност на импеданса в целия звуков обхват. В отделни подобхвати импедансът може да има значително по-големи стойности, стига това да не се отрази неблагоприятно върху честотната характеристика на озвучителното тяло. Например, ако нискофrequentният високоговорител е с номинален импеданс 8Ω , а високочестотният — 4Ω , номиналният импеданс на озвучителното тяло ще бъде 4Ω .

4.3. ДВУЛЕНТОВИ ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА С РАЗДЕЛИТЕЛЕН ФИЛТЪР ОТ ПЪРВИ РЕД

Най-лесният начин за създаване на двулентово озвучително тяло е да се използва високочестотен разделителен филтър от първи ред само по отношение на зхранването на високочестотния високоговорител с електрическа енергия, а на нискочестотния високоговорител се подава целият спектър от електрически сигнали на изхода на усилвателя. Електрическата схема на свързване на озвучителното тяло е дадена на фиг. 4.10 а, а честотната характеристика на подаваното на високоговорителите електрическо напрежение — на фиг. 4.10 б.

Двулентово озвучително тяло с високочестотен разделителен филтър от първи ред може да намери практическа реализация само при спазване на следните три основни изисквания:

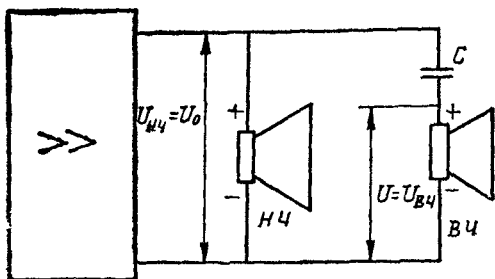
разделителната честота на високочестотния филтър да съвпада с честотата, след която излъчването на нискочестотния високоговорител започва да намалява;

входният импеданс на нискочестотния високоговорител за разделителната честота на високочестотния филтър да бъде с приблизително два пъти по-голяма стойност от номиналната стойност на импеданс на същия високоговорител;

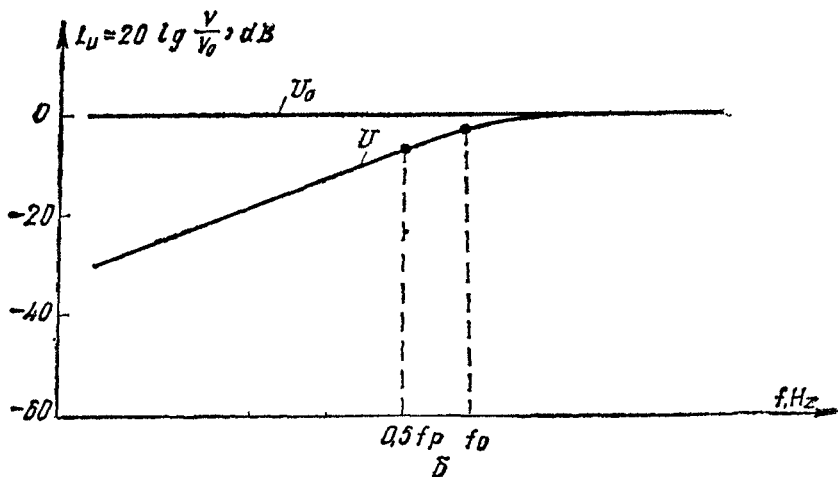
номиналният импеданс на високочестотния високоговорител да бъде два пъти по-голям от номиналния импеданс на нискочестотния или поне стойността на входния импеданс на високочестотния високоговорител за разделителната честота да бъде два пъти по-голяма от стойността на номиналния импеданс на нискочестотния високоговорител.

Второто и третото изискване се налагат от факта, че в честотния обхват над f_p двата високоговорителя са свързани паралелно и ако те не са изпълнени, съществува опасност входният импеданс на озвучителното тяло да се получи значително по-малък от обявената номинална стойност, вследствие на което може да се претовари и повреди усилвателят. В повечето случаи се приема решението, при което номиналният импеданс на високочестотния високоговорител е два пъти по-голям от този на нискочестотния. Например за озвучително тяло с номинален импеданс 4Ω се приема нискочестотният високоговорител да бъде с номинален импеданс 4Ω , а високочестотният — 8Ω . Необходимо е да се има предвид обаче, че при това решение ефективността на високочестотния високоговорител се намалява — при поддържане на входа на озвучителното тяло на постоянно по-големина напрежение в целия честотен обхват високочестотният високоговорител ще

консумира два пъти по-малка мощност от нискочестотния. В същото време нискочестотният високоговорител консумира електрическа мощност и над f_p , без да я преобразува в акустична. За получаване на равномерна честотна характеристика нивото на харак-



7



Фиг. 4.10

теристичната чувствителност на високочестотния високоговорител трябва да бъде с 2—3 dB по-високо от това на нискочестотния.

По същество тези изисквания налагат да се избере сравнително висока разделителна честота от 6 до 8 kHz, а в някои случаи и до 12 kHz.

Двата високоговорителя трябва да бъдат синфазно свързани — означеният с „+“ край на двата високоговорителя да се свърже към една и съща точка на филтъра. Както бе установено във втора глава, фазовата разлика на напрежението върху товара на високочестотния филтър от първи ред спрямо входното напрежение клоци към нула в честотния обхват на пропускане на филтъра. За самата разделителна честота тя е 45° . Ако двата високоговорителя не са свързани синфазно, създаваните от тях звукови полета ще бъдат противофазни и ще се унищожат — това се отнася за областта на разделителната честота и над нея, докдето излъчва и нискочестотният високоговорител.

Двулентово озвучително тяло тип ОТМ2-01. То се използва за комплектуване към стереофоничния радиоприемник тип



Фиг. 4 11

РС301. Кутията му се изработва от пластмаса и има съвременен дизайн. Освен това е реализиран басрефлексен отвор с тръба, която подобрява излъчването на сигналите с ниска честота. Честотната характеристика с хармониците на ОТМ2-01 е дадена на фиг. 4.11. Номиналният импеданс на ОТМ2-01 е 8Ω , като се из-

ползват високоговорител тип ВЕ1523-1А8 с номинален импеданс 8Ω и високоговорител тип ВВ1015 с импеданс 15Ω . Разделителният кондензатор е с капацитет $4 \mu\text{F}$.

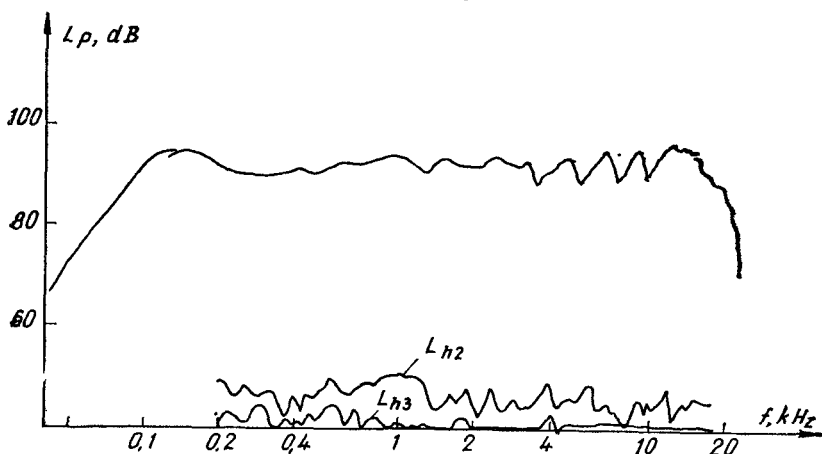
Двулентово озвучително тяло тип ОТМ1-02. Произвежда се в същото акустично оформяне, в което се произвежда и ОТМ2-01. Използват се обаче други високоговорители. Нискочестотният високоговорител тип ВКН0922 е с номинален диаметър 160 mm . Паспортната мощност на озвучителното тяло е 10 W . То се комплектува към стереофоничния радиоприемник тип РС201, чиято изходна мощност е 10 W на канал. Високоговорителят тип ВКН0922 е с номинален импеданс 4Ω . За високочестотен се използва високоговорителят тип ВВ1015. Кондензаторът на високочестотния филтър е с капацитет $2 \mu\text{F}$, при което разделителната честота се получава около 5 kHz — входният импеданс на ВВ1015 при 5 kHz е 16Ω .

Изборът на разделителната честота е направен, като са взети предвид следните съображения: нискочестотният високоговорител е с паспортна мощност 20 W и би могъл самостоятелно да понесе цялото електрическо натоварване от 10 W . Той излъчва ефективно сигнали до $8 - 10 \text{ kHz}$. Високочестотният високоговорител не трябва да се натоварва електрически, а колкото е по-висока разделителната честота, толкова по-малка мощност ще се отдава върху него. При тази висока разделителна честота и при условие, че номиналният импеданс на високочестотния високоговорител е 4 пъти по-голям от този на нискочестотния, върху високочестотния високоговорител се отдава много малка електрическа мощност. Това е една предпоставка озвучителното тяло да се използва за комплектуване към усилватели с номинална изходна мощност до 20 W . Разликата от 4 пъти между номиналните импеданси на високоговорителите е продиктувана от съображения за получаване на равномерна честотна характеристика — характеристичната чувствителност на нискочестотния високоговорител е сравнително малка — около $0,5 \text{ Pa W}^{-0,5}$.

Номиналният честотен обхват на ОТМ1-02 е от 80 до $16\,000 \text{ Hz}$ при неравномерност на честотната характеристика 12 dB , но фактически то преобразува ефективно сигнали в обхвата от 63 до $18\,000 \text{ Hz}$. Характеристичната му чувствителност е по-голяма от $0,4 \text{ Pa W}^{-0,5}$ (достига до $0,5 - 0,6 \text{ Pa W}^{-0,5}$). Коефициентът на хармонични изкривявания е по-малък от 3% в целия честотен обхват. Честотната характеристика на ОТМ1-02 с хармониците е показана на фиг. 4.12.

Двулентово озвучително тяло тип ОТМ1-03. То е също изделие от промишленото производство. Характеризира се с много

малкия си обем от 4,8 дм³, но въпреки това паспортната му мощност е 20 W. Нискофrequentният високоговорител тип ВКН08 23 е с номинален диаметър 125 мм, а високофrequentният е тип ВВ108. Номиналният импеданс на озвучителното тяло е 4 Ω. Но-



Фиг. 4.12

миналният му честотен обхват е от 80 Hz до 16 000 Hz при неравномерност на честотната характеристика 12 dB. Чувствителността му е 0,4 Pa W^{-0,5}, а коефициентът на хармонични изкривявания — по-малък от 3% в целия честотен обхват. Електрическата схема на свързване на високоговорителите е идентична с тази на фиг. 4.10 а. Кондензаторът във филтъра е с капацитет $C=2 \mu\text{F}$. Разделителната честота е 8 kHz — входният импеданс на ВВ108 е 10 Ω при тази честота.

Изчисляването на параметрите на ОТМ-03 се провежда в следната последователност:

определя се коефициентът $\alpha=1,3$;

определя се резонансната честота $f_0=91 \text{ Hz}$;

определя се електрическият качествен фактор $Q_e=0,76$;

определя се пълният качествен фактор при $R_i=0-Q_T=0,59$.

Качественият фактор на озвучителното тяло се получи много малък и честотната му характеристика няма да бъде максимално плоска, а ще започне да понижава нивото си при честоти, значително по-високи от резонансната. За повишаване на качествения фактор е необходимо озвучителното тяло да се захранва от усилвател, чието изходно съпротивление е по-голямо от нула. Точ-

ната му стойност се определя от изискването пълният качествен фактор на озвучителното тяло да бъде 0,707, като се използва зависимостта

$$R_i = R \left(\frac{Q'_e}{Q_e} - 1 \right) = 1,2 \, \Omega, \quad (4.1)$$

където $R = 3,6 \, \Omega$ е активното съпротивление на звуковата бобина, $Q'_e = 0,98$ е необходимата стойност за Q_e , за да се получи $Q'_T = 0,707$, която се определя от (3.17).

Следователно за предпочитане е озвучителното тяло тип ОТМ1-03 да се захранва от усилвател с изходно съпротивление 1,2 Ω .

Ако усилвателят е с изходно съпротивление, равно на нула, от (3.29 а) се получава $f_3 = 112 \, \text{Hz}$.

Честотата, за която нивото на звуковото налягане се понижава с 6 dB, се определя от (3.29 б) — $f_6 = 78 \, \text{Hz}$.

Разликата между f_3 и f_6 е много голяма, поради полегатия вид на характеристиката звуковото налягане се понижава с малка стръмност.

Ако се вземат необходимите мерки за увеличаване на Q_T до 0,707, се получава $f'_3 = 91 \, \text{Hz}$, $f'_6 = 70 \, \text{Hz}$.

Честотата f'_3 е по-ниска от f_3 с 21 Hz, но f'_6 е по-ниска от f_6 само с 8 Hz. Следователно с увеличаване на качествения фактор се намалява честотата, за която нивото на характеристиката се понижава с 3 dB, но честотата, за която нивото на характеристиката се понижава с 6 dB, се намалява в по-малка степен.

За увеличаване на качествения фактор на озвучителното тяло бе препоръчано да се използва усилвател с $R_i = 1,2 \, \Omega$. Трябва да се има предвид обаче, че върху това съпротивление се губи значителна част от изходната мощност на усилвателя. С други думи, повишаването на качествения фактор с цел повишаване нивото на характеристиката на озвучителното тяло при f_3 е за сметка на загуба на електрическа нискочестотна енергия. Ако усилвателят е с ограничени възможности, това означава, че максималното ниво на звуковото налягане ще се понижи спрямо случая $R_i = 0$.

Увеличаването на качествения фактор може да се постигне и по друг начин — като се използва магнитна система с по-малък магнит, така че да се намали Bl . В този случай ще се намали к. п. д. на високоговорителя, ще се понижи нивото на характеристичната му чувствителност с 1—2 dB, но все пак от икономична гледна точка е за предпочитане — влагат се по-евтини материали във високоговорителя и не се превръща част от изход-

ната енергия на усилвателя в топлина върху едно допълнително съпротивление.

От направения анализ се налага изводът, че установените съотношения и изисквания не бива да се абсолютизират, не бива да се приемат сяпо. След като се направят изчисленията, да се направи и обстоен анализ на получените резултати, като особено задълбочено се анализира влиянието на онези параметри, които са получени с известно отклонение от предписаните стойности. Да се прецени с цената на какво може да се внесе корекция, която да доведе стойностите на всички параметри до предписаните. Ако полученият резултат оправдава цената на корекцията, тогава може да се пристъпи към нейната реализация.

Може ли озвучителното тяло тип ОТМ1-03 да се реализира с фазоинвертор?

Отговор на този въпрос ще дадат изчисленията.

Определя се пълният качествен фактор $Q_T = 0,42$, като се приема, че $R_i = 0$.

Тъй като обемът на озвучителното тяло е избран, а с това и коефициентът α е фиксиран, от графиките на фиг. 3.15 се определя

$$x_3 = 1,2; h = 1,1; Q_T = 0,38; f_3 = 72 \text{ Hz}; f_\phi = 66 \text{ Hz}.$$

Получените данни показват, че може да се реализира фазоинвертор. При това честотата, за която нивото на характеристиката се понижава с 3 dB, се получава достатъчно ниска — 72 Hz.

Фазоинверторът трябва да се настрои на честота 66 Hz — резонансната честота на масата в тръбата на фазоинвертора с гъвкавостта на обема.

Необходимо е обаче пълният качествен фактор да се намали на 0,38.

При тези параметри на озвучителното тяло честотната му характеристика в областта на ниските честоти ще съответствува на максимално плоска характеристика на високочестотен филтър квази-Батърворт от трети ред. Ако качественият фактор не може да се понижи до стойност 0,38, а останалите параметри запазят стойностите си, честотната характеристика на озвучителното тяло ще има подем в областта на f_3 , по характер тя ще бъде нещо междинно между максимално плоска характеристика на филтър квази-Батърворт от трети ред и максимално плоска характеристика на филтър на Батърворт от четвърти ред.

Необходимо е да се изчислят параметрите на фазоинвертора — сечение и дължина на тръбата.

Съгласно с [1] отношението между дължината и площта на сечението на тръбата се определя от зависимостта

$$\frac{l_{\phi}}{S_{\phi}} = \frac{3097}{f_{\phi}^2 V} = 148. \quad (4.2)$$

Приема се тръба с диаметър $D_{\phi} = 30$ mm и се определя площта на сечението ѝ $S_{\phi} = 7,1 \cdot 10^{-4}$ m². За дължината на тръбата се получава $l_{\phi} = 105,2$ mm.

Получиха се реализуеми за озвучителното тяло размери на тръбата на фазоинвертора — вътрешната дълбочина на кутията е 190 mm.

На фиг. 4.13 е даден външният вид на озвучителното тяло, а на фиг. 4.14 — честотната му характеристика с хармониците.

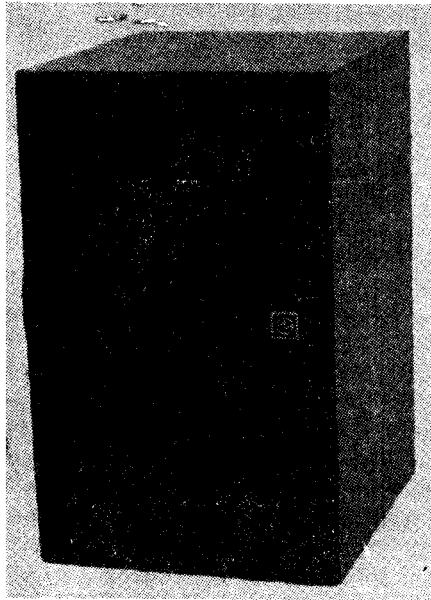
При зададената стойност на пълния качествен фактор на озвучителното тяло или малко по-голяма от нея може да се реализира честотната характеристика, съответстваща на равновълнова характеристика на филтър на Чебишев от четвърти ред. Приема се $Q_T = 0,45$. От графиките на фиг. 3.15 се определят обобщените параметри: $\alpha = 0,66$; $x_3 = 0,88$; $h = 0,92$.

За параметрите на озвучителното тяло се определя: $V = 9,4$ dm³; $f_3 = 53$ Hz; $f_{\phi} = 55$ Hz.

Честотата, за която звуковото налягане се почиства с 3 dB, е 53 Hz. Това е много съществено подобрение, тъй като долната гранична честота на озвучителното тяло се получи по-ниска от 50 Hz, а това означава, че то може да се причисли към изделията от Hi-Fi клас. Цената, с която се заплаща това подобрение, не е ниска — почти двойно увеличаване на обема.

За получаване на новата резонансна честота на фазоинвертора се определя $\frac{l_{\phi}}{S_{\phi}} = 102$.

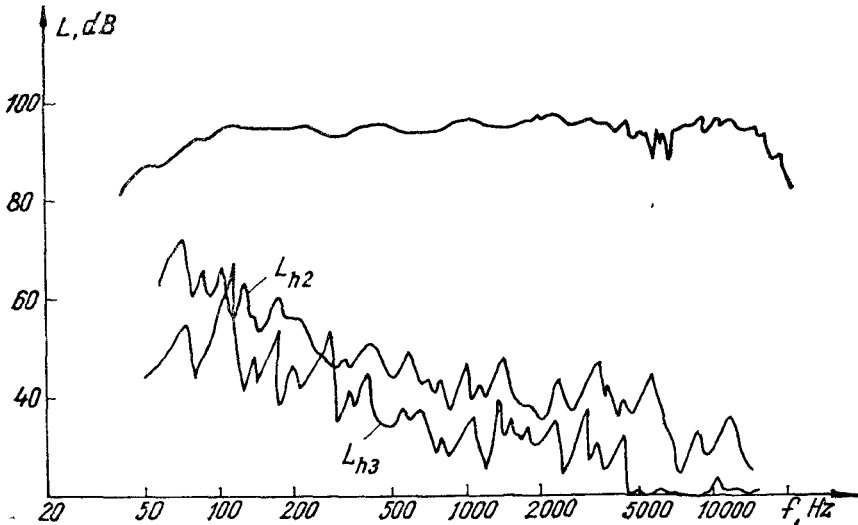
Ако се запази сечението на тръбата, за дължината ѝ ще се



Фиг. 4.13

получи много малка стойност. Затова се приема тръба с диаметър $D_{\phi} = 40$ mm, чието сечение има площ $S_{\phi} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

За дължина на тръбата се получава $l_{\phi} = 128$ mm. Вътрешната дълбочина на кутията трябва да бъде поне 200 mm, за да може да се реализира фазоинверторът.

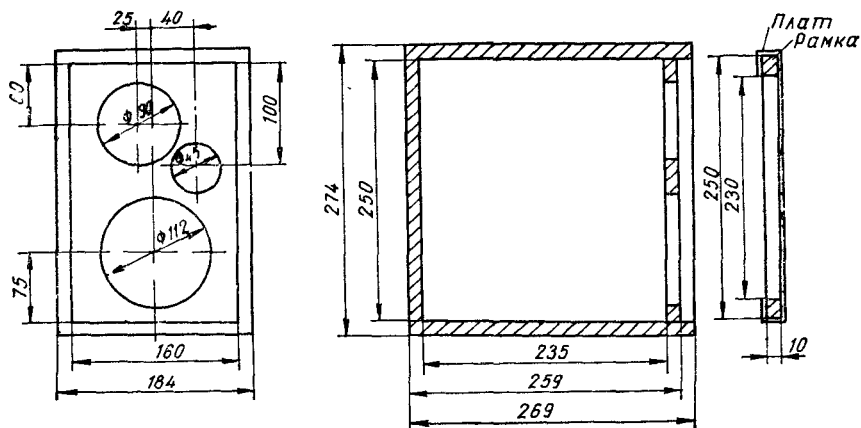


Фиг. 4.14

На фиг. 4.15 е показана конструкцията на кутията на озвучителното тяло. Поради неголемите размери е предвидено кутията да се изработи от плочи от дървесни частици с дебелина 12 mm.

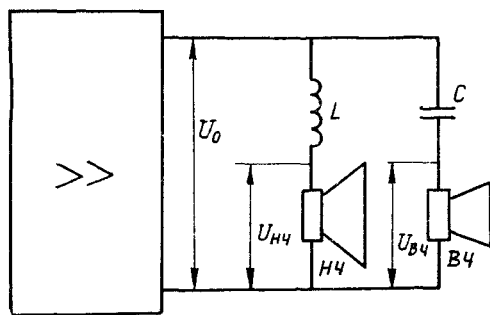
Реализирането на двулентови озвучителни тела с филтър само към високочестотния високоговорител среща редица затруднения. Не винаги може да се намери високочестотен високоговорител, чиято чувствителност е с ниво 2—3 dB по-високо от това на нискочестотния. При равни чувствителности трябва да се комплектуват високоговорители с еднакви номинални импеданси, но съществува опасност от получаване на малък еквивалентен импеданс. Освен това нискочестотният високоговорител може да има широк ефективен честотен обхват и да излъчва до 12—15 kHz, от което може да се получат нежелани интерференции. В такива случаи се налага спектрално ограничаване на напрежението, което се подава на нискочестотния високоговорител. Сравнително лесно

се решава този въпрос, като се използва нискочестотен филтър от първи ред. Електрическата схема на свързване на двулентово озвучително тяло с разделителен филтър, съставен от нискочестотно звено от първи ред и високочестотно звено от първи ред, е



Фиг. 4.15

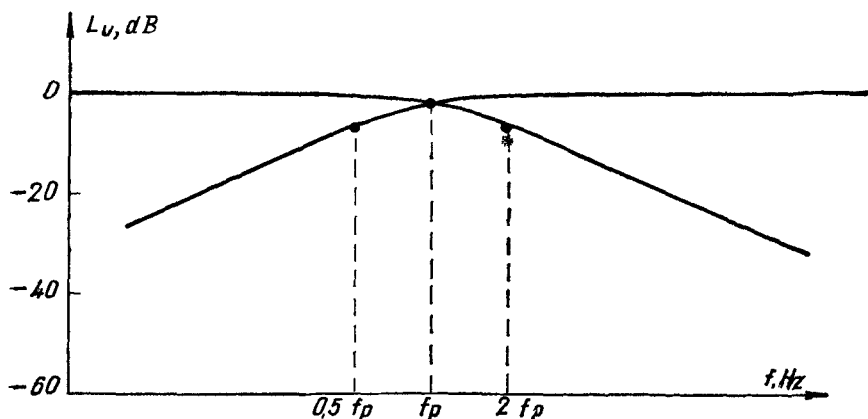
показана на фиг. 4.16. На фиг. 4.17 са показани честотните характеристики на нивото на подаването на всеки от високоговорителите напрежение.



Фиг. 4.16

При използване само на високочестотен разделителен филтър понятието разделителна честота има относителен смисъл — показва само честотата, от която се включва да функционира и ви-

сокочестотният високоговорител. Поради това нейният избор е по-свободен — основното изискване е импедансното съгласуване. При използване на нискочестотен и високочестотен филтър понятието разделителна честота става по-определено — не само



Фиг. 4.17

показва, че от тази честота се включва да функционира високочестотният високоговорител, но от тази честота започва изключването на нискочестотния високоговорител. При тези условия нейният избор е подчинен на редица изисквания. Трябва да се има предвид, че от правилния избор на разделителната честота зависи до голяма степен качеството на възпроизвежданата от озвучителното тяло музикална програма.

При избора на разделителна честота трябва да се вземат предвид параметрите на конкретните високоговорители, с които ще се реализира озвучителното тяло. На първо място, трябва да се вземе пред вид номиналният честотен обхват на всеки от тях. Ако нискочестотният високоговорител излъчва ефективно до 3000 Hz, разделителната честота трябва да бъде по-малка от тази стойност. Ако високочестотният високоговорител има номинален честотен обхват от 2500 Hz, разделителната честота трябва да бъде по-висока от тази граница. Тук е необходимо да се обърне внимание на това, че високочестотният високоговорител може да излъчва ефективно и по-ниски, но не може да понесе топлинно или механично въздействие на сигналите с по-ниска честота и затова производителят му е определил тази граница. По принцип нискочестотните и средночестотните високоговорители не трябва да се

използват при по-ниски честоти от обявената от производителя им долна граница на номиналния честотен обхват. След това трябва да се вземат предвид диаграмите на насоченост на високоговорителите. Ако не се разполага с тях, се прави преценка в зависимост от размерите или по-точно размера на нискочестотния високоговорител. Например високоговорител с диаметър 315 mm започва да излъчва твърде насочено от 2500 — 3000 Hz, докато високоговорител с диаметър 125 mm излъчва 5 — 6 kHz с приемлива насоченост. Обикновено при двулентови озвучителни тела се приема разделителната честота да бъде между 2000 и 4000 Hz. Този избор не е много подходящ. Установено е, че точно в този обхват човешкото ухо е много чувствително и лесно възприема наличието на смущаващи интерференции или други явления в областта на разделителната честота. Според съвременните схващания разделителната честота трябва да бъде по-ниска от 800 — 1000 Hz или по-висока от 4000 — 5000 Hz. Ако се приеме ниска разделителна честота 1000 Hz, високочестотният високоговорител трябва да има много широк номинален честотен обхват — от 1000 до 20 000 Hz. Ако се приеме висока разделителна честота, има опасност нискочестотният високоговорител да започне да излъчва насочено. От значение е за избора на разделителната честота и възможността за топлинно и механично натоварване на високочестотния високоговорител. Ако нискочестотният високоговорител е с голяма паспортна мощност, а високочестотният — с по-малка, за съвместното им използване се налага високочестотният високоговорител да се използва в по-тесен обхват от номиналния му. Става ясно, че изборът на разделителна честота не е лек проблем. Той се решава най-сполучливо, като за всеки конкретен случай се изработят идентични модели, но с различни филтри (различаващи се по f_p) и се проведе субективно прослушване. Избира се този филтър, с който озвучителното тяло звучи най-добре.

За разделителна честота на филтъра се приема честотата, за която нивото на изходното напрежение се понижава с 3 dB спрямо нивото в областта на пропускане. За разделителна честота f_p на озвучителното тяло се приема честотата, при която нивата на двете изходни напрежения (нискочестотно и високочестотно) се изравняват. Обикновено двете честоти съвпадат, при което честотната характеристика на озвучителното тяло е най-равномерна. В действителност, ако в областта на разделителната честота честотните характеристики на двата високоговорителя са прави линии с еднакво ниво и за самата разделителна честота им се подаде с 3 dB по-ниско напрежение, резултатната характеристика ще бъде

права линия. На практика обаче тези идеални условия рядко се осъществяват. Затова изискването за понижаване нивото на напрежението с 3 dB при разделителната честота трябва да се приеме твърде условно. С $f_{рн}$ се означава разделителната честота на нискочестотното звено, а с $f_{рв}$ — на високочестотното. Ако нивото на честотната характеристика дори и на единия от високоговорителите е по-високо в областта на разделителната честота, препоръчва се да се допусне по-голямо от 3 dB понижаване на нивото на напрежението за разделителната честота. Това е възможно, ако $f_{рв} > f_p$ и $f_{рн} < f_p$. Ако в областта на разделителната честота има падина в честотната характеристика дори на един от високоговорителите, препоръчва се по-малко от 3 dB понижаване на нивото на напрежението при разделителната честота. Това е възможно, ако $f_{рв} < f_p$ и $f_{рн} > f_p$.

Двулентово озвучително тяло тип 2ОТ10-1. Реализира се от високоговорителите: нискочестотен тип ВК138-А4 и високочестотен тип ВВ108. Високоговорителят ВК138 А4 излъчва ефективно до 15 kHz и затова се налага ограничаване с филтър. Номиналният импеданс на високоговорителя е 4 Ω , поради което високочестотният високоговорител е избран с импеданс 8 Ω .

Избор на акустично натоварване. Избира се озвучително тяло с със затворен обем $V=10 \text{ dm}^3$.

Избор на разделителна честота. Поради неголемите размери на нискочестотния високоговорител се избира $f_p = 3500 \text{ Hz}$. Не съществува опасност от претоварване на високочестотния високоговорител, защото той е с два пъти по-голям импеданс.

Определяне елементите на филтъра. За разделителната честота е измерен импедансът на високоговорителите: на ВВ108 е 8 Ω , а на ВК138А4 — 5,2 Ω . Капацитетът на кондензатора е $C'=5,6 \mu\text{F}$.

Приема се стандартна стойност $C=4,7 \mu\text{F}$.

Преизчислява се разделителната честота $f_p = 4150 \text{ Hz}$.

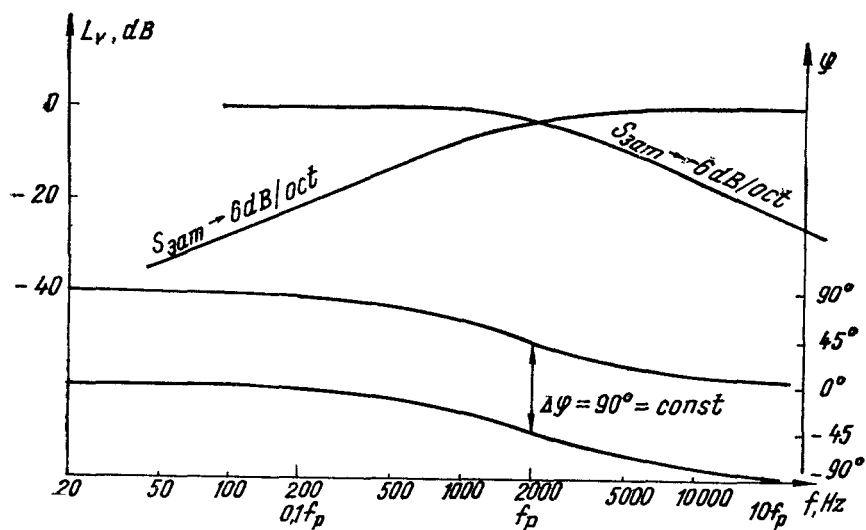
За тази честота импедансът на ВК138А4 е 5,4 Ω .

Определя се индуктивността $L=0,21 \text{ mH}$.

За малки загуби в активното съпротивление на бобината тя трябва да се изработи от меден проводник с диаметър 1 mm. От табл. 2.1 чрез интерполиране се определя броят на навивките $n=62$.

При анализа на разделителни филтри от първи ред се установи, че фазовата разлика между изходните и входните напрежения е различна по знак за нискочестотния и високочестотния филтри. При използване на двата филтъра като звена на един филтър от значение е каква ще бъде фазовата разлика между из-

ходните напрежения едно спрямо друго, тъй като входното напрежение е еднакво и за двете звена. Ако се вземе разликата между фазовите разлики, определени с (2.21) и (2.10), ще се установи, че фазовата разлика между двете изходни напрежения е



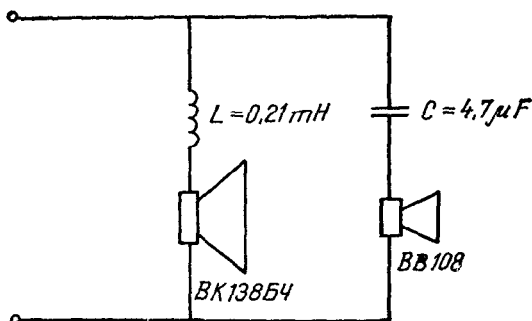
Фиг. 4.18

постоянна и равна на 90° . Това се вижда и от фиг. 4.18. Високоговорителите се свързват по принцип синфазно, но в еднаква степен е допустимо и противофазното свързване, тъй като и в двата случая напреженията върху високоговорителите са дефазирани на 90° помежду си. Тези съждения са верни при условие, че двата филтъра са нагаварени с активен товар, но както се посочи в първа глава, входният импеданс на високоговорителя е силно честотно зависим и има комплексен характер, от което се внасят допълнителни фазови разлики. Синфазното или противофазното свързване на високоговорителите се определя именно от тези допълнителни дефазирания и се установява предимно опитно. В случая е по-добре високоговорителите да се свържат синфазно.

При определяне елементите на филтъра също бе прието, че входният импеданс на високоговорителите е чисто активен. От това се допуска известна грешка, но за филтрите от първи ред тя не е голяма. Грешката ще бъде по-малка, ако при изчисленията се използва стойността на модула на импеданса за f_p , който

трябва да се измери. Ако не се разполага с данните за импеданса, може да се използва стойността на номиналния импеданс, но да се има предвид, че грешката е по-голяма.

Електрическата схема на свързване на високоговорителите в озвучителното тяло е дадена на фиг. 4.19а.



а

Фиг. 4.19 а

Параметрите на озвучителното тяло се определят в следния ред:

определя се коефициентът $\alpha = 0,71$;

определя се резонансната честота $f_0 = 89$ Hz;

определя се електрическият качествен фактор $Q_e = 0,94$;

определя се пълният качествен фактор $Q_T = 0,73$; стойността на Q_T е по-голяма от 0,707 и в честотната характеристика ще се получи лек подем;

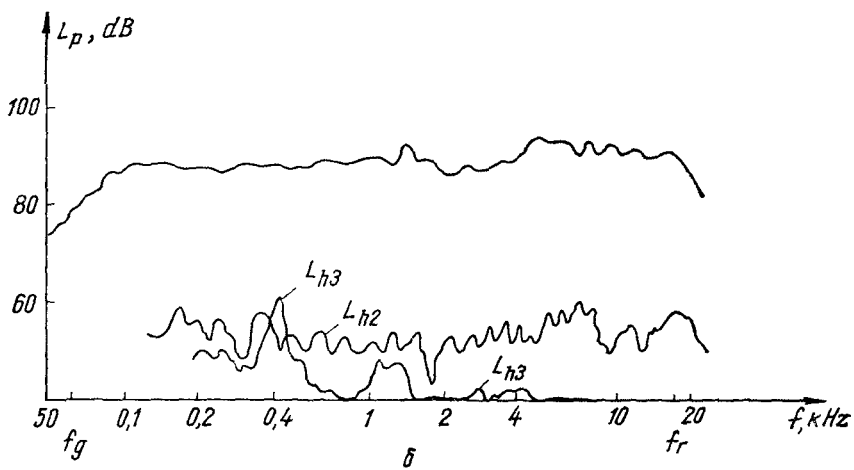
от (3.29а) при $R_i = 0$ се определя $f_s = 86$ Hz;

от (3.29 б) се определя $f_6 = 67$ Hz.

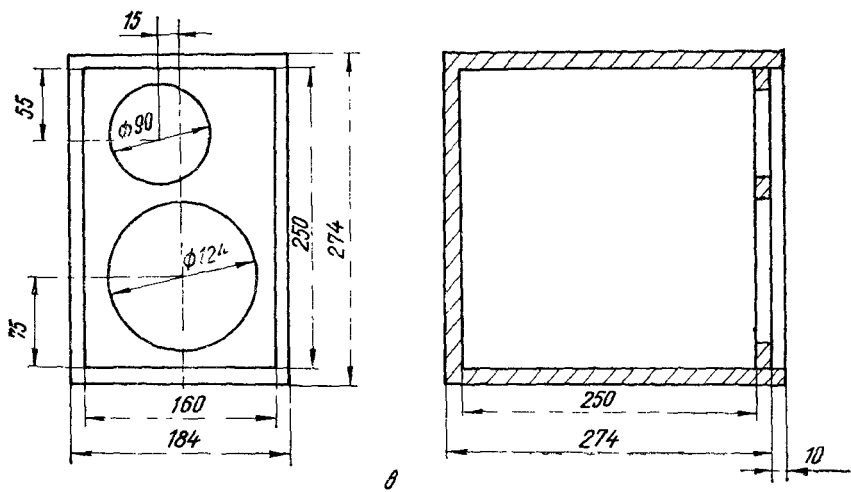
Може да се приеме, че честотната характеристика се понижава на ниво -8 dB при $f = 63$ Hz.

Следователно номиналният честотен обхват ще бъде от 63 до 18 000 Hz при обща неравномерност на честотната характеристика 12 dB. На фиг. 4.19 б е дадена честотната характеристика с хармониците на озвучителното тяло. Паспортната му мощност е 10 W, а коефициентът на хармонични изкривявания — по-малък от 3% в целия честотен обхват. Конструкцията на кутията е дадена на фиг. 4.19 в.

За разширяване на честотния обхват към ниските честоти озвучителното тяло може да се изпълни с фазоинвертор. Изчислението се провежда в следния ред:



Фиг. 4 19 б



Фиг 4.19 в

Приема се $R_i = 0$, а $Q_L = 5$ и за $Q_T = 0,59$ от графиките на фиг. 3.15 се отчита: $\alpha' = 0,2$; $x'_3 = 0,72$; $h' = 0,68$.

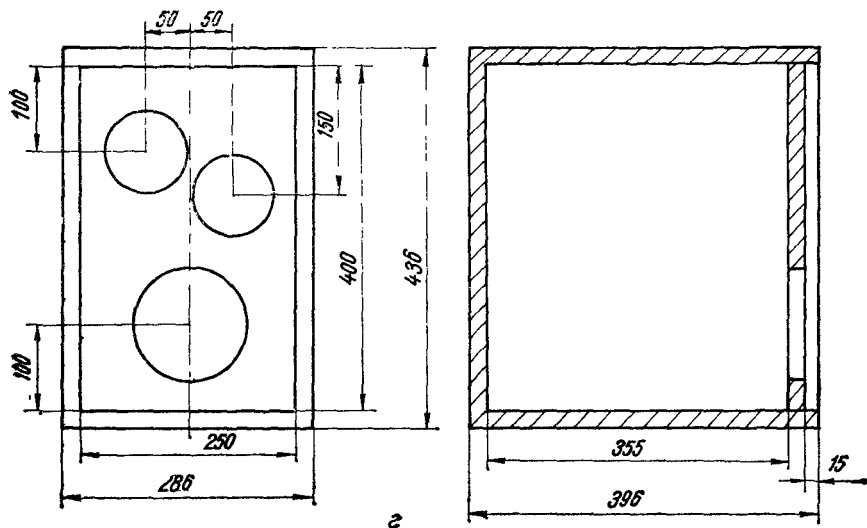
За параметрите на озвучителното тяло се получава $V' = 35,5 \text{ dm}^3$, $f'_3 = 50,5 \text{ Hz}$.

За сметка на значително увеличаване на обема се получи достатъчно ниска долна гранична честота. Честотната характеристика на озвучителното тяло ще съответствува на равновълнова характеристика на филтър на Чебишев от четвърти ред с характерното стръмно спадане към ниските честоти.

Ако полученият обем е неприемлив, а при малкия обем е неприемлив честотният обхват на озвучителното тяло, трябва да се търси високоговорител с по-ниска собствена резонансна честота.

Резонансната честота на фазоинвертора е $f_\phi = 46 \text{ Hz}$.

Съгласно (4.2) се определя $\frac{l_\phi}{S_\phi} = 41,5$.



Фиг. 4.19 г

Приема се тръба с диаметър $D_\phi = 80 \text{ mm}$ и се определя площта на сечението ѝ $S_\phi = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

Определя се дължината на тръбата $l_\phi = 207,5 \text{ mm}$.

Дълбочината на кутията (вътрешно) трябва да бъде не по-малка от 230 mm.

Конструкцията на кутията е дадена на фиг. 4.19 г. Дебелината на използваните плочи от дървесни частици трябва да бъде 18 mm

4.4. ТРИЛЕНТОВИ ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА С РАЗДЕЛИТЕЛЕН ФИЛТЪР ОТ ПЪРВИ РЕД

Разделянето на звуковия спектър на три подобхвата, които да се възпроизведат от специални за тези обхвати високоговорители, предлага редица предимства, отразяващи се благоприятно върху качеството на възпроизвеждане. Подобреното качество спрямо двулентовите озвучителни тела се дължи главно на следните фактори:

наличието на високоговорител, който възпроизвежда само сигналите със средни честоти, т. е. този честотен обхват, в който човешкото ухо е най-чувствително;

възможността двете разделителни честоти f_{p1} и f_{p2} да бъдат вън от обхвата, в който човешкото ухо е най-чувствително, т. е. $f_{p1} < 800 \text{ Hz}$, $f_{p2} > 4000 \text{ Hz}$;

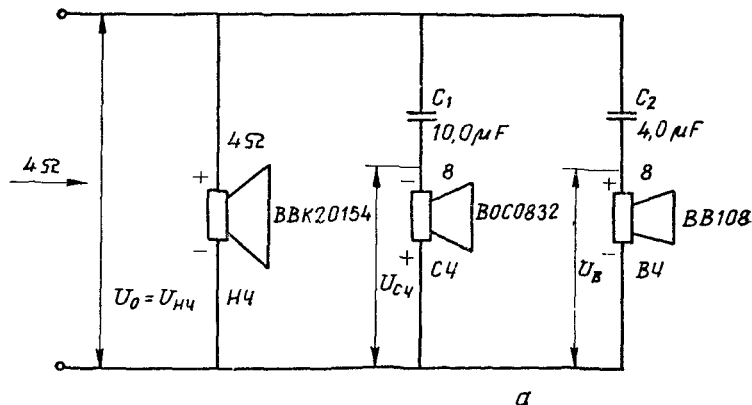
отношението между граничните честоти на обхвата, възпроизвеждан от даден високоговорител, е по-малко, а това намалява вероятността за поява на интермодулационни изкривявания и изкривявания от доплеров ефект.

Освен това средночестотният високоговорител поема върху себе си топлинното и механичното въздействие на част от сигналите и по този начин облекчава нискочестотния, но главно високочестотния високоговорител. Това създава възможност за увеличаване на паспортната мощност на озвучителното тяло, а също така и за използване на високочестотен високоговорител, който излъчва до много високи честоти — например от 5 до 22 kHz.

Най-простата реализация е трилентово озвучително тяло само с високочестотни разделителни филтри от първи ред.

На фиг. 4.20 а е показана принципната електрическа схема на свързване на високоговорителите на трилентово озвучително тяло към усилвателя чрез разделителни кондензатори. За високите честоти трите високоговорителя са свързани в паралел. Основен проблем тук е съгласуване на импедансите. Той се решава, като средночестотният и високочестотният високоговорител се избират с номинален импеданс, два пъти по-висок от номиналния импеданс на нискочестотния високоговорител. Например за нискочестотния високоговорител $Z_{ннч} = 4 \Omega$, за средночестотния и високочестотния —

$Z_{нСЧ} = 8 \Omega$ и $Z_{нВЧ} = 8 \Omega$. Освен това се взема предвид честотната зависимост на импеданса на високоговорителите. При посочените числени стойности за високите честоти импедансът трябва да се получи 2Ω . Обаче за високите честоти импедансът на високо-



Фиг. 4.20 а

говорителите нараства. Така за f_{p1} е измерено $Z_{НЧ} = 6 \Omega$, а $Z_{СЧ} = 12 \Omega$ и импедансът на озвучителното тяло става точно $Z_{OT} = 4 \Omega$, колкото е номиналният му импеданс. За f_{l2} : $Z_{НЧ} = 9 \Omega$, $Z_{СЧ} = 16 \Omega$ и $Z_{ВЧ} = 16 \Omega$ и за импеданса на озвучителното тяло се получава $Z_{OT} = 4,2 \Omega$. За всички останали честоти Z_{OT} има по-големи стойности.

Вторият основен проблем е изравняване на честотната характеристика на озвучителното тяло. Тук трябва да се има предвид, че за средните честоти излъчва и нискочестотният високоговорител, а за част от високите честоти излъчва и средночестотният. Разликата между импедансите спомага за изравняване на честотната характеристика — в обхватите на препокриване би се получил подем при равни номинални импеданси.

Капацитетът на кондензаторите се определя от (2.25 а).

Триленново озвучително тяло тип ОТМ2-09. То се произвежда от българската промишленост. Изградено е от следните високоговорители: нискочестотен ВВК201Б4 с номинален импеданс 4Ω , средночестотен тип ВО0832 с номинален импеданс 8Ω и високочестотен тип ВВ108 с номинален импеданс също 8Ω . Електрическата схема на свързване е идентична с дадената на фиг.

4.20 *a* — стойностите на елементите от фигурата се отнасят за това озвучително тяло. Капацитетите на разделителните кондензатори са $C_1=10 \mu\text{F}$ и $C_2=4 \mu\text{F}$. За разделителните честоти, като се вземе предвид измерената стойност на импеданса на високоговорителите за тези честоти, се получава $f_{p1}=1300 \text{ Hz}$, $f_{p2}=4000 \text{ Hz}$.

Паспортната мощност на озвучителното тяло е 30 W , а коефициентът на хармоничните изкривявания — по-малък от 3% . Обемът му е $V=14 \text{ dm}^3$.

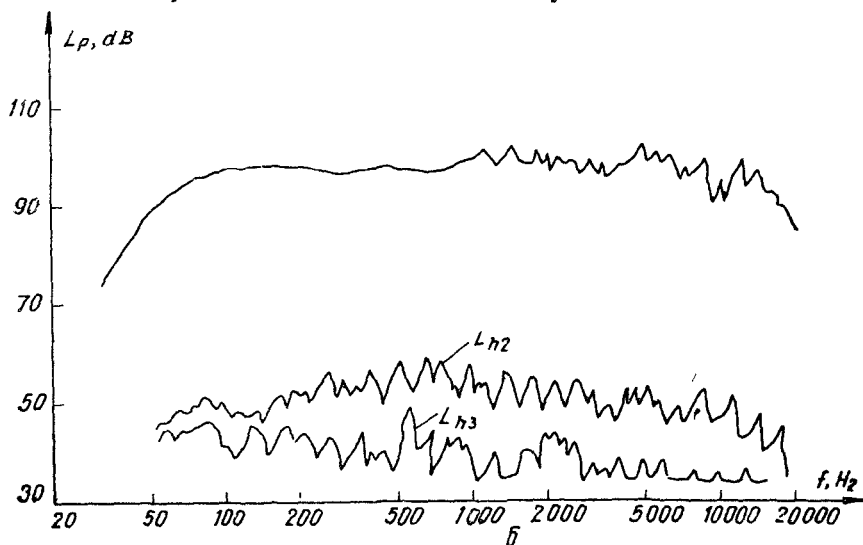
Параметрите му се определят, като се вземат предвид параметрите на високоговорител тип ВВК201Б4, дадени в първа глава: определя се коефициентът $\alpha=6,2$;

определя се резонансната честота $f_0=80 \text{ Hz}$;

определя се електрическият качествен фактор $Q_e=1,86$;

определя се пълният качествен фактор $Q_T=1,11$.

При тази стойност на качествен фактор в честотната характеристика на озвучителното тяло ще се получи подем в областта



Фиг. 4.20 б

на резонансната честота. Честотната характеристика не е максимално плоска и това е благоприятно за получаване на по ниска долна гранична честота. От (3.29 *a*) се определя $f_s=60,5 \text{ Hz}$, а от (3.29 *б*) се определя $f_0=51 \text{ Hz}$.

На фиг. 4.20 б е дадена честотната характеристика на озвучителното тяло, снета по оста при 4 W на 1 m. От нея се вижда, че долната гранична честота на озвучителното тяло е 50 Hz, а горната — 18 kHz, макар че производителят обявява номинален честотен обхват от 63 Hz до 16 000 Hz. Дадени са и характеристиките на втория L_{h2} и третия L_{h3} хармоници.

Триленново озвучително тяло тип ЗОТ30-1. Целесъобразно ли е да се използва високоговорителят ВВК201Б4 за озвучително тяло с фазоинвертор, като се запазят останалите два типа високоговорители? По принцип е целесъобразно, но трябва да се изменят параметрите на озвучителното тяло. Ще се разгледа един пример. За изходна величина се приема честотата $f_3=55$ Hz. Параметрите на озвучителното тяло се определят в следната последователност:

определя се $x_3=1,83$;

от графиката $x_3(Q_T)$ на фиг. 3.15 се намира точката $x_3=1,83$ и се спуска перпендикуляр към абсцисната ос — намира се $Q_T=0,27$;

определя се необходимата стойност на Q_e , като се приема, че Q_m не се изменя — $Q_e=0,30$. Един от възможните начини за намаляване на качествения фактор е да се използва усилвател с отрицателно изходно съпротивление, определено от зависимостта:

$$R_{\text{от}}^{\text{от}} = R \left(\frac{Q_e}{Q_{ep}} - 1 \right),$$

$$R_{\text{от}}^{\text{от}} = -1,75 \Omega;$$

при $Q_T=0,27$ се намира $\alpha=2,6$ и се определя необходимият обем $V=33 \text{ dm}^3$;

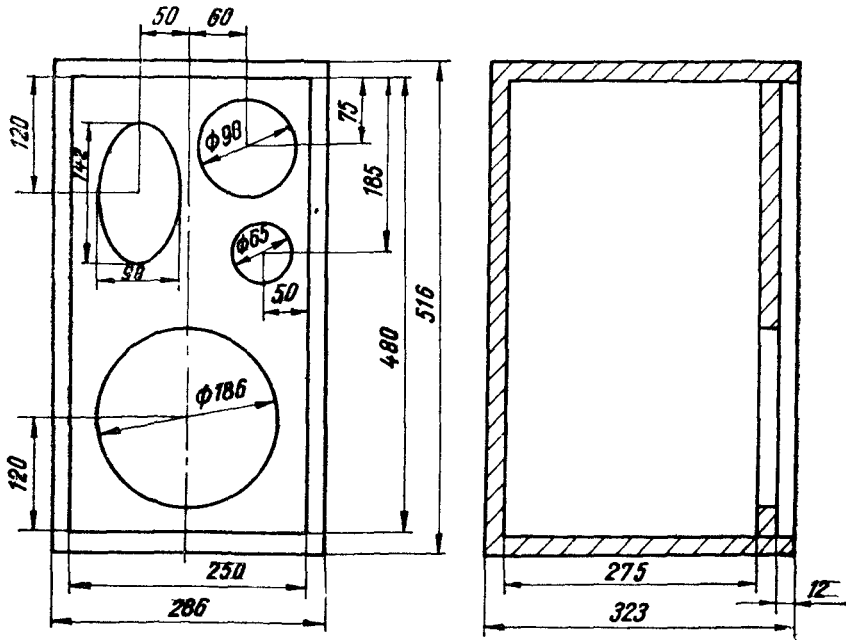
Честотната характеристика на озвучителното тяло ще съответствува на максимално плоска характеристика на филтър квази-Батърворт от трети ред. Тези криви не са много стръмни и разделителната честота на озвучителното тяло на ниво -8 dB ще се получи между 45 и 50 Hz.

от графиките на фиг. 3.15 за $Q_T=0,27$ се отчита $h=1,53$ и се определя резонансната честота на фазоинвертора $f_{\phi}=46 \text{ Hz}$.

Съгласно с (4.2) се определя $\frac{l_{\phi}}{S_{\phi}}=44,6$.

Приема се тръба с диаметър $D_{\phi}=60 \text{ mm}$ (вътрешно) и се определя площта на сечението ѝ — $S_{\phi}=2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Определя се дължината на тръбата $l_{\phi}=125 \text{ mm}$.

Дълбочината на кутията (вътрешно) трябва да бъде не по-малка от 250 mm. Необходимо е използваните плочи от дървени частици да бъдат с дебелина 18 mm. Конструкцията на озвучителното тяло е дадена на фиг. 4.20 в.



Фиг. 4.20 в

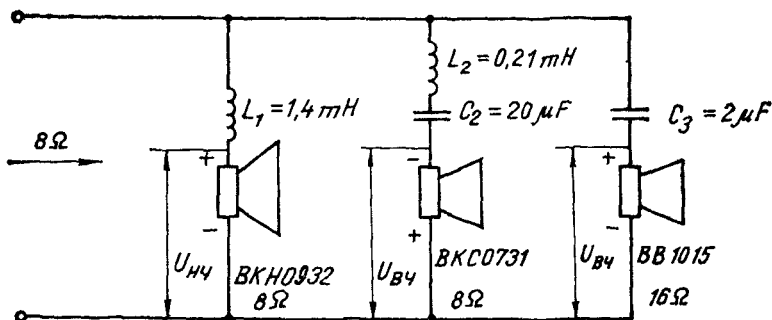
Триленново озвучително тяло тип ЗОТ20-1

Озвучително тяло с по-малък обем може да се получи, като се използва комбинация от следните високоговорители: ниско-честотен тип ВКН0932, средночестотен тип ВКС0731 и високо-честотен тип ВВ1015. Данните за тези високоговорители са дадени в първа глава.

Приема се разделителен филтър от първи ред, съдържащ нискочестотни и високочестотни звена, даден на фиг. 4.21 а. Номиналният входен импеданс на озвучителното тяло ще бъде 8 Ω.

Избор на разделителни честоти. Средночестотният високоговорител има долна гранична честота 800 Hz. С цел да се осигу-

ри производствен резерв и да се предотвратят евентуални дефекти, които могат да се появят като резултат от производствените толеранси на използваните във филтрите елементи, се приема $f_{p1} = 1000$ Hz. Горната гранична честота на същия високоговорител е 5000 Hz. От същите съображения се приема $f_{p2} = 4500$ Hz.



а

Фиг. 4.21

Средночестотният и нискочестотният високоговорител са с номинален импеданс 8Ω , но поради използването и на нискочестотни филтри общият импеданс няма да превиши 8Ω . Високочестотният високоговорител е избран с номинален импеданс 15Ω от съображения за получаване на равномерна честотна характеристика — неговата чувствителност е по-голяма от тази на останалите два високоговорителя.

Определяне стойностите на елементите на филтъра. Съгласно (2.25 а) се определят капацитетите на кондензаторите за избраните разделителни честоти $C_2 = 20 \mu F$, $C_3 = 1,96 \mu F$. При изчисленията се използват измерените стойности на модула на импеданса съответно на високоговорител тип ВКС0731 при f_{p1} и на високоговорител тип ВВ1015 при $f_{p2} - Z_{T2} = 8 \Omega$ и $Z_{T3} = 18 \Omega$.

Първата стойност съвпада със стандартна, а за втората се приема $C_3 = 2 \mu F$ и се преизчислява разделителната честота $f'_{p2} = 4420$ Hz.

Съгласно (2.13) се определят индуктивностите на бобините $L_1 = 1,40$ mH и $L_2 = 0,3$ mH. При тези изчисления също се използват измерените стойности на импедансите — $Z_{T1} = 8,8 \Omega$ на високоговорител тип ВКН0932 при f_{p1} и $Z'_{T2} = 8,4 \Omega$ на високоговорител тип ВКС0731 при f'_{p2} .

Двете bobини са свързани последователно с високоговорителите и затова активното им съпротивление трябва да бъде малко — ще се изработват от меден проводник с диаметър 1 mm. От табл. 2.1 се определя броят на навивките им — $n_1=170$ и $n_2=74$.

Изчисляване на акустичното оформяне. Приема се система на озвучително тяло със затворен обем, като $V=10 \text{ dm}^3$.

Последователно за озвучителното тяло се определят:

коэффициентът $\alpha=1,83$;

резонансната честота $f_0=84 \text{ Hz}$;

електрическият качествен фактор $Q_e=1,07$;

пълният качествен фактор $Q_T=0,76$.

Получи се $Q_T > 0,707$, което означава, че в честотната характеристика ще има максимум в областта над резонансната честота, т. е. честотната характеристика на озвучителното тяло няма да бъде максимално плоска, няма да съответствува на характеристиката на филтъра на Батърворт от втори ред.

От (3.29 а) се определя $f_3=78 \text{ Hz}$, а от (3.29 б) — $f_6=58 \text{ Hz}$.

Долната гранична честота на озвучителното тяло, на ниво -8 dB може да се приеме 55 Hz , което е много добър резултат.

При редица от изчислените примери на озвучително тяло със затворен обем се получи качествен фактор, по-голям от 0,707, при което в честотната характеристика на озвучителното тяло се получава подем. Стриктното провеждане на изчисленията изисква да се определи честотата, при която се получава максимумът и след това да се определи стойността на този максимум. Като се намери първата производна на (3.28 б) и се приравни на нула, може да се намери нормираната честота x_{max} , при която характеристиката ще има максимум. Получава се

$$x_{max} = \sqrt{\frac{2Q_T^2}{2Q_T^2 - 1}} \quad (4.3)$$

За изчисления пример се получава $f_{max}=610 \text{ Hz}$, $x_{max}=7,2$.

От (3.28 б) се определя $G_{max}=1,04$.

От (3.28 в) се получава $L_{max}=0,3 \text{ dB}$.

Следователно за честота $f_{max}=610 \text{ Hz}$ характеристиката ще има максимум от $0,3 \text{ dB}$.

При максимално плоска характеристика нивото на характеристиката за $f=610 \text{ Hz}$ би било $\approx 0 \text{ dB}$, т. е. общото повишаване на нивото на характеристиката при тази честота е $0,3 \text{ dB}$. Подразбира се, че това е напълно приемливо за практическа реализация.

Конструкцията на кутията на озвучителното тяло е дадена на фиг. 4.21 б. Обемът не е голям и дебелината на плочите от дървесни частици е достатъчно да бъде 10 mm. В обема трябва да се постави около 80 g звукопоглъщащ материал. На фиг. 4.21 в е дадена честотната характеристика по оста при 4 W на 1 m и честотните характеристики на втория L_{h2} и третия L_{h3} хармоник.

Паспортната мощност на изчисленото озвучително тяло е 20 W, а номиналният му честотен обхват от 50 до 18 000 Hz при равномерност на характеристиката му, не по-голяма от 12 dB. Характеристичната му чувствителност е над $0,5 \text{ PaW}^{-0,5}$, а коефициентът на хармониците — по-малък от 3%.

Триленгово озвучително тяло тип ЗОТ20-2. То е модификация на ЗОТ20-1 — ще бъдат използвани същите високоговорители и същият филтър, като ще се измени акустичното оформление. То ще представлява озвучително тяло с фазоинвертор.

Избира се честотата, при която нивото на честотната характеристика се понижава с 3 dB — $f_3 = 50 \text{ Hz}$.

Определя се $x_3 = 1,00$.

Приема се $Q_L = 5$ и определянето на параметрите се извършва от графиките, дадени на фиг. 3.15.

Върху графиката $x_3(Q_T)$ се намира точката, съответстваща на стойността 1,00, и се спуска перпендикуляр към абсцисната ос. Определя се:

$Q_T = 0,41$; $\alpha = 1,0$; $h = 1,0$.

Обемът на озвучителното тяло е $V = 18,3 \text{ dm}^3$.

Резонансната честота на фазоинвертора е $f_\phi = 50 \text{ Hz}$.

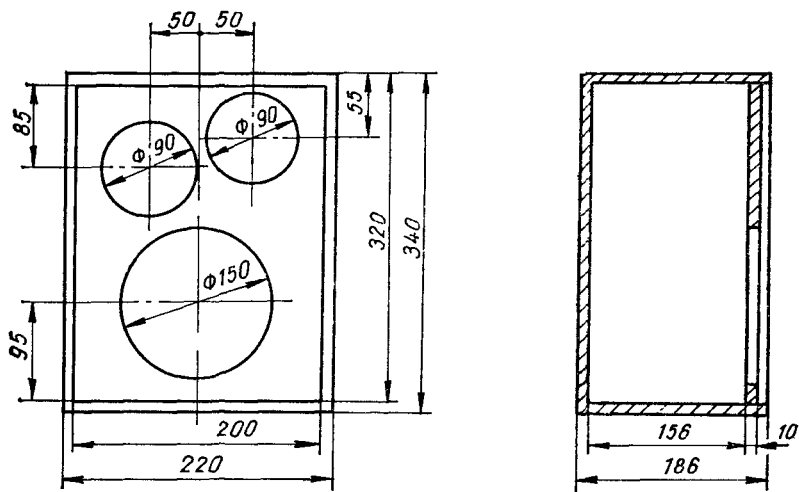
Определят се размерите на фазоинверсната тръба, като отношението между дължината и сечението $\frac{l_\phi}{S_\phi} = 90$.

Приема се тръба с диаметър $D_\phi = 40 \text{ mm}$ и се определя дължината на тръбата $l_\phi = 113 \text{ mm}$.

При избора на сечението на тръбата на фазоинвертора трябва да се има предвид следното съображение: ако отношението

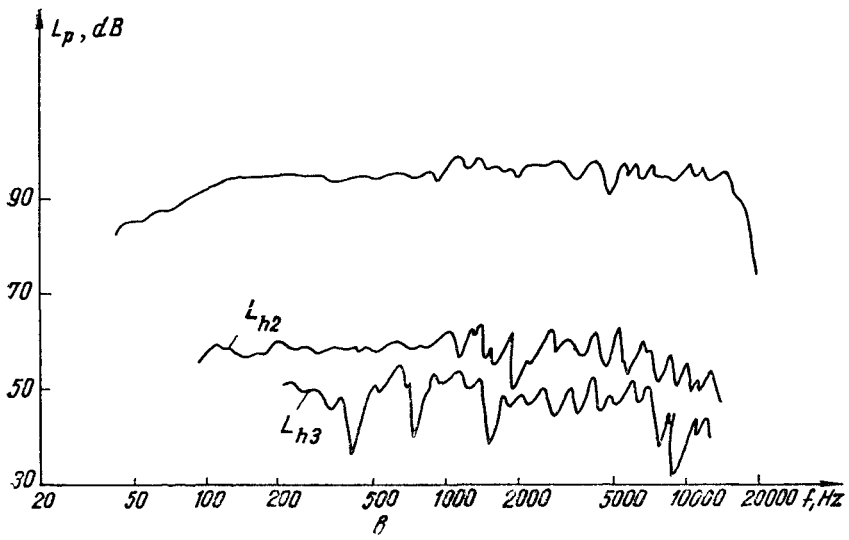
$\frac{l_\phi}{S_\phi}$ е малко, трябва да се приеме тръба с по-голям диаметър, ако това отношение е голямо — диаметърът на тръбата трябва да бъде малък. За тръби за фазоинверторите на озвучителните тела много подходящи са тръбите от PVC, които се използват в строителството. Те имат гладка повърхност и внасят малки загуби, а това е едно от изискванията за фазоинверторите.

Полученият резултат за честотната характеристика на озвучителното тяло е много добър — номиналният му честотен обхват



δ

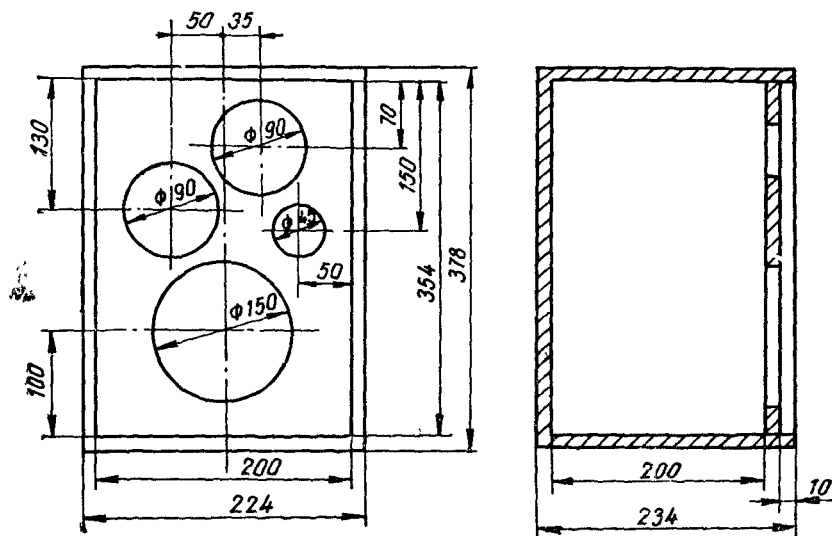
Фиг. 4.21 б



Фиг. 4.21 в

на ниво -8 dB спрямо средното, ще бъде от 42—45 до 18 000 Hz. Останалите му параметри са както при ЗОТ20—1.

Но показателите на това озвучително тяло могат да се постигнат, ако се реализират изчислените параметри. Получената стой-



Фиг. 4.22

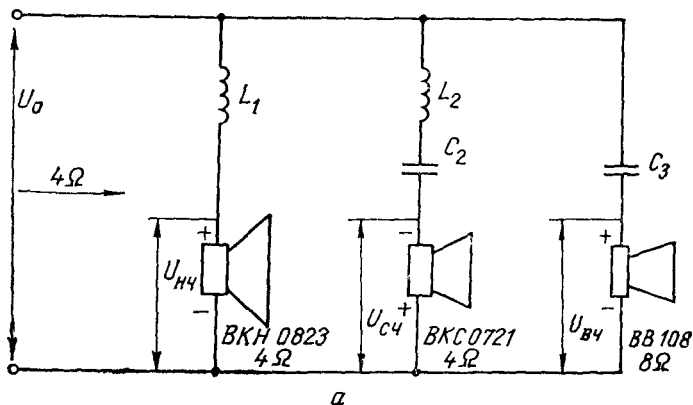
ност за качествения фактор е по-малка от тази на високоговорителя. Посочено бе, че при произведен вече високоговорител най-леко това се постига чрез използване на усилвател с отрицателно изходно съпротивление. Стойността му за случая е $R_i = -1,84 \Omega$.

На фиг. 4.22 е показана конструкцията на кутията на озвучителното тяло. В обема трябва да се постави около 60 g звукопоглъщащ материал.

Триленгово озвучително тяло тип ЗОТ20-3

Създаването на озвучителни тела с много малък обем изисква използването на високоговорители с много малка звукоизлъчваща повърхност. Триленгово озвучително тяло с много малки размери може да се реализира, като се използва нискочестотният високоговорител тип ВКН0823 в комбинация със средночестотен

тип В КС0721 и високочестотен тип ВВ108. Първите два високоговорителя са с номинален импеданс 4Ω , а последният — 8Ω . Озвучителното тяло ще бъде с номинален импеданс 4Ω . Високоговорителят тип ВВ108 е избран с импеданс 8Ω поради по-голя-



а

Фиг. 4.23 а

мата му чувствителност, така че честотната характеристика на озвучителното тяло да се получи достатъчно равномерна. Данни за тези високоговорители са дадени в първа глава.

Избира се електрически разделителен филтър от първи ред с нискочестотни и високочестотни звена. Електрическата му схема е дадена на фиг. 4.23 а.

Избор на разделителни честоти. Конусните средночестотни и високочестотни високоговорители по принцип издържат по-големи електрически натоварвания и затова съответната разделна честота може да се приеме равна или малко по-висока от долната им гранична честота. Все пак, когато се използва филтър от първи ред трябва да се има предвид, че стръмността на характеристиката му в областта на непропускане е само 6 dB/oct . Това означава, че напрежението на сигналите, чиято честота е $\frac{1}{3}$ или $\frac{2}{3}$ от октавата по-ниска от разделителната, ще бъде сравнително високо. Ако не съществува опасност от претоварване, могат да се появят нелинейни изкривявания, които не се контролират от производителите във от номиналния честотен обхват. Поради тези съображения ще бъдат приети разделителните честоти $f_{p1}=1200\text{ Hz}$ и $f_{p2}=4500\text{ Hz}$, като точните им стойности

ще се определят след изчисляване на кондензаторите и приемане на стандартни стойности.

Определяне стойностите на елементите на филтъра. Модулите на импедансите на високоговорителите при разделителните честоти имат следните стойности: $Z_{T1}=4,5 \Omega$ — на ВКН0823 при 1200 Hz, $Z_{T2}=4 \Omega$ — на ВКС0721 при 1200 Hz, $Z'_{T2}=4,2 \Omega$ — на ВКС0721 при 4500 Hz, $Z_{T3}=9 \Omega$ — на ВВ108 при 4500 Hz.

Капацитетите на кондензаторите се определят от (2.25 а): $C_2=33,3 \mu\text{F}$. Приема се $C_2=33 \mu\text{F}$. Разликата между изчислената и приетата стойност е много малка, поради което $f_{p1}=1200$ Hz. Определя се $C_3=3,92 \mu\text{F}$. Приема се $C_3=4 \mu\text{F}$ и се определя $f_{p2}=4420$ Hz.

Индуктивностите на бобините се определят от (2.13): $L_1=0,6$ мН и $L_2=0,145$ мН.

Бобините трябва да се навият от меден проводник с диаметър 1 mm. От табл. 2.1 се определя броят на навивките им: $n_1=110$, $n_2=51$.

Акустично оформяне. Озвучителното тяло се оформя като акустична система със затворен обем $V=8$ dm³.

Изчисленията се извършват в следния ред:

определя се коефициентът $\alpha=0,78$;

определя се резонансната честота на озвучителното тяло $f_0=80$ Hz;

определя се електрическият му качествен фактор $Q_e=0,66$;

определя се пълният качествен фактор $Q_T=0,525$.

Получи се малка стойност за Q_T , което означава, че честотната характеристика на озвучителното тяло няма да бъде максимално плоска, а нивото ѝ ще започне да се понижава от сравнително високи честоти.

Определят се честотите $f_3=110$ Hz и $f_6=90,6$ Hz.

Получените резултати са крайно незадоволителни за трилентово озвучително тяло. Няма смисъл да се реализира озвучително тяло, което да възпроизвежда много добре сигналите със средни и високи честоти, а да възпроизвежда много лошо ниските честоти. Необходимо е да се увеличи качественият фактор на озвучителното тяло до стойност $Q_T=0,707$. Приема се, че увеличението ще стане чрез допълнително съпротивление към изхода му.

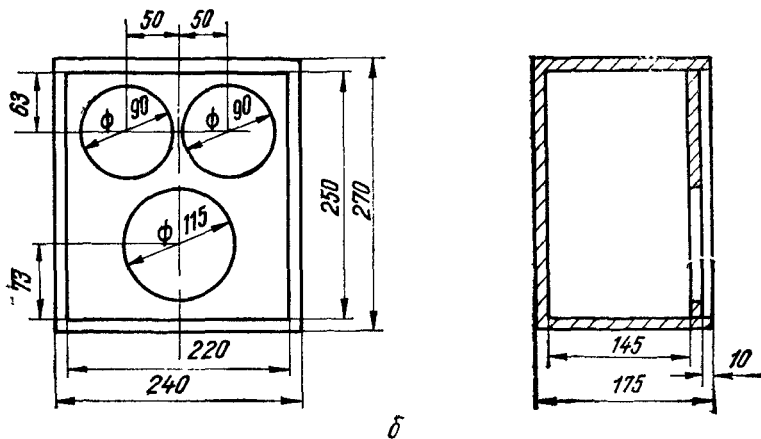
Определя се необходимата стойност на $Q'_e=0,96$.

За стойността на R_i се получава $R_i=3,3 \Omega$.

Цената, с която се заплаща разширяването на честотния обхват, е много висока — значителна част от изходната мощност на усилвателя се разсейва върху допълнителното съпротивление.

При тези условия се получава $f_3=84$ Hz и $f_6=61$ Hz.

Долната гранична честота, на ниво -8 dB, ще бъде не по-висока от 60 Hz. Номиналният честотен обхват ще бъде от 60 до 18 000 Hz, при неравномерност на честотната характеристика



Фиг. 4.23 б

не повече от 12 dB, паспортната му мощност — 20 W, чувствителността — $0,5 \text{ PaW}^{-0,5}$, а коефициентът на хармонични изкривявания — не по-голям от 3% в целия обхват.

На фиг. 4.23 б е показана конструкцията на кутията за ЗОТ20-3. Особената ѝ форма се дължи на необходимостта да се вместят високоговорителите на лицевия панел. В обема трябва да се постави 50–60 g звукопоглъщащ материал

Триленново озвучително тяло тип ЗОТ20-4. То е модификация на ЗОТ20-3. Установи се, че високоговорителят тип ВКН0823 не функционира оптимално в посоченото озвучително тяло при избрания вариант на затворен обем. Затова ще бъде изчислен вариант с фазоинвертор. Приема се, че обемът се запазва $V=8 \text{ dm}^3$, т. е. $\alpha=0,78$. Електрическата схема на свързване и елементите на филтъра остават както при ЗОТ20-3. Приема се, че $Q_L=5$ и за изчисленията се ползват графиките от фиг. 3.15. Върху графиката $\alpha(Q_T)$ се намира точката, съответстваща на $\alpha=0,78$, и от нея се спуска перпендикуляр към абсцисната ос. Определя се $Q_T=0,43$. Веднага се установява, че Q_T е по-голям от пълния качествен фактор на високоговорителя и

озвучителното тяло трябва да се захранва от усилвател с $R_i > 0$. Необходимата стойност е $R_i = 0,18 \Omega$.

Определят се останалите параметри на озвучителното тяло също от фиг. 3 15: $x_s = 0,8$; $h = 0,92$; $f_s = 48 \text{ Hz}$; $f_\phi = 55 \text{ Hz}$.

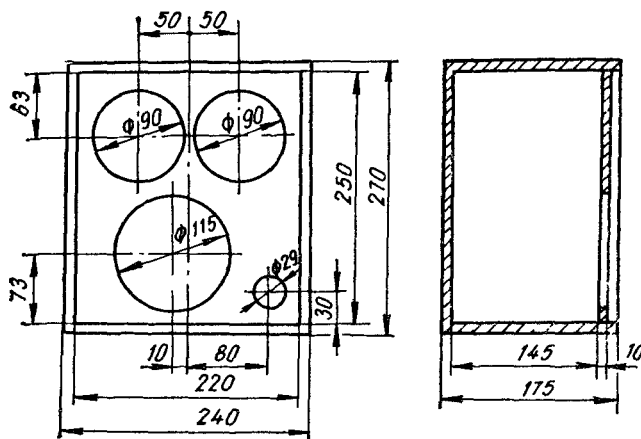
Стойността на $Q_T = 0,43$ е по-голяма от 0,414, а това означава, че озвучителното тяло ще има честотна характеристика, която съответствува на характеристиката на високочестотен филтър на Чебишев от четвърти ред. Затова се получи толкова малка стойност за честотата f_s . Номиналният честотен обхват на това озвучително тяло ще бъде, на ниво -8 dB спрямо средното, от 40 до 18 000 Hz.

Конструктивно изчисляване на фазоинвертора:

От (4.2) се определя $\frac{l_\phi}{S_\phi} = 128$. Поради голямата стойност на отношението l_ϕ/S_ϕ се избира тръба с малък диаметър $-D_\phi = 25 \text{ mm}$ и се определя $l_\phi = 64 \text{ mm}$.

Конструкцията на кутията е дадена на фиг. 4.24.

Резултатите от двата изчислени варианта могат да се обобщят — по-добри показатели ще има трилентовото озвучително тяло с фазоинвертор при $Q_T = 0,43$.



Фиг. 4.24

От анализа на извършените изчисления може да се направи и едно полезно за конструкторите на високоговорители заключение — високоговорителите с малки размери трябва да имат висок пълен качествен фактор около 0,5.

4.5. ДВУЛЕНТОВИ ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА С РАЗДЕЛИТЕЛЕН ФИЛТЪР ОТ ВТОРИ РЕД

В областта на затихване филтрите от първи ред внасят затихване със стръмност 6 dB/oct. В честотен обхват с широчина около 1 oct ($\pm 0,5$ oct от двете страни на разделителната честота) излъчват и двата високоговорителя. Възможни са интерференции между сигналите, излъчени от единия и другия високоговорител. В честотната характеристика може да се появят върхове и паднини. За предотвратяване на нежелани явления в областта на разделителната честота се използват филтри, които в обхвата на непропускане внасят затихване със стръмност 12 dB/oct — това са филтрите от втори ред. Като единични звена те бяха анализирани подробно във втора глава.

Съчетанието от един нискочестотен и един високочестотен филтър от втори ред образува разделителен филтър за двулентово озвучително тяло. Честотата, при която напреженията върху двата високоговорителя стават равни, се нарича разделителна честота на озвучителното тяло или по-точно — разделителна честота на филтъра като цяло. Обикновено разделителните честоти на двете филтрови звена съвпадат с разделителната честота на филтъра, т. е.

$$f_{pH} = f_{pB} = f_p. \quad (4.4)$$

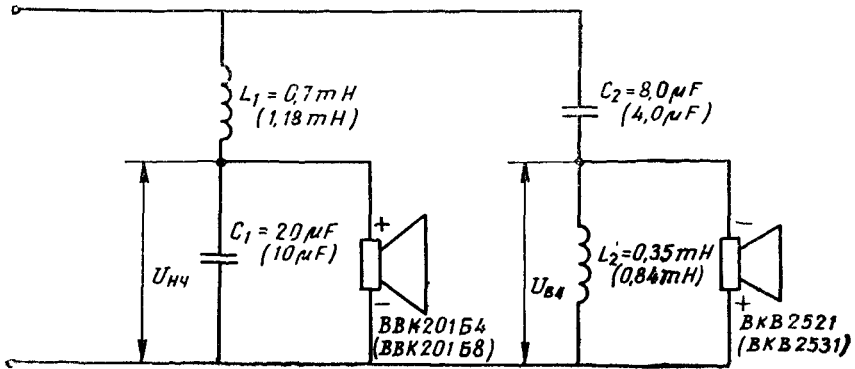
Разбира се и тук както при филтрите от първи ред равенство (4.4) трябва да се приема условно — зависи от конкретните показатели на използваните високоговорители.

В нашата страна се произвеждат нямалък брой двулентови озвучителни тела, в които е използван филтър от втори ред. Повечето от тях отговарят на изискванията за озвучителни тела от Hi-Fi клас. По принцип видът на филтъра зависи от качествата на озвучителното тяло — не се оправдава за озвучително тяло с ниски качествени показатели да се използва сложен скъп филтър.

Двулентово озвучително тяло ОТС1-01. Създадено е от нискочестотния високоговорител ВВК201Б4 и куполния високочестотен високоговорител ВКВ2521 в обем от 28 dm³. Усвоено е за редовно производство. Двата високоговорителя са с номинален импеданс 4 Ω , т. е. озвучителното тяло също е с номинален импеданс 4 Ω . Данните за високоговорителите са дадени в първа глава — те отговарят на всички изисквания за изделия от Hi-Fi клас, следователно озвучителното тяло също трябва да отговаря на тези изисквания, то трябва да се конструира, като се вземат предвид тези изисквания.

Разделителният филтър е изграден от две звена (нискочестотно и високочестотно) от втори ред. Схемата на свързване е дадена на фиг. 4.25.

Избор на разделителна честота. Нискочестотният високо-



Фиг. 4.25

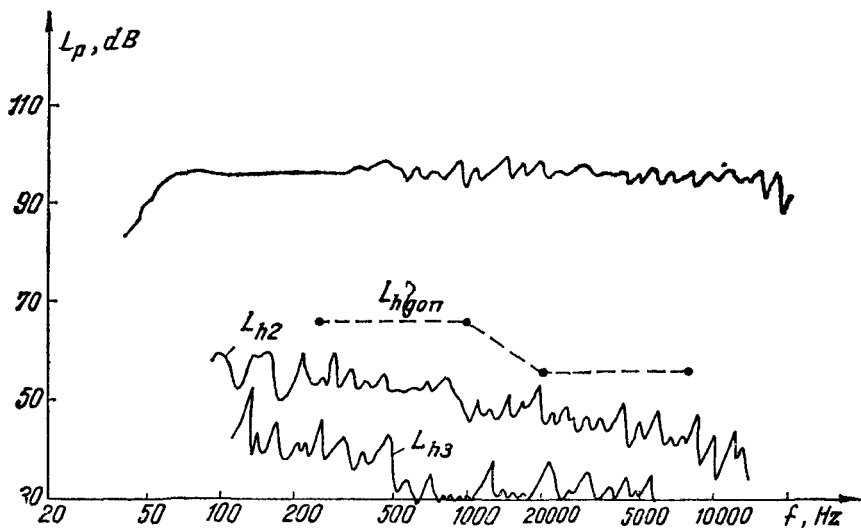
говорител излъчва ефективно до 6—8 kHz. При честота 4 kHz нивото на излъчването му на 15° от оста се понижава с 2—3 dB, а изискванията за Hi-Fi клас са не повече от 4dB. Коефициентът на хармонични изкривявания в обхвата над 1000 Hz е по малък от 1%. Това е предпоставка за избор на по-висока разделителна честота. В същото време високочестотният високоговорител може да функционира нормално над 2 kHz при филтър със стръмност 12 dB/oct. Затова разделителната честота е избрана 2 kHz.

Определяне елементите на филтъра. Приема се честотните характеристики на филтровите звена да бъдат максимално плоски. Следователно елементите им ще се определят от (2.57), (2.58), (2.77) и (2.78). След изчисляване на стойностите е направена донастройка на филтъра, при която са отчетени влиянията на реактивния характер на входния импеданс на високоговорителите. Получените резултати са дадени на схемата от фиг. 4.25.

Изчисляване на акустичното оформяне. При зададен обем на озвучителното тяло изчисленията се провеждат, като се определи коефициентът $\alpha=3,1$ и след това останалите параметри, с които ще се получи оптималният ход на честотната характеристика.

Резонансната честота на озвучителното тяло е $f_0=61$ Hz. Електрическият и пълният качествен фактор са $Q_e=1,28$ и $Q_T=0,88$.

Пълният качествен фактор на ОТС1-01 се получи по-голям



Фиг. 4.26

от 0,707 и неговата честотна характеристика в областта на ниските честоти ще бъде с малко по-високо ниво от максимално плоската характеристика.

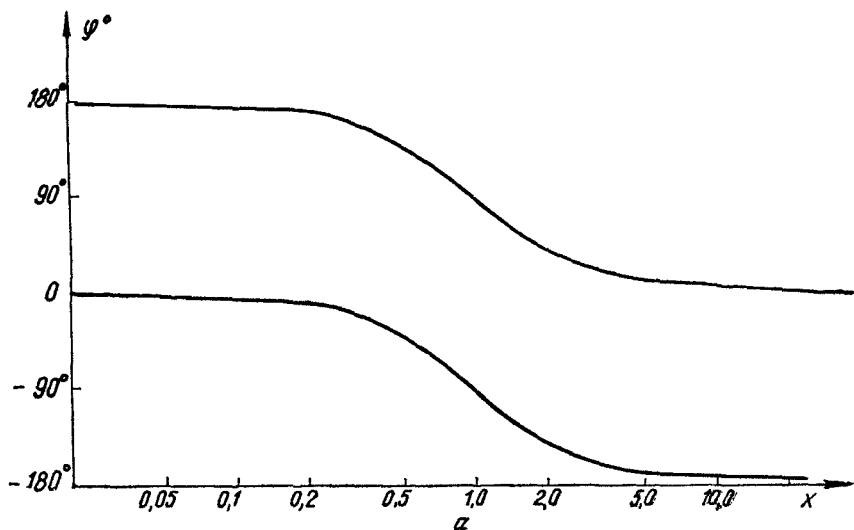
Честотите f_3 и f_6 имат следните стойности: $f_3=52$ Hz; $f_6=45$ Hz.

Получава се задоволителен резултат. На фиг. 4.26 е дадена честотната характеристика на озвучителното тяло, снета при условията за измерване на хармонични изкривявания на озвучителни тела от Hi-Fi клас, като са дадени вторият L_{h2} и третият L_{h3} хармоник.

Основните показатели на ОТС1-01 са: паспортна мощност 20 W, номинален честотен обхват от 50 до 18 000 Hz при неравномерност, не по-голяма от 12 dB, характеристична чувствителност, не по-малка от 0,4 PaW^{-0,5}, и коефициент на хармонични изкривявания — в съответствие с изискванията за Hi-Fi клас.

В същото акустично оформяне и със същите показатели се

произвежда и озвучително тяло с номинален импеданс 8Ω , като са използвани високоговорителите тип ВВК201Б8 и тип ВКВ2531. Разделителният филтър и схемата на свързване са същите, а стойностите на елементите на филтъра са означени на фиг. 4.25 а в скоби.

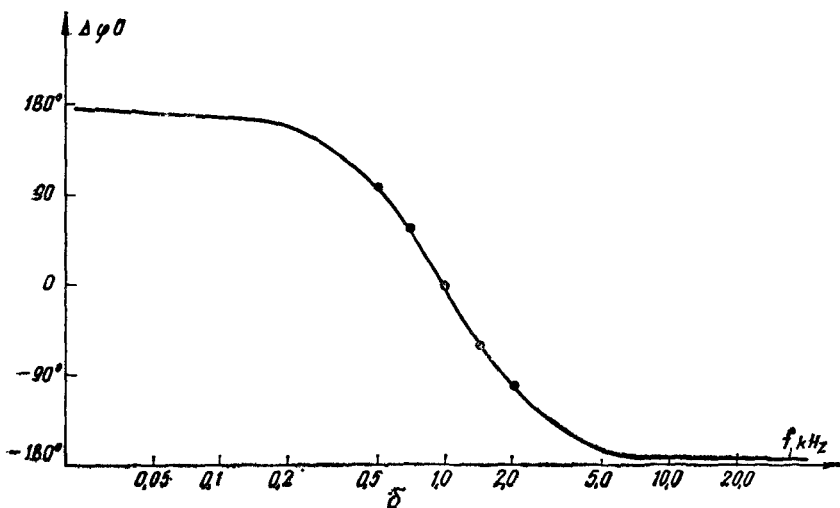


Фиг. 4.27 а

При анализа на филтрите от втори ред във втора глава се установи, че за разделителната честота нискочестотният филтър дефазира напрежението на изхода спрямо входното на -90° , а високочестотният — на $+90^\circ$. Разликата между двете фазови разлики е 180° . Тази разлика се запазва постоянна в целия честотен обхват. Това може лесно да се установи, като се вземе разликата между зависимостите (2.59) и (2.79). На фиг. 4.27 а е дадена зависимостта на фазовата разлика от честотата. Следователно, ако двата високоговорителя се свържат синфазно, те ще излъчват противофазно в целия честотен обхват. В резултат на това в областта на разделителната честота ще се появи падина в честотната характеристика на озвучителното тяло. Този недостатък може да се избегне, като двата високоговорителя се свържат противофазно. В този случай те ще излъчват синфазно в областта на разделителната честота — фазовата разлика между напреженията, подавани на високоговорителите, ще се изменя, както е

показано на фиг. 4.27 б. Необходимо е да се поясни — фазовата разлика между високоговорителите е определена по отношение на едноименните полюси на високоговорителите.

Какво ще се спечели, ако ОТС1-01 се реализира с фазоинвертор?



Фиг. 4.27 б

При определената стойност α се приема $Q_L=5$ и от фиг. 3.15 се определя оптималната стойност на качествения фактор на озвучителното тяло $Q_T=0,29$.

При тези стойности на α и Q_T резонансната честота на фазоинвертора трябва да бъде $f_\phi=58,5$ Hz.

Честотите $x_3=1,6$ и $f_3=48$ Hz.

Долната гранична честота на ОТС1-01 с фазоинвертор на ниво -8 dB ще бъде около 40 Hz, т. е. ще бъде с около 5 Hz по-ниска, отколкото при озвучителното тяло със затворен обем. За целта обаче ще трябва да се намали качественият фактор на 0,29. Това е възможно, ако се измени типът на използвания нискочестотен високоговорител или се замени магнитната система на ВВК201Б4 с друга, която създава по-голям магнитен поток. По принцип това е също нов тип високоговорител. Без да се изменя високоговорителят, качественият фактор може да се нама-

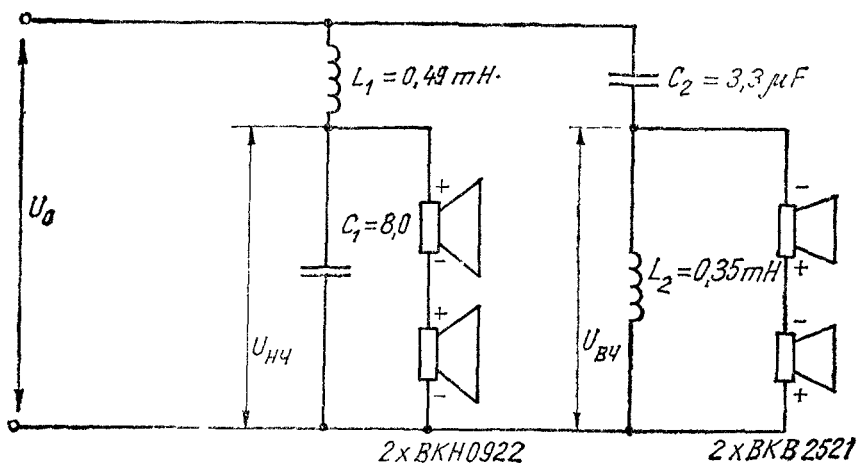
ли, като се използва усилвател с отрицателно изходно съпротивление.

Изчисляване на фазоинвертора. Определя се $l_{\phi}/S_{\phi}=33$, приема се $D_{\phi}=60$ mm и се определя $l_{\phi}=94$ mm.

Двулентово озвучително тяло тип ОТС1-03. То представлява малко по-сложна акустична система. Изградено е от два нискочестотни високоговорителя тип ВКН0922 и два високочестотни високоговорителя тип ВКВ2521. Използвани са по два високоговорителя за възпроизвеждане на всеки от подобхватите, за да се получи по-голяма паспортна мощност, а също и по-голяма чувствителност.

Разделителният филтър и схемата на свързване е дадена на фиг. 4.28. Еднотипните високоговорители са свързани последователно, тъй като са с номинален импеданс 4Ω , а озвучителното тяло е с номинален импеданс 8Ω .

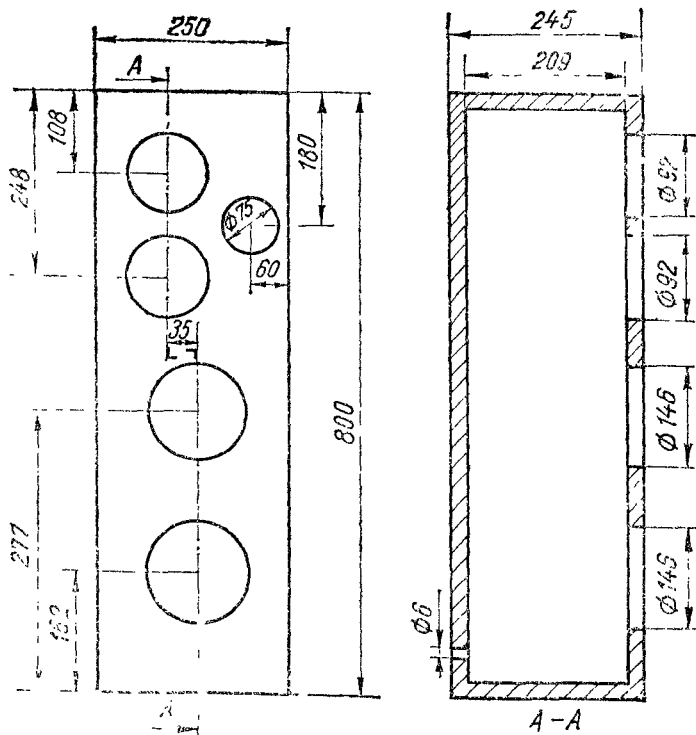
Избор на разделителна честота. Нискочестотният високоговорител излъчва ефективно до 5 kHz, като нивото на 15° се понижава с не повече от 2 dB спрямо нивото по оста. Коэффициентът на хармониците му отговаря на изискванията за Hi-Fi



Фиг. 4.28

клас. Разделителната честота може да бъде и по-висока. Все пак куполният високоговорител излъчва по-ненасочено сигналите с честота $4-5$ kHz. Затова разделителната честота на филтъра се приема $f_p=3500$ Hz.

Изчисляване елементите на филтъра. Честотната характеристика на двете филтрови звена трябва да бъде максимално плоска, поради което ще се използват зависимостите (2.57), (2.58), (2.77) и (2.78). За товарно съпротивление на филтъра се приемат



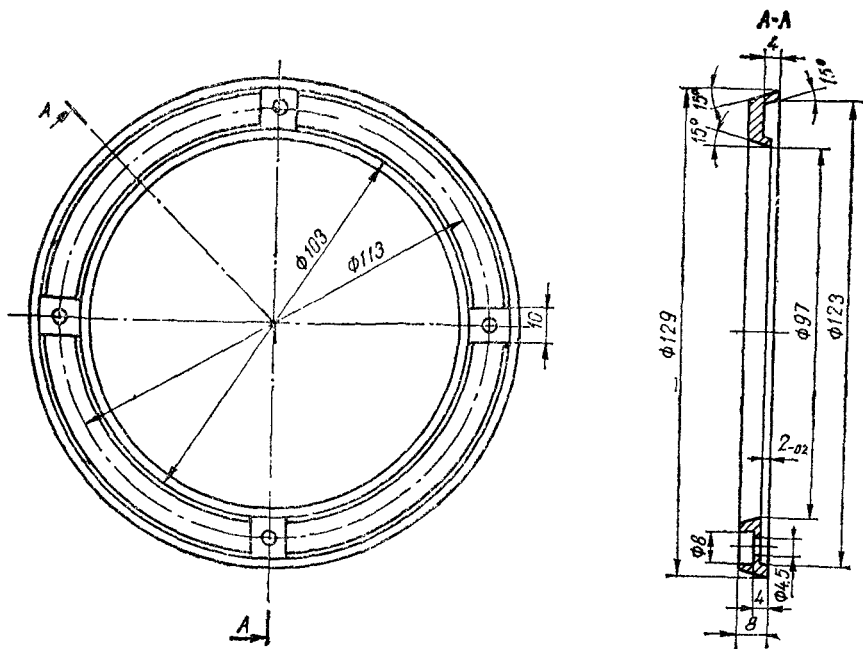
Фиг. 4 29

номиналните импеданси на последователно свързаните високочестотни елементи и се определя $C_1=4,03 \mu\text{F}$. Приема се $C_1=1,0 \mu\text{F}$. Определя се $L_1=0,51 \text{ mH}$.

Елементите на високочестотното звено имат същите стойности: $L_2=0,51 \text{ mH}$ и $C_2=4 \mu\text{F}$.

След настройка на филтъра с включени в изхода му високочестотни елементи му са коригирани и точните стойности са дадени на схемата от фиг. 4.28.

Акустично оформяне. ОТС1-03 е оформено като озвучително тяло с фазоинвертор за подобряване излъчването на ниските честоти. За фазоинвертор се използва тръба от PVC с диаметър $D_{\phi}=60$ mm и дължина $l_{\phi}=120$ mm.

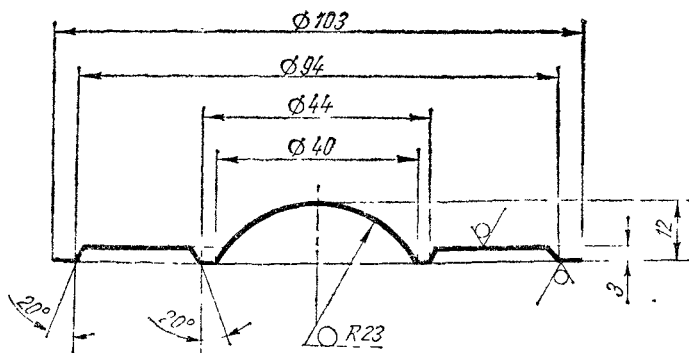


Фиг. 4.30

На фиг. 4.29 е показана конструкцията на кутията му. За отбелязване е, че пред високоговорителите не е поставена обща решетка от плат, а лицевият панел е открит. Поради това лицевият панел също трябва да бъде фурнирован и обработен както останалите външни повърхности на кутията. Пред всеки високоговорител е поставена метална релефна решетка, закрепена с помощта на декоративен пръстен. На фиг. 4.30 е показана конструкцията на пръстена, използван пред високоговорител тип ВКВ2521, а на фиг. 4.31 е показана конструкцията на решетките. За високоговорител ВКН0922 трябва да се използват аналогични елементи съобразно размерите.

Основните показатели на ОТС1-03 са: паспортна мощност 40 W; номинален честотен обхват от 50 до 16 000 Hz; при не-

равномерност на честотната характеристика не повече от 12 dB, характеристична чувствителност — по-голяма от $0,4 \text{ PaW}^{-0,5}$ и коефициент на хармонични изкривявания — в съответствие с изискванията за Hi-Fi клас.



Фиг. 4.31

На фиг. 4.32 е показана честотната характеристика по оста на ОТС1 04 на разстояние 1 m при мощност 4 W и характеристиките на хармониците му, снети при различни мощности в различните подобхвати в съответствие с изискванията за измерване на коефициенти на хармониците за Hi-Fi клас.

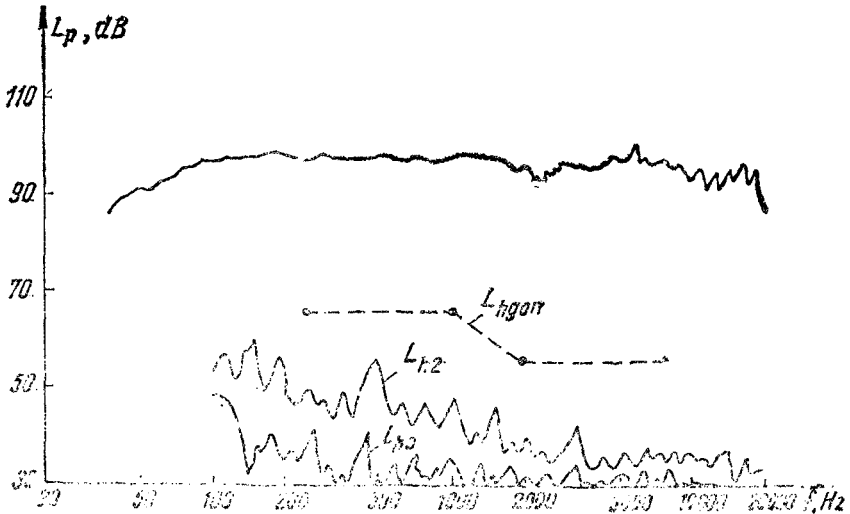
Двулентово озвучително тяло тип ОТС1-02. Конструирано е на базата на нискочестотен високоговорител тип ВКН1031 — 1 брой, и куполен високочестотен високоговорител тип ВКВ2521 — 2 броя. Данните за тези високоговорители са дадени в първа глава. Използват се два броя от високоговорител тип ВКВ2521, защото нискочестотният високоговорител има по-голяма чувствителност и по-голяма паспортна мощност. Импедансното съгласуване е осигурено, като двата високочестотни високоговорителя са с импеданс 4Ω и са свързани последователно, а нискочестотният високоговорител е с импеданс 8Ω . Номиналният импеданс на озвучителното тяло е 8Ω . Разделителният филтър и схемата на свързване на високоговорителите са дадени на фиг. 4.33.

Избор на разделителна честота. Нискочестотният високоговорител е с по-големи размери от ВКН0922. За предпочитане е разделителната честота да се приеме 3000 Hz.

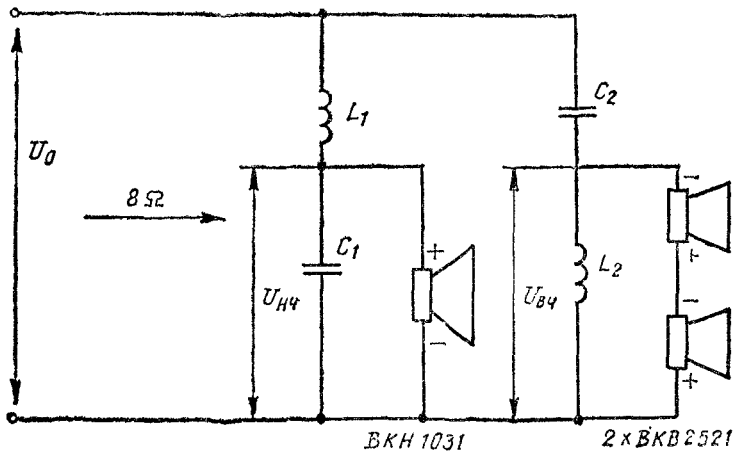
Определяне елементите на филтъра. Използват се зависимостите за получаване на максимално плоска характеристика и се

определя $C_1=4,66 \mu\text{F}$. Приема се $C_1=5,0 \mu\text{F}$. Определя се $L_1=0,94 \text{ mH}$.

С приемане на по-голям капацитет за C_1 разделителната честота на нискочестотното звено ще се получи малко по-ниска. Же-



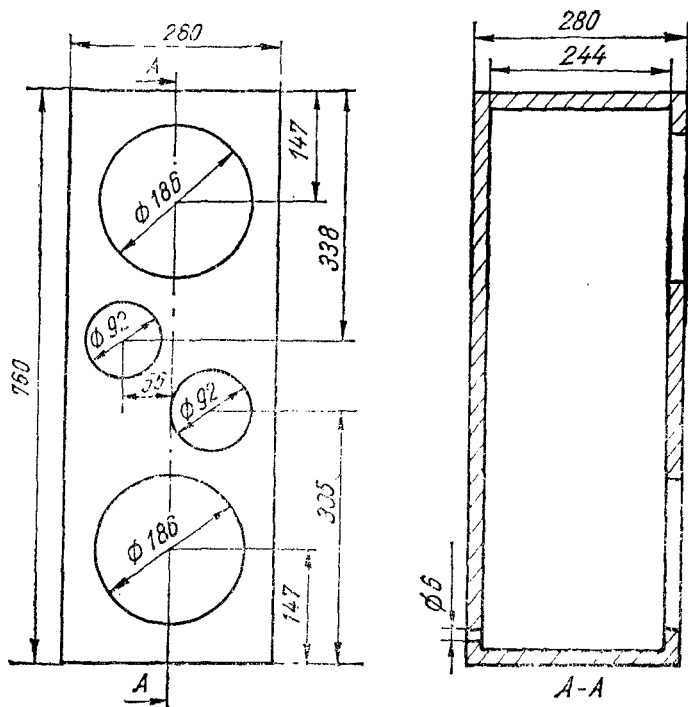
Фиг. 4.32



Фиг. 4.33

лателно е за високочестотното звено да се получи малко по-висока. Затова се приема $C_2=4 \mu\text{F}$ и $L_2=0,8 \text{ mH}$.

Акустично оформяне. ОТС1-02 е оформено като озвучително тяло с пасивна мембрана. Обемът на озвучителното тяло е 36 dm^3 . За пасивна мембрана се използва мембрана от същия високоговорител, т. е. $S_n=S$. Гъвкавостта на окачване на пасивната мембрана е равна на тази на високоговорителя, тъй като се използва и трептилката за предотвратяване на нежелани изкълчвания при трептенето ѝ. От $S_n=S$ следва $\delta=\alpha$.



Фиг. 4.34

Приема се $Q_v=Q_L=7$.

Следователно изчисленията могат да се проведат, като се ползват графиките, дадени на фиг. 3.21.

База за изчисленията е зададеният обем.

Определя се коефициентът $\alpha=1,8$ и от фиг. 3.21 се отчита $Q_T=0,36$; $x_3=1,31$; $h=1,40$; $g=0,74$.

Като се вземе предвид, че $f_p=28$ Hz, се получава:

честотата $f_3=36,5$ Hz;

резонансната честота на пасивната мембрана $f_n=20,7$ Hz;

резонансната честота на обема на озвучителното тяло $f_v=$
 $=39,2$ Hz.

Пълният качествен фактор на озвучителното тяло се получи точно равен на съответния на високоговорителя.

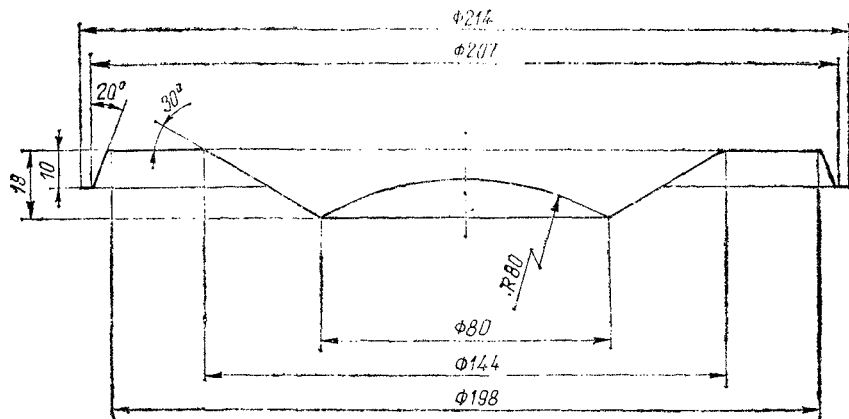
Динамичната маса на пасивната мембрана се определя съгласно с (3.72) $m_n=40$ g.

Следователно към пасивната мембрана трябва да се добави допълнителна маса $m_{дон}=26$ g.

С това пасивната мембрана е настроена за изчисления режим.

Резонансната честота на пасивната мембрана с обема на озвучителното тяло трябва да бъде 39,2 Hz. С измерването ѝ се установява правилността на настройката.

Конструкцията на кутията на ОТС-02 е дадена на фиг. 4.31. На фиг. 4.35 е дадена конструкцията на декоративната решетка,



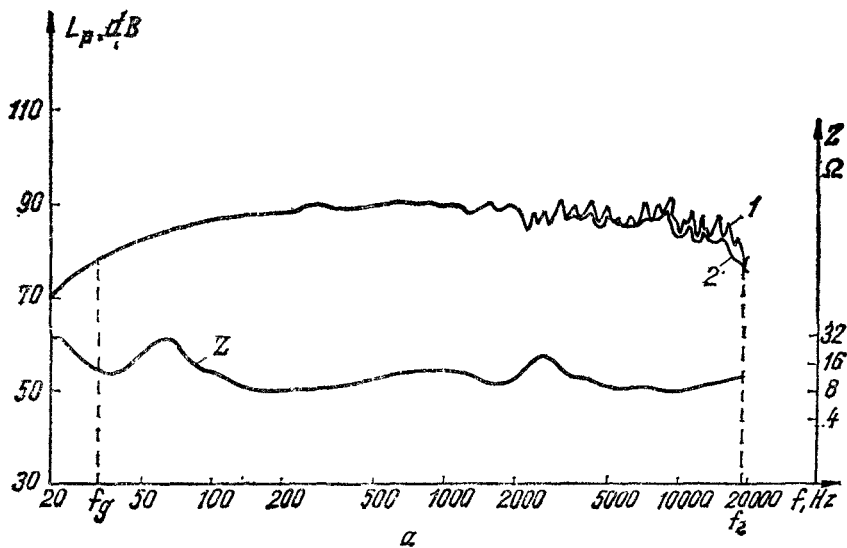
Фиг. 4.35

която трябва да се постави пред високоговорител ВКН1031 и пред пасивната мембрана, а пръстенът може да бъде подобен на дадения на фиг. 4.30. Пред високоговорителите тип ВКВ2521 се поставят декоративните елементи, дадени на фиг. 4.30 и фиг. 4.31.

Основните показатели на ОТС1-02 са: паспортна мощност 40 W; номинален честотен обхват от 35 до 16 000 Hz при неравномерност на честотната характеристика не повече от 12 dB, характеристична чувствителност: не по-малка от 0,5 PaW^{-0,5} и коефициент на хармонични изкривявания — значително по-малък от допустимите стойности за Hi-Fi клас.

На фиг. 4.36а е дадена честотната характеристика на ОТС1-02, снета при мощност 1 W на разстояние 1 m по оста (крива 1) и на 15° от оста (крива 2). На фиг. 4.36б са дадени честотните характеристики на общото звуково налягане, на втория и третия хармоник, снети при условията за измерване на d_h на озвучителни тела от Hi-Fi клас.

Двуленгово озвучително тяло тип 20Т40-1. Това озвучително тяло може да се реализира от същите високоговорители и същия филтър както ОТС1-02, но се избира вариант със затворен обем. Целта е да се намали обемът на озвучителното тяло,



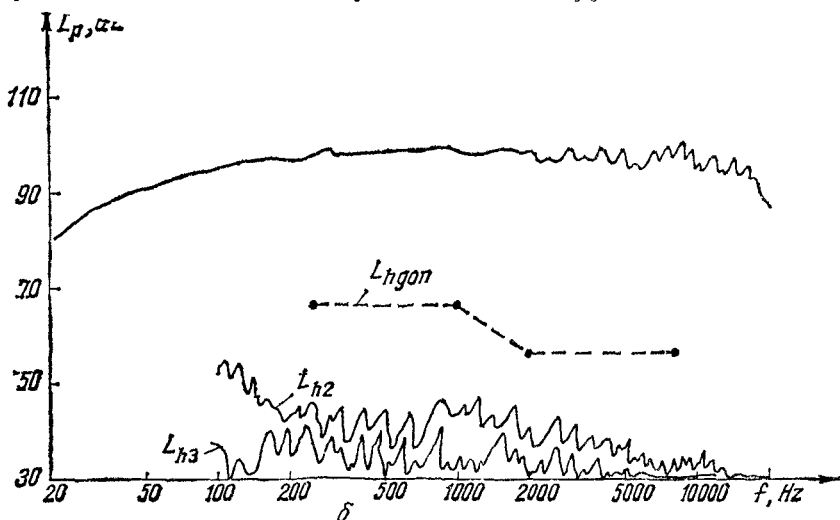
Фиг. 4.36 а

тъй като пасивната мембрана заема площ върху лицевия панел и определя по-големи размери (височина) на озвучителното тяло. Като се премахне пасивната мембрана, обемът може да се намали до $V=25 \text{ dm}^3$.

Акустичното изчисление се провежда, като се изчислят параметрите на озвучителното тяло:

коэффициентът $\alpha=2,56$;

резонансна честота на озвучителното тяло $f_0=53$ Hz;



Фиг. 4.36 б

електрически качествен фактор $Q_e=0,78$;

пълен качествен фактор $Q_T=0,61$.

Получената стойност $Q_T < 0,707$ означава, че честотната характеристика на озвучителното тяло няма да бъде максимално плоска, а ще бъде с по-ниско ниво от нея за областта на ниските честоти.

Определят се честотите $f_3=61$ Hz и $f_8=44,6$ Hz.

Честотната характеристика на озвучителното тяло не е оптимална, но независимо от това, то ще възпроизвежда добре сигналите с ниска честота. Може да се приеме, че долната му гранична честота на ниво -8 dB ще бъде под 42 Hz. Разбира се, резултатът е по-лош, отколкото при ОТС1-02, но друго не можеше и да се очаква — пасивната мембрана изиграва ролята си.

Качественият фактор на 2ОТ40-1 може да се увеличи до желаната стойност — например до $Q_T=0,707$.

Това може да стане най-лесно, като се използва усилвател с $R_i > 0$. В случая обаче съществува и друго решение — да се на-

мали обемът на озвучителното тяло. Постъпва се по следния начин:

определя се необходимата стойност на $Q_e=0,95$ за получаване $Q_T=0,707$;

решава се (3.26) по отношение на α и се получава $\alpha=4,39$; определя се необходимият обем $V=11,6 \text{ dm}^3$;

при новите стойности на параметрите се получава: резонансната честота $f_0=65 \text{ Hz}$, честотите $f_3=65 \text{ Hz}$ и $f_6=49 \text{ Hz}$.

Номиналният честотен обхват на озвучителното тяло се стесни, но се намали неговият обем.

Озвучителното тяло със затворен обем с нискочестотен високоговорител тип ВКН1031 бе изчислено в два варианта. При единия от тях честотната му характеристика е максимално плоска, а при втория се различава от този ход. Различията обаче не са големи, честотната характеристика променя своя ход — тя е с по-ниско ниво от максимално плоската, но граничната честота се получава по-ниска. Трябва да се има предвид обаче, че с намаляването на обема се намалява и к. п. д. на високоговорителя, т. е. понижава се средното ниво на характеристиката.

Двуленгово озвучително тяло тип 20Т40-2. На базата на електрическото решение на предишните две озвучителни тела — комбинация от високоговорители и разделителен филтър — може да се изчисли озвучително тяло с фазоинвертор. Приема се, че озвучителното тяло ще се захранва от усилвател с $R_i=0$ и $Q_V=Q_L=5$, от което следва, че изчислениято ще се извърши, като се използват графиките от фиг. 3.15.

За $Q_T=0,358$ се отчита: $\alpha=1,95$; $x_3=1,22$; $h=1,15$.

За обема на озвучителното тяло се получава $V=33 \text{ dm}^3$.

Честотата е $f_3=34 \text{ Hz}$.

Резонансната честота на фазоинвертора е $f_{\phi}=32 \text{ Hz}$.

За сметка на увеличаване на обема честотата на срязване f_3 се понижи на 34 Hz . Може да се приеме, че долната гранична честота на озвучителното тяло, на ниво -8 dB , ще бъде 30 Hz . Както е възприето да се казва — получи се чудесен бас. При това обемът от 33 dm^3 може да се причисли към приемливите за домашни условия.

Приема се фазоинверторът да се реализира от пластмасова тръба. Размерите ѝ се определят в следния ред:

определя се отношението между дължината и площта на сечението $S_{\phi}^l=63$;

поради голямата стойност на отношението трябва да се приеме мал-

ка площ на сечението на тръбата, за да се получи приемлива дължината $D_{\phi}=50$ mm;

определя се $l_{\phi}=123$ mm.

Честотната характеристика на изчисленото озвучително тяло ще съответства на максимално плоска характеристика на филтър квази-Батърворт от трети ред.

При конструиране на озвучително тяло от Hi Fi клас твърде често реномираните производители определят параметрите на високоговорителя, изхождайки от изискванията на озвучителното тяло. След това конструират високоговорител, който да отговаря на тези изисквания. Такъв подход в настоящата книга е излишен, тъй като възможността за конструиране на нови високоговорители не е в рамките на възможностите на читателя. Възможни са обаче модификации на съществуващи високоговорители, при които да се получат различни параметри.

Например високоговорителят тип ВКН1031 може да се изработи с друг вид гумени гънки и да се получат следните параметри:

$$f_p = 43 \text{ Hz}; m = 22 \text{ g}; c = 0,625 \cdot 10^{-3} \text{ mN}^{-1}; V_c = 27 \text{ dm}^3, \\ Q_{mp} = 3,00; Q_{ep} = 0,6; Q_{mp} = 0,5.$$

Този високоговорител може да се използва в озвучително тяло тип 20Т40-2, при което се отчитат следните параметри за $R_t = 0$:

$$\alpha = 0,42; x_s = 0,78; h = 0,82.$$

За параметрите на озвучителното тяло се получава:

$$V = 64 \text{ dm}^3; f_3 = 33,5 \text{ Hz} \text{ и } f_{\phi} = 35,2 \text{ Hz}.$$

Честотната характеристика на това озвучително тяло съответства на равновълнова характеристика на филтър на Чебишев от четвърти ред и затова честотата на срязване е по-ниска от резонансната честота на високоговорителя.

За фазоинвертора се получава $\frac{l_{\phi}}{S_{\phi}} = 39$.

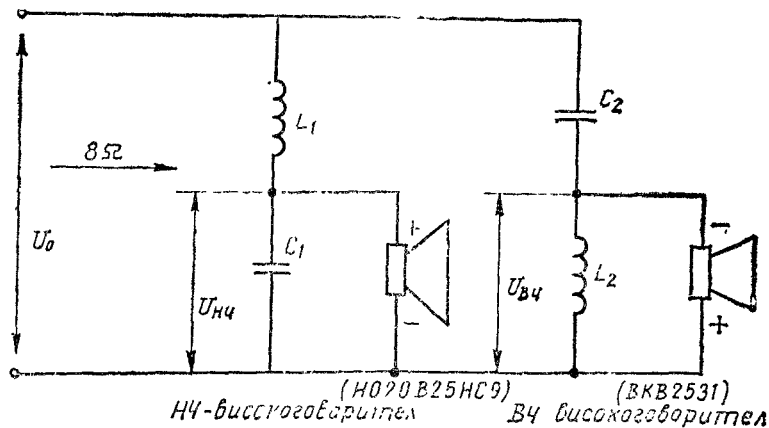
Приема се $D_{\phi} = 60$ mm и за дължина на тръбата се получава $l_{\phi} = 110$ mm.

Долната гранична честота на озвучителното тяло, на ниво -8 dB, може да се приеме 32 Hz, а номиналният му честотен обхват — от 32 до 18 000 Hz. Обемът му е с 93 % по-голям от необходимия за високоговорител с резонансна честота 28 Hz, но е приемлив за използване в домашни условия. Предимство за озвучителното тяло е лесното реализиране на фазоинвертора.

С този пример се показва, че при оптимално проектиране на озвучителни тела е възможно да се получи много широк често-

тен обхват на възпроизвеждане и от високоговорители, които имат не много добри параметри. В случая разликата между резонансните честоти на двата високоговорителя е 15 Hz или относително 54 %, докато честотите на срязване f_3 са почти равни. Към това трябва да се прибави и разликата, между обемите с 93 %. Твърде често понижаването на резонансната честота на даден нискочестотен високоговорител се поставя като самоцел, без да се свързва с останалите параметри на високоговорителя. По-правилно е успоредно с намаляване на резонансната честота да се намаляват и съответните качествени фактори на високоговорителя.

Двулентово озвучително тяло тип 20Т25-1. За нискочестотен високоговорител ще се използва типът HD20B25H2C9, а за високочестотен — типът ВКВ2531. Двата високоговорителя са много подходящи за съвместна работа — нискочестотният е с паспортна мощност 25 W, а високочестотният — 20 W, но от 2000 Hz, а при разделителна честота 3—4 kHz може да понесе 25—30 W. От честотните характеристики на високоговорителите се установява, че при мощност 1 W те поддържат ниво в подобхватите си 86 ± 2 dB. Освен това отговарят на изисквания-



Фиг. 4.37

та за Hi-Fi клас по отношение на коефициентите на хармонични изкривявания.

Електрическо изчисление на озвучителното тяло. Схемата на филтъра е дадена на фиг. 4.37.

Избор на разделителна честота. Поради посочените вече съображения се приема $f_p = 3400$ Hz.

Изчисляване елементите на филтъра. Определят се от изискването за получаване на максимално плоска честотна характеристика — използват се зависимостите (2.57), (2.58), (2.77) и (2.78). Кондензаторът $C_1 = 4,15 \mu\text{F}$. Приема се $C_1 = 4 \mu\text{F}$.

$$L_1 = 0,526 \text{ mH.}$$

$$C_2 = C_1 = 4 \mu\text{F}; L_2 = L_1 = 0,526 \text{ mH.}$$

След настройване на филтъра, натоварен с високоговорителите, се получиха стойностите: $C_1 = 4 \mu\text{F}$; $L_1 = 0,81 \text{ mH}$; $C_2 = 3,0 \mu\text{F}$; $L_2 = 0,35 \text{ mH}$.

Акустично изчисление на озвучително тяло. Данни за параметрите и показателите на двата високоговорителя са дадени в първа глава. Необходимо е да се определи типът на озвучителното тяло — приема се да се реализира с фазоинвертор.

За самото озвучително тяло се приема $Q_v = Q_L = 5$ и $R_i = 0$.

Изчисленията се провеждат от графиките на фиг. 3.15. За $Q_T = Q_{Tp} = 0,47$ се отчита $\alpha = 0,58$; $x_3 = 0,85$; $h = 0,89$.

При тези параметри на озвучителното тяло честотната му характеристика ще съответствува на характеристиката на филтър на Чебишев от четвърти ред.

Обемът V_c , съответстващ на гъвкавостта на високоговорителя, е $V_c = 95 \text{ dm}^3$.

Обемът на озвучителното тяло се получава $V = 164 \text{ dm}^3$. Той е трудно приемлив за домашни условия.

Честотата на срязване е $f_s = 23$ Hz.

Резонансна честота на фазоинвертора е $f_\phi = 24$ Hz.

За размерите на фазоинвертора се получава $\frac{l_\phi}{S_\phi} = 32,7$.

Приема се $D_\phi = 100 \text{ mm}$ и се определя $l_\phi = 256 \text{ mm}$.

Размерите на тръбата на фазоинвертора са в съответствие с големите размери на озвучителното тяло.

Обемът на озвучителното тяло 20Т25-1 с фазоинвертор може да се намали, като се намали качественият му фактор. Ако се намали обемът, без да се намалява качественият фактор, честотната характеристика на озвучителното тяло ще съответствува на филтър квази-Батърворт от трети ред, но ще има значителен подем, т. е. няма да бъде максимално плоска.

Двулентово озвучително тяло тип 20Т20-1. За създаването му се използват следните високоговорители: ВКН0822 — нискочестотен — 4 Ω , ВКВ2521 — високочестотен — 4 Ω .

С оглед да се получи по-висок качествено фактор на нискочестотния високоговорител могат да се заменят гънките му с друг

тип, които имат по-малки механични загуби, при което се получава

$$Q_{M\phi} = 2,60, Q_{ep} = 0,58, Q_{T\phi} = 0,48.$$

Останалите параметри на високоговорителя се запазват.

Електрическо изчисление. Схемата на разделителния филтър е идентична с дадената на фиг. 4.37.

Избор на разделителна честота. Малките размери на ниско-честотния високоговорител позволяват да се избере по-висока разделителна честота. Използуването на високочестотен разделителен филтър от втори ред позволява разделителната честота да бъде близка до долната гранична честота за високоговорител тип КВВ2521 — 2000 Hz. Приема се $f_p = 3000$ Hz.

Изчисляване на елементите на филтъра. При изчисляване на разделителни филтри от втори ред неотклонно се следва изискването за получаване на максимално плоска характеристика. Използуват се зависимостите (2.57), (2.58) (2.77) и (2.78). Приема се, че товарът на филтровите звена е равен на номиналния импеданс на високоговорителите $Z_T = R_T = 4 \Omega$.

$$C_1 = 9,35 \mu F. \text{ Приема се } C_1 = C_2 = 10 \mu F.$$

$$L_1 = L_2 = 0,3 \text{ mH}.$$

Точните стойности се установяват след реализиране на филтровите звена и патоварването им със съответните високоговорители. Получава се: $C_1 = 12 \mu F$; $C_2 = 8 \mu F$; $L_1 = 0,3 \text{ mH}$; $L_2 = 0,25 \text{ mH}$.

Акустично проектиране. Приема се, че озвучителното тяло ще се запазва от усилвател с $R_i = 0$, при което пълният му качествен фактор ще бъде равен на този на високоговорителя. При тези условия е много благоприятно да се реализира озвучително тяло с фазоинвертор.

Приема се $Q_\phi = Q_T = 5$ и изчисленията се извършват, като се ползват графиките от фиг. 3.15. За $Q_T = 0,48$ се отчита

$$\alpha = 0,55; x_3 = 0,81; h = 0,92.$$

При тези стойности на параметрите на озвучителното тяло честотната му характеристика ще съответствува на характеристиката на високочестотен филтър на Чебишев от четвърти ред.

За обема на озвучителното тяло се получава $V = 11,1 \text{ dm}^3$.

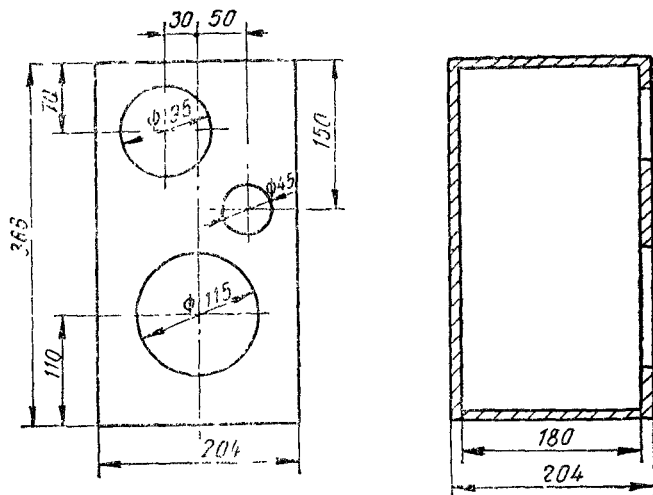
Честотата на срязване е $f_3 = 48,6 \text{ Hz}$.

Резонансната честота на инвертора е $f_\phi = 55,2 \text{ Hz}$.

Размерите на фазоинвертора се определят, както и в предшестващите примери $\frac{l_\phi}{S_\phi} = 92$.

Избира се малка стойност за S_p , тъй като и обемът на озвучителното тяло е малък — тръба с диаметър $D_{\phi} = 10$ mm. За дължина на тръбата се получава $l_{\phi} = 114$ mm.

На фиг. 4.38 е показана конструкцията на озвучителното тяло



Фиг. 4.38

тип 20Т20-1, а на фиг. 4.39 — честотните му характеристики. В обема на озвучителното тяло трябва да се постави звукопоглъщащ материал — около 100 g.

Ефективният честотен обхват на изчисленото озвучително тяло е от 40 до 18 000 Hz при обща неравномерност на честотната характеристика, не по-голяма от 12 dB. Характеристичната му чувствителност е не по-малка от $0,4 \text{ PaW}^{-0,5}$. Коэффициентът на хармонични изкривявания и диаграмата на насоченост отговарят на изискванията за Hi-Fi клас. Паспортната му мощност е 20 W, а номиналният импеданс — 4 Ω .

Същото озвучително тяло може да се реализира със затворен обем тип 20Т20-2. Неговите параметри, при условие, че обемът остане $V = 11,1 \text{ dm}^3$, ще бъдат:

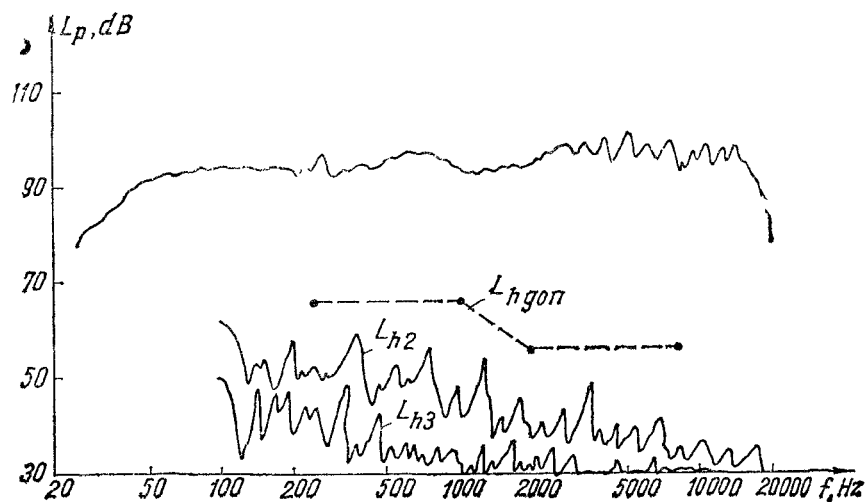
коэффициентът $\alpha = 0,55$;

резонансната честота $f = 74,2 \text{ Hz}$;

електрически качествени фактор $Q_e = 0,72$, а $Q_T = 0,565$;

честота $f_s = 97 \text{ Hz}$, а честотата $f_6 = 66 \text{ Hz}$.

Разликата е много голяма — при един и същи обем и напълно идентични високоговорители, само в резултат на поставянето на оптимално оразмерен фазоинвертор честотата на срязване f_3 се понижи с цяла октава — от 97 Hz на 48,6 Hz.



Фиг. 4.39

По електрически път (чрез увеличаване на R_i) може да се увеличи Q_T до 0,707, при което за честотите f_3 и f_6 ще се получи $f_3=74$ Hz и $f_6=57$ Hz.

Двулентово озвучително тяло тип 20Т20-3. За реализирането му се използват следните типове високоговорители:

нискочестотен ВКН0932, с номинален импеданс 8 Ω ;

високочестотен ВКВ2531, с номинален импеданс 8 Ω .

Номиналният импеданс на озвучителното тяло ще бъде също 8 Ω .

Необходимите данни за високоговорителите са дадени в първа глава.

Електрическо изчисление. Разделителният филтър ще бъде реализиран съгласно схемата, дадена на фиг. 4.37.

Избор на разделителна честота. Параметрите и показатели на високоговорителите позволяват да се избере разделителната честота в обхвата от 2000 до 4000 Hz. Приема се $f_p=2800$ Hz.

Изчисляване на елементите на филтъра. Приема се, че товарът на филтровите звена е равен на номиналния импеданс на

високоговорителите $Z_T = R_T = 8 \Omega$. Използват се отново зависимостите (2.57), (2.58), (2.77) и (2.78).

$$C_1 = C_2 = 5 \mu F.$$

$$L_1 = L_2 = 0,64 \text{ mH}.$$

След реализиране на филтъра и свързване на използваните високоговорители за товар на съответните филтрови звена стойностите на елементите на филтъра се уточниха на:

$$C_1 = 6 \mu F; C_2 = 4 \mu F; L_1 = 0,64 \text{ mH}; L_2 = 0,35 \text{ mH}.$$

Капацитетът на C_1 ще се реализира от паралелното свързване на два кондензатора — $C_1' = 4 \mu F$, тип МБГП-2 и $C_1'' = 2 \mu F$, тип КМПТ-96. Ако се приеме бобините да се изпълнят от меден проводник с диаметър 1 mm, за определяне на броя на навивките се използва табл. 2.1. Получава се $n_1 = 114$ нав., $n_2 = 80$ нав.

Акустично проектиране. Приема се да се реализира озвучително тяло със затворен обем, което да се захранва от усилвател с пренебрежимо малко вътрешно съпротивление — $R_i = 0$.

Приема се обем на озвучителното тяло $V = 28 \text{ dm}^3$.

Определя се коефициентът $\alpha = 0,65$.

Определя се резонансната честота на озвучителното тяло $f_0 = 64 \text{ Hz}$.

Определя се електрическият качествен фактор $Q_e = 0,84$.

Определя се пълният качествен фактор $Q_T = 0,64$.

Определят се честотите $f_3 = 70 \text{ Hz}$ и $f_6 = 52 \text{ Hz}$.

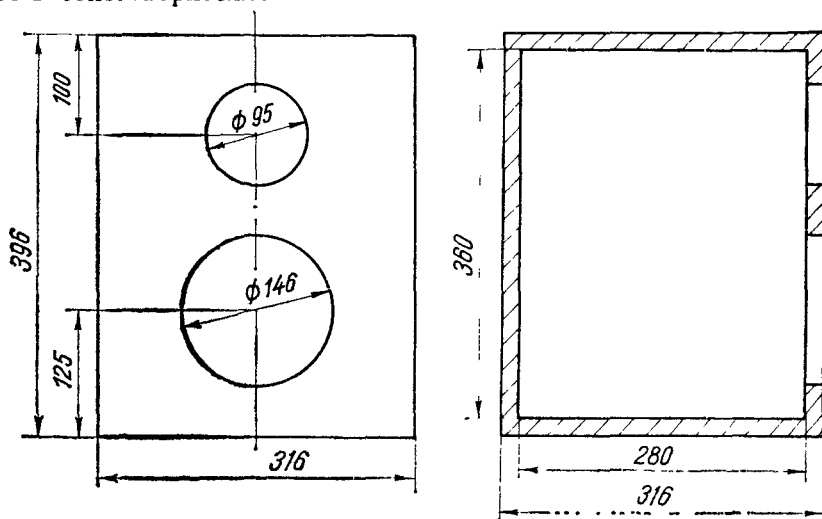
Номиналният честотен обхват на изчисленото озвучително тяло ще бъде от 50 до 18000 Hz при неравномерност на честотната характеристика, не по-голяма от 12 dB. Паспортната му мощност е 20 W, а чувствителността му — $0,5 \text{ Pa W}^{-0,5}$. Коефициентът на хармонични изкривявания и диаграмата на насоченост ще отговарят на изискванията за Hi-Fi клас.

В озвучителното тяло трябва да се постави 150 g звукопоглъщащ материал. Както бе посочено, това ще доведе до увеличаване на гъвкавостта на обема или до намаляване на коефициента ϕ . В крайна сметка ще се разшири номиналният честотен обхват към ниските честоти. Възможно е да се намали обемът на около 22 dm^3 и да се запазят изчислените параметри.

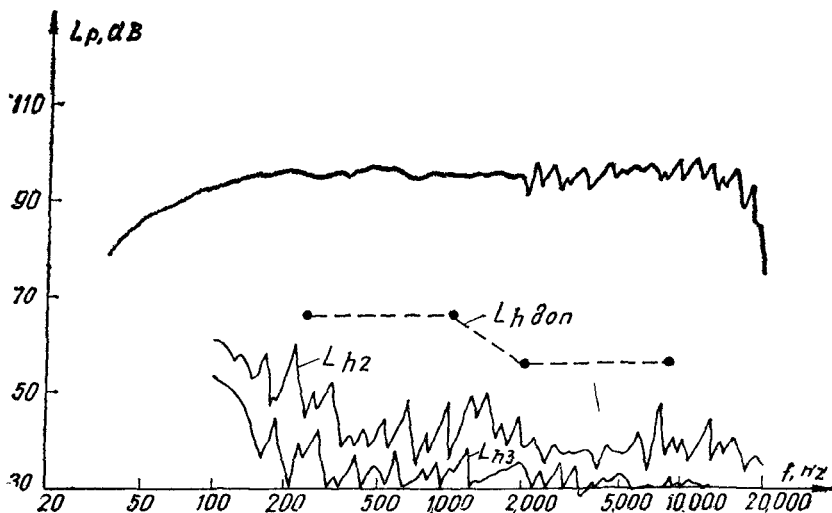
На фиг. 4.40 е дадена конструкцията на кутията за озвучително тяло 2OT20-3. Пред високоговорителите се поставят индивидуални пръстени с метални решетки вместо обща решетка от плат. Може да се използват същите елементи както за OTС1-03. На фиг. 4.41 са дадени честотните характеристики на озвучителното тяло, снети при условията за измерване на коефициента на хармониците за озвучителни тела от Hi-Fi клас.

Двуленково озвучително тяло тип 20Т40-3.

Озвучително тяло с по-голяма паспортна мощност и неголям обем може да се получи, като се използва следната комбинация от високоговорители :



Фиг. 4.40



Фиг. 4.41

нискоchetотен — 2 броя от тип ВКНО822, с номинален импеданс 4Ω ;

високоchetотен — 2 броя от тип ВКВ2521, с номинален импеданс 4Ω .

Електрическо проектиране. Еднотипните високоговорители се свързват последователно и се получава еквивалентен номинален импеданс 8Ω . Електрическата схема на разделителния филтър и свързването на високоговорителите е както на фиг. 4.28.

Избор на разделителна честота. Озвучителното тяло е изградено от по два еднакви високоговорителя, за да се увеличи паспортната му мощност. Изборът на разделителна честота трябва да се подчини на същото съображение. По принцип нискоchetотните високоговорители издържат по-големи краткотрайни претоварвания. Приемането на по-висока разделителна честота ще постави високоchetотните високоговорители в по-благоприятен термичен и механичен режим. Затова се приема $f_p = 4000 \text{ Hz}$.

Изчисляване на елементите на филтърта. Товарът на филтровите звена е равен на удвоената стойност на номиналния импеданс на всеки от използваните високоговорители $Z_T = R_T = 2Z_{ном} = 8 \Omega$. Изчисленията се провеждат за получаване на максимално плоски характеристики на филтровите звена.

$$C_1 = C_2 = 3,5 \mu\text{F},$$

$$L_1 = L_2 = 0,45 \text{ mH}.$$

След настройка на филтърта при реални условия се получава:

$$C_1 = 5,0 \mu\text{F}; C_2 = 3,0 \mu\text{F}; L_1 = 0,51 \text{ mH}; L_2 = 0,35 \text{ mH}.$$

Капацитетът $5 \mu\text{F}$ може да се получи от паралелното свързване на два кондензатора — $C'_1 = 4 \mu\text{F}$, тип МБГП-2 и $C''_1 = 1 \mu\text{F}$, тип КМПТ-96, а капацитетът $3 \mu\text{F}$ — от паралелното свързване на два кондензатора от типа КМПТ-96 с капацитетата $C'_2 = 2 \mu\text{F}$ и $C''_2 = 1 \mu\text{F}$.

Броят на навивките на бобините за получаване на изчислената индуктивност се определя от табл. 2.1: $n_1 = 101$ нав. и $n_2 = 80$ нав.

Акустично проектиране. Приема се акустичната система да бъде озвучително тяло със затворен обем $V = 20 \text{ dm}^3$. За изчисленията се пренебрегва влиянието между двата нискоchetотни високоговорители — все едно, че всеки от тях функционира в собствен обем $V_1 = 10 \text{ dm}^3$. В резултат на взаимодействието възпроизвеждането на ниските честоти се подобрява, но подобренето ще остане като резерв. Ако съществува опасност от влошаване на параметрите вследствие на резултат от взаимодействие

то, обемът може да се прегради на две. Изчисленията се провеждат както при озвучително тяло с един нискофреkwотен високоговорител.

Определя се коефициентът $\alpha = 0,62$.

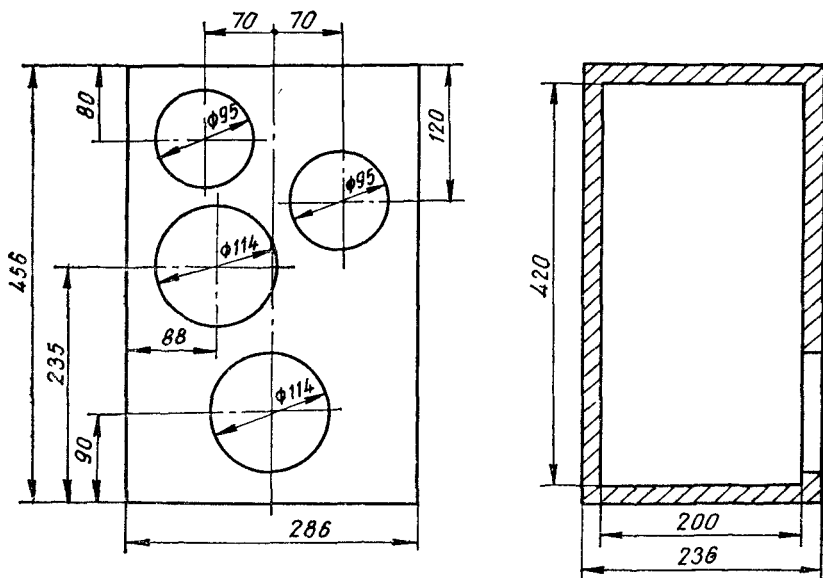
Определя се резонансната честота на озвучителното тяло $f_0 = 75$ Hz.

Определя се електрическият качествен фактор $Q_e = 0,63$.

Определя се пълният качествен фактор $Q_T = 0,52$.

Определят се честотите $f_3 = 110$ Hz и $f_6 = 72$ Hz.

Честотата на срязване f_3 и честотата f_6 са сравнително високи. Това се дължи на малката стойност на качествения фактор, поради което честотната характеристика на озвучителното тяло не е максимално плоска, а нивото ѝ е значително по-ниско от това на максимално плоската характеристика. За коригиране на честотната характеристика е необходимо да се увеличи качественият



Фиг. 4.42

фактор на озвучителното тяло. Това може да се осъществи чрез увеличаване на изходното съпротивление на усилвателя, но е свързано със загуба на електрическа енергия. За предпочитане е да се коригира механичната конструкция на самия високоговорител,

например да се използва по-слабо импрегниран плат за гънките за качване на трептящата система.

Ако системата се регулира така, че $Q_T=0,707$, без да се изменят останалите параметри, ще се получи

$$f_3=75 \text{ Hz, а } f_6=58 \text{ Hz.}$$

Този резултат вече е задоволителен.

Номиналният честотен обхват на озвучителното тяло е от 50 до 18 000 Hz при неравномерност на честотната характеристика не повече от 12 dB. Паспортната му мощност е 40 W, но поради високата разделителна честота и по-големите възможности за натоварване на високоговорителите ВКН0822 озвучителното тяло може да се комплектува към усилватели с номинална изходна мощност до 60 W. Диаграмата на насоченост и коефициентът на хармонични изкривявания отговарят на изискванията за Hi-Fi клас. Характеристичната му чувствителност е не по-малка от $0,7 \text{ Pa W}^{-0,5}$.

На фиг.4.42 е показана конструкцията на кутията за изчисленото озвучително тяло. За декоративни елементи пред високоговорителите трябва да се използват същите, които се използват и при озвучително тяло 2OT20-1. Всички лицеви повърхности трябва да се фурнироват и обработят. В обема трябва да се постави около 100 g звукопоглъщащ материал.

На фиг. 4.43 са дадени честотните характеристики на озвучителното тяло и хармониците, снети при условията за измерване коефициента на хармонични изкривявания на озвучителни тела от Hi-Fi клас.

Двуленгово озвучително тяло тип 2OT40-4. Принципно то е идентично на 2OT10-3 — разликата е в това, че номиналният му входен импеданс е 4 Ω . Изградено е от два броя паралелно свързани височестотни високоговорители тип ВКН0832 с номинален импеданс 8 Ω и два броя паралелно свързани височестотни високоговорители тип ВКВ2531 с номинален импеданс 8 Ω . Електрическата схема на филтъра и свързането на високоговорителите е дадено на фиг. 4.44. Необходимо е само да се изчислят елементите на филтъра за същата разделителна честота, като се вземе предвид, че $Z_T=R_T=\frac{Z_{\text{ном}}}{2}=4 \Omega$.

$$C_1=C_2=7 \mu \text{ F, } L_1=L_2=0,90 \text{ mH.}$$

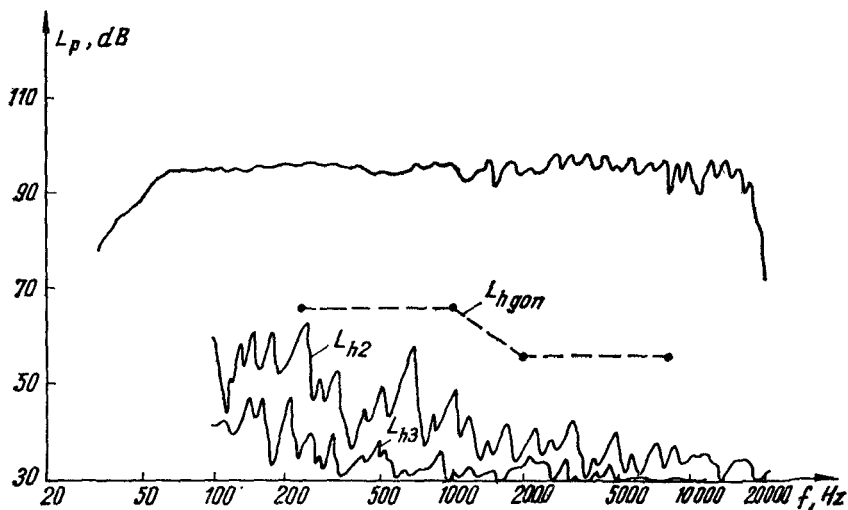
След практическа настройка на филтъра при реален товар се получава

$$C_1=10 \mu \text{ F, } C_2=6 \mu \text{ F, } L_1=0,95 \text{ mH, } L_2=0,48 \text{ mH.}$$

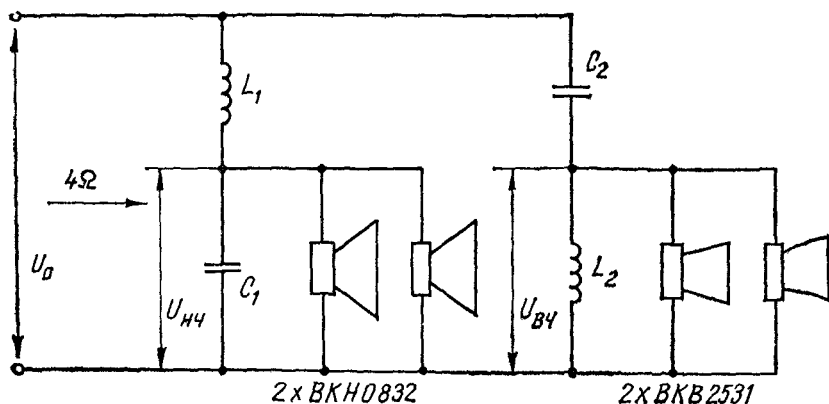
Всички параметри и показатели на 2OT40-4 ще бъдат еднакви с тези на 2OT40-3

Двулентово озвучително тяло тип 2OT40-5.

Независимо от сравнително големите си размери нискочестотният високоговорител тип ВКН1221 е много подходящ за създаване на висококачествени озвучителни тела, в това число и дву-



Фиг- 4 43



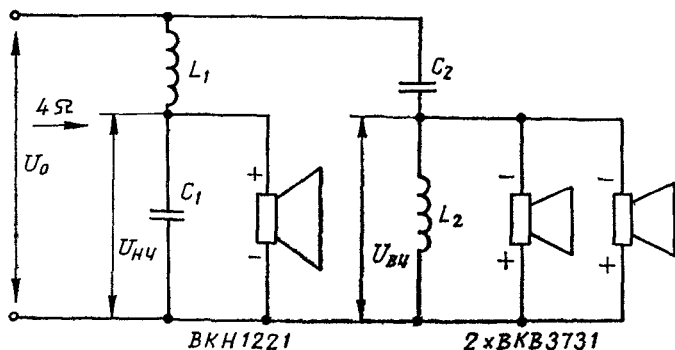
Фиг. 4.44

лентови. Необходимо е да се комплектува с подходящи високочестотни високоговорители. Една сполучлива комбинация може да се създаде, като се използва един високоговорител тип ВКН1221 и два високоговорителя тип ВКВ3731. Необходимите данни за високоговорителите са дадени в първа глава. В системата е прието да се използват два броя високочестотни високоговорители, за да може да се създаде озвучително тяло с паспортна мощност 40 W. Освен това двата типа високоговорители имат различна чувствителност — нивото на характеристичната чувствителност на ВКВ3731 е с около 3 dB по-ниско от това на ВКН1221. С използването на два броя ВКВ3731 общото ниво, което създават, ще бъде с 3 dB по-високо от това на единия и точно ще се изравни с нивото, създавано от ВКН1221.

Как трябва да се свържат високоговорителите?

Нискочестотният високоговорител е с номинален импеданс $4\ \Omega$ и той ще определи номиналния импеданс на озвучителното тяло — $4\ \Omega$. Следователно двата високочестотни високоговорителя ще се свържат паралелно. Двете филтрови звена ще бъдат от втори ред. Схемата на филтъра и свързването на високоговорителите е дадено на фиг. 4.45.

Избор на разделителна честота. Нискочестотният високого-



Фиг. 4.45

ворител е със сравнително големи размери, поради което започва да излъчва насочено при по-ниски честоти. Затова не е желателно разделителната честота да бъде по-висока от 3000 Hz. Долната гранична честота на високочестотните високоговорители е

1500 Hz, но не е желателно разделителната честота да бъде по-ниска от 2000 Hz. Приема се средната стойност $f_p = 2500$ Hz.

Изчисляване на елементите на филтъра. Товарът на ниско-честотното звено се приема равен на номиналния импеданс на високоговорителя $Z_{T1} = R_T = 4 \Omega$. Товарът на високо-честотното звено е равен на половината от номиналния импеданс на ВКВ3731, т. е. $Z_{T2} = -\frac{Z_{ном}}{2} = 4 \Omega$. Елементите се изчисляват от условията за получаване на максимално плоски характеристики и за двете звена:

$$C_1 = C_2 = 11,2 \mu F,$$

$$L_1 = L_2 = 0,36 \text{ mH}.$$

След настройване на филтъра при реални за неговото функциониране условия се използва

$$C_1 = 16 \mu F, C_2 = 8 \mu F, L_1 = 0,56 \text{ mH}, L_2 = 0,32 \text{ mH}.$$

Капацитетът $16 \mu F$ може да се получи от паралелното свързване на един кондензатор с капацитет $15 \mu F$, тип МБГП-2 и един кондензатор с капацитет $1 \mu F$ тип КМПТ-96. Капацитет $8 \mu F$ може да се получи от паралелното свързване на два кондензатора с капацитет $4 \mu F$ тип МБГП-2.

Броят на навивките за бобините се определя от таблица 2.1, като се приема, че ще се изработят от меден проводник с диаметър 1 mm : $n_1 = 106$ нав; $n_2 = 77$ нав.

Акустично проектиране. Избира се акустична система на озвучително тяло със затворен обем. Акустичната гъвкавост на високоговорителя тип ВКН1221 е голяма, т. е. еквивалентният обем, съответстващ на гъвкавостта на окачване е много голям — $V_c = 380 \text{ dm}^3$. За озвучителното тяло трябва да се приеме също голям обем, но е явно, че не може да се приеме съизмерим с обема V_c . Приема се $V = 60 \text{ dm}^3$. Параметрите на озвучителното тяло се определят в следния ред:

Определя се коефициентът $\alpha = 6,3$.

Определя се резонансната честота на озвучителното тяло $f_0 = 67,5 \text{ Hz}$.

Определя се електрическият качествен фактор $Q_e = 1,22$.

Пълният качествен фактор на озвучителното тяло е $Q_T = 0,81$.

При тези стойности на пълния качествен фактор честотната характеристика на озвучителното тяло няма да бъде максимално плоска, като нивото ѝ ще бъде по-високо от това на максимално плоската характеристика. За определена честота f_{max} характеристиката ще получи максимум.

Определят се честотите $f_s = 60 \text{ Hz}$ и $f_6 = 48 \text{ Hz}$.

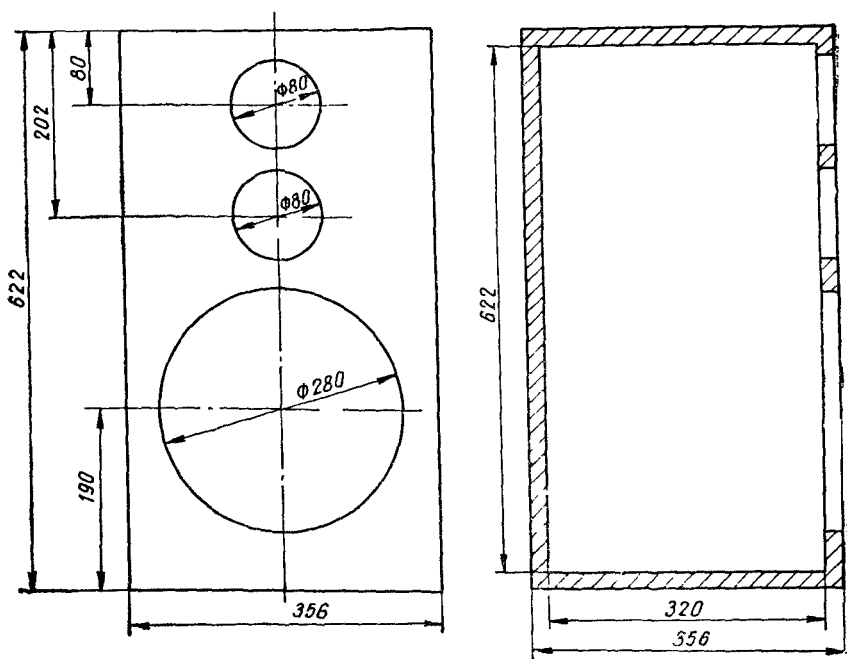
Честотата на срязване f_3 и честотата f_6 са по-ниски от резонансната честота на озвучителното тяло. Това се дължи на голямата стойност на пълния качествен фактор — $Q_T > 0,707$.

Определя се честотата, за която честотната характеристика на озвучителното тяло получава максимум $x_{max} = 2,08$, а $f_{max} = 140$ Hz.

Нивото на характеристиката за x_{max} се определя от зависимостта (3.28 в) — $L_{max} = 0,35$ dB.

Нивото на максимума над средното ниво е пренебрежимо малко спрямо нивото на максимално плоска характеристика за същата честота 140 Hz — нивото L_{max} е само с 0,6 dB по-високо.

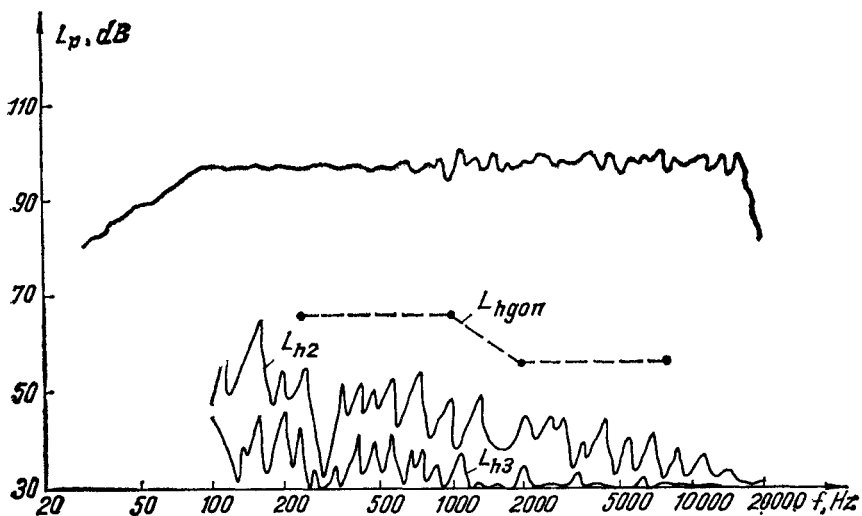
Номиналният честотен обхват на озвучителното тяло тип 20Т40-5 при обща неравномерност на честотната му характеристика



Фиг. 4.46

12 dB, е от 45 — 50 Hz до 18 kHz. Коэффициентът на хармонични изкривявания и диаграмата на насоченост отговарят на изискванията за Hi-Fi клас. Характеристичната му чувствителност е по-голяма от $0,8 \text{ Pa W}^{-0,5}$ (нивото ѝ е по-високо от 92 dB). Не-

зависимо от това, че паспортната му мощност е 40 W, озвучителното тяло 2OT40-5 може да се комплектува към усилватели с номинална изходна мощност до 60 W—и двата типа използувани високоговорители понасят значителни краткотрайни претоварвания.



Фиг. 4.47

На фиг 4.46 е дадена конструкцията на кутията за озвучителното тяло. Препоръчва се пред високоговорителите да се поставят индивидуални решетки с пръстени вместо обща решетка с ялат.

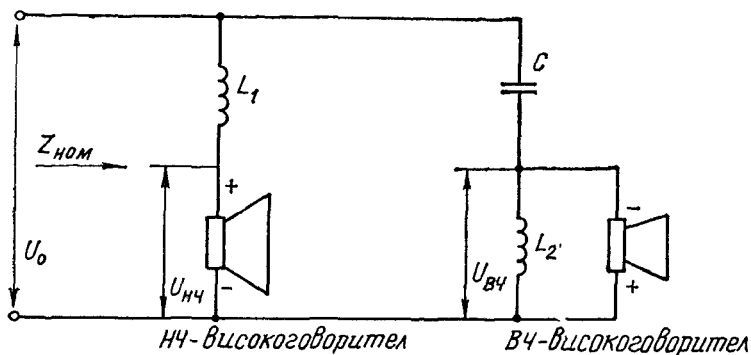
На фиг. 4.47 са дадени честотната характеристика на озвучителното тяло и характеристиките на хармониците, снети при условията за измерване коефициента на хармониците на озвучителни тела от Hi-Fi клас.

4.6. ДВУЛЕНТОВИ ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА С РАЗДЕЛИТЕЛЕН ФИЛТЪР ОТ РАЗЛИЧЕН РЕД

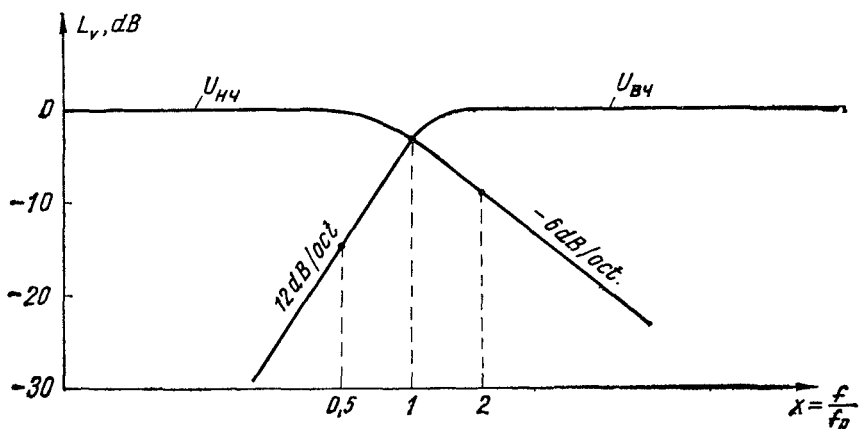
Нискочестотното и високочестотното звено на разделителен филтър за двулентово озвучително тяло може да бъдат от един и същи ред, но може да бъдат и от различен ред. Обикновено

нискочестотното звено на филтъра е от по-нисък ред, като разликата е един ред.

Принципната схема на двулентово озвучително тяло с разделителен филтър от първи-втори ред е дадена на фиг. 4.48, а



Фиг. 4.48

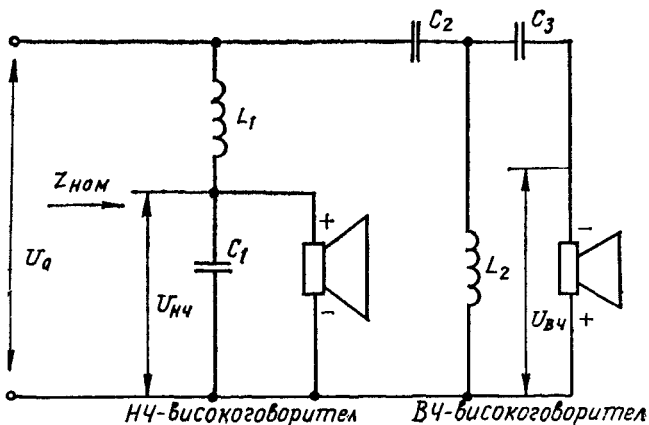


Фиг. 4.49

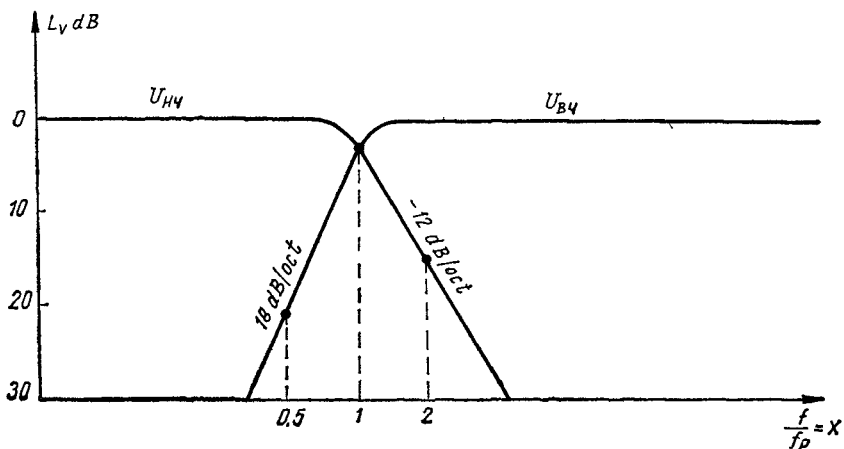
на фиг. 4.49 — честотните характеристики на изходните напрежения.

При анализа на разделителните филтри бе установено, че при разделителната честота изходното напрежение на нискочестотен филтър от първи ред е дефазизирано спрямо входното на -45° , а

изходното напрежение на високочестотен филтър отвърти ред— на 90° . Ако двата високоговорителя се свържат синфазно към филтъра, входните им напрежения ще бъдат дефазирани едно спрямо друго на 135° , а ако бъдат свързани противофазно—на 45° . Затова на схемата от фиг. 4.48 е показано, че двата високоговорителя са свързани противофазно.



Фиг. 4.50



Фиг. 4.51

На фиг. 4.50 е показана принципната схема на разделителен филтър от втори-трети ред, а на фиг. 4.51 — честотните характеристики на изходните напрежения. При противофазно свързани високоговорителите фазовата разлика между входните им напрежения е по-малка, отколкото при синфазно свързване.

Двулентово озвучително тяло тип 20Т20-4

За реализирането му ще се използва комбинация от следните високоговорители: нискочестотен тип ВКН0932 и високочестотен тип ВКВ2531. Двата високоговорителя са с еднаква паспортна мощност 20 W и имат приблизително еднаква чувствителност.

Електрическо проектиране. Избира се разделителен филтър от първи-втори ред, чиято схема е дадена на фиг. 4.48

Избор на разделителни честоти. Малките размери на нискочестотния високоговорител позволяват да се избере по-висока разделителна честота — до 4—4,5 kHz. Използването на филтър от втори ред за високочестотния високоговорител дава възможност да се избере по-ниска разделителна честота — до 2—2,5 kHz. Поради малката стръмност на затихване в областта на непропускане на нискочестотното звено на филтъра се препоръчва да се избера близки, но различни разделителни честоти за двете звена на филтъра. Приема се разделителната честота на нискочестотното звено да бъде $f_{p1}=3200$ Hz, а на високочестотното звено — $f_{p2}=3600$ Hz.

Определяне елементите на филтър. Индуктивността L_1 се определя от (2.13), а индуктивността L_2 и капацитетът на кондензатора C — от (2.77) и (2.78). Приема се, че филтърът е наварен с номиналните импеданси на високоговорителите, т. е. $R_T=8 \Omega$ и за двете звена.

$$L_1=0,396 \text{ mH}, \quad L_2=0,5 \text{ mH}, \quad C=3,9 \mu\text{F}.$$

След реализиране на филтъра елементите му са уточнени, както следва: $L_1=0,68$ mH; $L_2=0,52$ mH; $C=3,3 \mu\text{F}$.

Броят на навивките на бобините за получаване на изчислените индуктивности, определени съгласно таблица 2.1, е $n_1=118$ нав, $n_2=102$ нав.

Акустично проектиране. Приема се акустичната система да бъде озвучително тяло с фазоинвертор. Приема се също, че озвучителното тяло ще се захранва от усилвател с $R_i=0$, при което $Q_T=Q_{Tp}=0,523$. Изчисленията ще се проведат по такъв ред, че да се получат оптимални параметри за озвучителното тяло при запазване на качествения фактор. Приема се, че загубите опреде-

лят $Q_v = Q_L = 5$, при което изчисленията ще се проведат с мощта на графиките от фиг. 3.15. За $Q_T = 0,523$ се отчита: $\alpha = 0,38$, $x_3 = 0,70$, $h = 0,80$.

Обемът на озвучителното тяло трябва да бъде $V = 48 \text{ dm}^3$.

Фазоинверторът трябва да се реализира с $f_\phi = 40 \text{ Hz}$.

Честотата $f_3 = 35 \text{ Hz}$.

Получи се много ниска честота на среза, т. е. долната гранична честота на озвучителното тяло ще бъде около 30 Hz . Тъй като $Q_T > 0,414$, честотната характеристика на озвучителното тяло ще съответствува на равновълнова характеристика на филтър на Чебишев от четвърти ред. Затова f_3 се получи по-ниска от резонансната честота на високоговорителя. Озвучителното тяло ще възпроизвежда много добре сигналите с ниска честота, но за сметка на значително голям обем в сравнение с малките размери на високоговорителя.

Независимо от големия обем, ако озвучителното тяло се оформи със затворен обем $V = 48 \text{ dm}^3$, ще се получи $f_3 \approx 60 \text{ Hz}$ и $f_6 \approx 45 \text{ Hz}$, т. е. значително по-висока от f_3 при фазоинвертор. Ефектът от оптимално проектиран фазоинвертор е значителен.

Фазоинверторът ще бъде оформен, като се използва пластмасова тръба. Определя се отношението от дължината и сечението

$$\text{то } \frac{l_\phi}{S_\phi} = 40,6.$$

Избира се тръба с вътрешен диаметър $D_\phi = 60 \text{ mm}$ и за дължината на тръбата се получава $l_\phi = 115 \text{ mm}$.

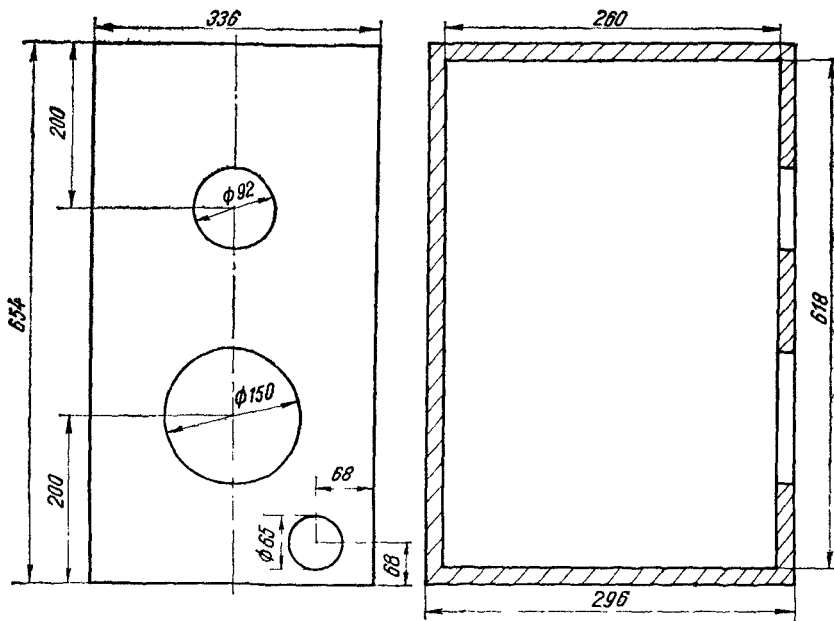
Основните показатели на изчисленото озвучително тяло са: номинален импеданс 8Ω ; паспортна мощност 20 W ; номинален честотен обхват от 30 до $18\,000 \text{ Hz}$ при неравномерност на честотната характеристика не повече от 12 dB ; чувствителност, не по-малка от $0,4 \text{ Pa W}^{-0,5}$; коефициент на хармонични изкривявания и диаграма на насоченост — в съответствие с изисканията за Hi-Fi клас. Като цяло озвучителното тяло е от Hi-Fi клас.

На фиг. 4.52 е дадена конструкцията на кутията за озвучително тяло 20T20-4. Декоративните елементи пред високоговорителите трябва да бъдат пръстен и решетка. Поради големите размери озвучителното тяло трябва да се изработва от плочи от дървесни частици с дебелина 18 mm . В обема му трябва да се постави около 200 g звукопоглъщащ материал.

Двуленгово озвучително тяло тип 20T40-6. За реализирането му ще се използват високоговорителите: нискочестотен тип ВКН1031 и високочестотен тип ВЛД408. Реалните чувствителности на двата високоговорителя са приблизително еднакви — $90 - 92 \text{ dB}$ при мощност 1 W на разстояние 1 m , имат еднаква

паспортна мощност — 40 W и номиналните им импеданси са 8 Ω.

Избор на разделителна честота. С цел да се намали опасността от претоварване на високочестотния високоговорител се избира $f_p = 3500$ Hz. Нискочестотното звено на филтъра ще бъде



Фиг. 4.52

от втори ред, а високочестотното—от трети ред съгласно със схемата от фиг. 4.50.

Определяне елементите на филтъра. Изчисляват се от зависимостите (2.57), (2.58) и (2.88): за товар на филтровите звена се приема номиналният импеданс на съответния високоговорител, т. е. $Z_{T1} = Z_{T2} = R_T = 8 \Omega$. Приема се $m = 0,5$ и се определя $C_1 = 4 \mu F$, $L_1 = 0,52$ mH, $C_2 = 3,75 \mu F$, $C_3 = 5,6 \mu F$, $L_2 = 0,182$ mH.

След реализацията на филтъра елементите му бяха уточнени на следните стойности: $C_1 = 4 \mu F$; $L_1 = 0,7$ mH; $C_2 = 3,3 \mu F$; $C_3 = 5 \mu F$; $L_2 = 0,31$ mH.

Броят на навивките на bobините се определя от таблица 2.1: $n_1 = 120$ нав, $n_2 = 74$ нав.

Акустично проектиране. Озвучителното тяло може да се изпълни в едно от изчислените акустични решения с високоговори-

тел ВКН1031—ОТС1-02, 20Т40-1 или 20Т40-2. Тук обаче ще се извършат изчисления за един вариант на високоговорителя тип ВКН1031, който е реализиран с друго окачване. Параметрите на този високоговорител са: резонансна честота $f_p = 30$ Hz; динамична трептяща маса $m_m = 22$ g; еквивалентна звукоизлъчваща повърхност $S = 1,76 \cdot 10^{-2}$ m²; гъвкавост на окачване $c_m = 1,27 \cdot 10^{-3}$ mN⁻¹; обем, съответстващ на гъвкавостта на окачване, $V_c = 55$ dm³ и качествени фактори $Q_{mp} = 2,2$; $Q_{ep} = 0,4$; $Q_{rp} = 0,338$. Приема се акустична система озвучително тяло с фазоинвертор. Параметрите на озвучителното тяло да се определят така, че честотната му характеристика да съответствува на максимално плоска характеристика на филтъра на Батърворт от четвърти ред. Приема се, че загубите в озвучителното тяло определят $Q_v = Q_T = 5$. При тези условия за изчисленията се използва графиките от фиг. 3.15. Отчита се, че за получаване на максимално плоска характеристика на Батърворт от четвърти ред е необходимо $Q_T = 0,414$, т. е. $Q_T > Q_{rp}$. Следователно озвучителното тяло трябва да се захранва от усилвател с изходно съпротивление $R_i > 0$. Необходимият качествен фактор е $Q_e = 0,5$. За получаване на този качествен фактор изходното съпротивление на усилвателя трябва да бъде $R_i = 1,76 \Omega$.

За $Q_T = 0,414$ от фиг. 3.15 се отчита $\alpha = 0,90$; $x_s = 1$; $h = 1$.

Обемът на озвучителното тяло трябва да бъде $V = 61$ dm³.

Честотата на сръза на озвучителното тяло ще бъде равна на резонансната честота на нискофреkwентния високоговорител $f_s = 30$ Hz.

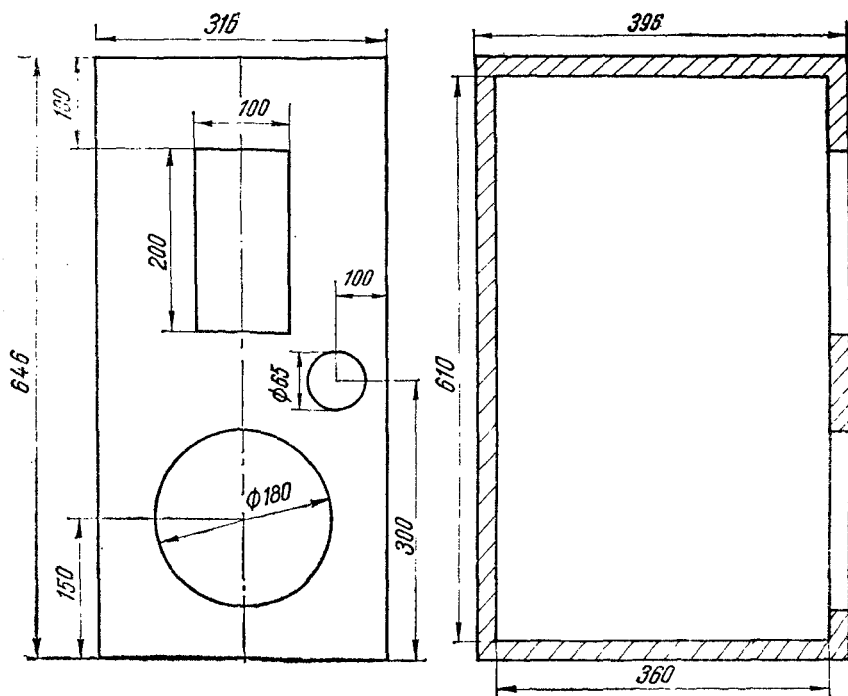
Резонансната честота на фазоинвертора също е равна на резонансната честота на високоговорителя $f_\phi = 30$ Hz.

За определяне конструктивните размери на фазоинверсия отвор се използва зависимостта (4.2) — $\frac{l_\phi}{S_\phi} = 56$. Приема се тръба с вътрешен диаметър $D_\phi = 60$ mm и се определя $l_\phi = 180$ mm.

Основните показатели на изчисленото озвучително тяло са: номинален импеданс 8Ω ; паспортна мощност 40 W; ефективен честотен обхват — от 28 до 32000 Hz, при неравномерност на честотната характеристика не повече от 12 dB; чувствителност, не по-малка от $0,7$ Pa W^{-0,5}; диаграмата на насоченост и коефициентът на хармонични изкривявания отговарят на изискванията за Hi-Fi клас. Вижда се, че всички показатели на 20Т40-6 са по-високи от изискваните за озвучителни тела от Hi-Fi клас. Затова то може да се причисли към супер Hi-Fi клас.

Конструкцията на кутията е дадена на фиг. 4.53. В обема на

озвучителното тяло трябва да се постави около 200 g звукопоглещаш материал. Подходящ материал за кутията е плочи от дървесни частици с дебелина 18 mm. Може да се използват и по-дебели плочи, но по-тънки не се препоръчват.



Фиг. 4.53

Двулентово озвучително тяло тип 20Т40-7. За реализирането му се използват следните типове високоговорители: нискофреотен тип ВКН1221 и високочестотен тип ВЛД404. Двата високоговорителя са с номинален импеданс 4 Ω , паспортна мощност 40 W и чувствителност с ниво 92 — 93 dB. Високите им качествени показатели са предпоставка за създаване на озвучително тяло от висок клас.

Електрическо проектиране. Избира се разделителен филтър от втори-трети ред съгласно със схемата от фиг. 4.50. При избора се има предвид, че лентовият високочестотен високоговорител не издържа въздействието на сигнали с ниска честота и е необходи-

мо затихването им да се осъществи с голяма стръмност. Ниско-честотният високоговорител може да функционира нормално и с филтър от първи ред, но се използва филтър от втори ред, за да се стесни обхватът, в който излъчват и двата високоговорителя.

Избор на разделителна честота. Приема се $f_p = 3500$ Hz, за да се предпази високочестотният високоговорител от евентуални претоварвания от сигнали с ниска честота. Не съществува опасност от насочено излъчване на нискочестотния високоговорител, което да е недопустимо за озвучителни тела от Hi-Fi клас.

Определяне елементите на филтъра. Приема се, че филтровите звена са натоварени с активни съпротивления, чиято големина е равна на номиналните импеданси на високоговорителите — $Z_{T1} = Z_{T2} = R_T = 4 \Omega$. Приема се $m = 0,5$. Използват се зависимостите (2.57), (2.58) и (2.88).

$$C_1 = 8 \mu\text{F}; \quad L_1 = 0,26 \text{ mH}; \quad C_2 = 7,5 \mu\text{F}; \quad C_3 = 11,2 \mu\text{F}, \quad L_2 = 0,092 \text{ mH}.$$

При реализиране на филтъра и използване за товар на съответните високоговорители за елементите на филтъра се получава: $C_1 = 10 \mu\text{F}$; $L_1 = 0,42 \text{ mH}$; $C_2 = 6 \mu\text{F}$; $C_3 = 15 \mu\text{F}$; $L_2 = 0,11 \text{ mH}$.

Конструктивно обобините се изпълняват от меден проводник с диаметър 1 mm. Броят на навивките им се определя от таблица 2.1: $n_1 = 90$ нав, $n_2 = 40$ нав.

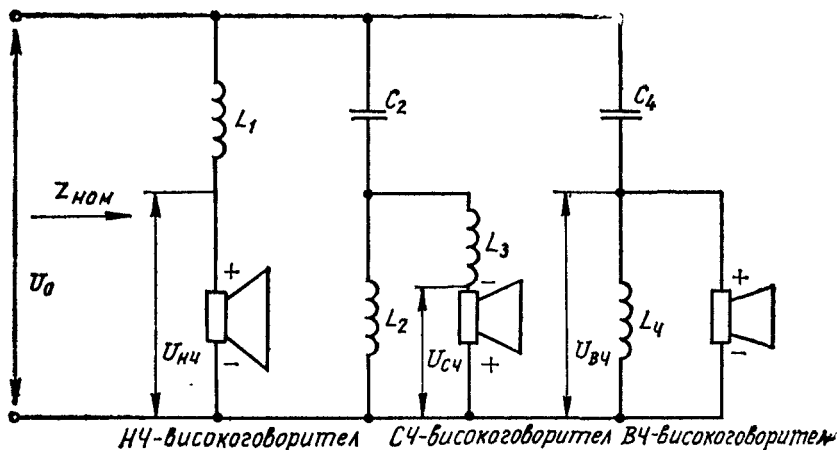
Акустично проектиране. Посочено бе, че е за предпочитане високоговорителят тип ВКН1221 да функционира в озвучително тяло със затворен обем, тъй като получаването на оптимална честотна характеристика в озвучително тяло с фазоинвертор е свързано с много голям обем на озвучителното тяло или с много нисък качествен фактор на високоговорителя. Затова за озвучителното тяло 20Т40-7 се приема затворен обем $V = 60 \text{ dm}^3$, съвпадащ с обема на озвучително тяло 20Т40-5. При тези условия параметрите и показателите на 20Т40 7 и на 20Т40-5 ще бъдат еднакви, с изключение на ефективния честотен обхват на възпроизвеждане, който при 20Т40-7 е до 32 kHz.

4.7. ТРИЛЕНТОВИ ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА С РАЗДЕЛИТЕЛНИ ФИЛТРИ ОТ ПЪРВИ, ВТОРИ И ТРЕТИ РЕД

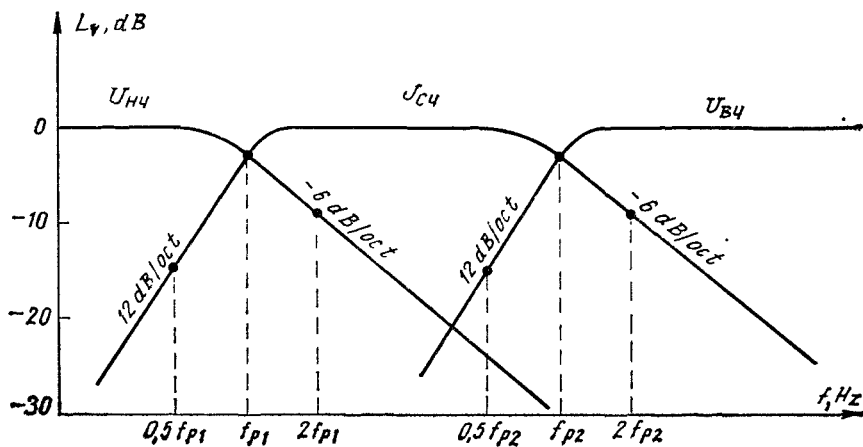
С трилентовите озвучителни тела, както бе посочено, се подобрява качеството на възпроизвежданата звукова картина. Разделянето на звуковия спектър на три подобхвата се осъществява с разделителни филтри, като отделните филтрови звена може да

бъдат от един и същи или от различен ред. Обикновено ниско-
 честотните звена са от по-нисък ред.

На фиг. 4.54 е дадена принципната схема на разделителен
 филтър за трилентно озвучително тяло. Индуктивността L_1 об-
 разува с нискочестотния високоговорител нискочестотен филтър

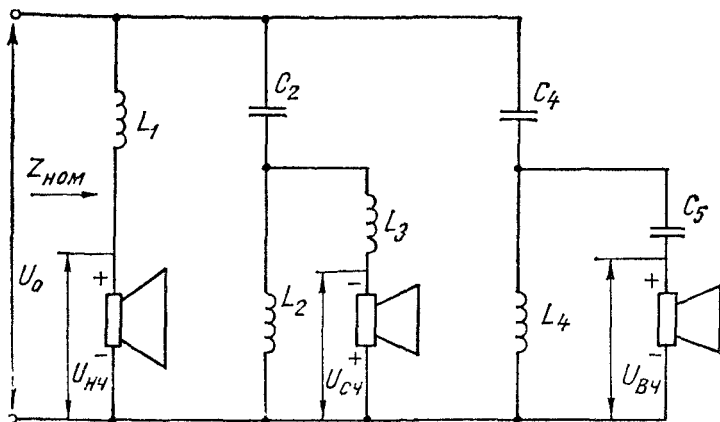


Фиг. 4.54



Фиг. 4.55

от първи ред, който ограничава постъпването към входа на ниско-
 честотния високоговорител на сигнали с честота, по висока от раз-
 делителната честота f_{p1} . Индуктивността L_2 , кондензаторът C_2 и
 средночестотният високоговорител образуват високочестотен фил-
 тър от втори ред, който ограничава постъпването на сигнали с
 честота, по-ниска от f_{p1} , към входа на средночестотния високого-
 ворител. Индуктивността L_3 и средночестотният високоговорител
 образуват нискочестотен филтър от първи ред, който ограничава
 постъпването към входа на средночестотния високоговорител на
 сигнали с честота, по-висока от втората разделителна честота f_{p2} .
 Индуктивността L_4 , кондензаторът C_4 и високочестотният висо-
 коговорител образуват високочестотен филтър от втори ред, кой-
 то ограничава постъпването към входа на високочестотния висо-
 коговорител на сигнали с честота, по-ниска от f_{p2} . На фиг. 4.55
 са дадени честотните характеристики на напреженията, подавани
 към съответните високоговорители. С $L_{HЧ}$ е означено нивото на
 напрежението на входа на нискочестотния високоговорител спря-
 мо напрежението на входа на филтъра, с $L_{CЧ}$ — на средночестот-
 ния и с $L_{BЧ}$ — на високочестотния. От направения анализ за фазо-

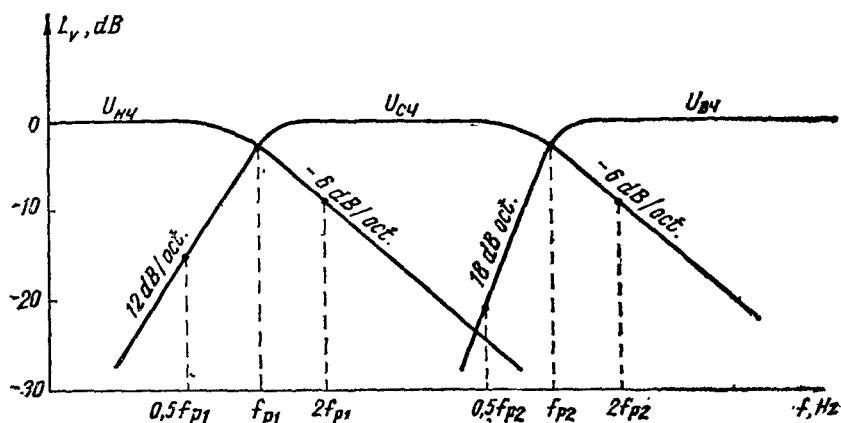


Фиг. 4.56

вите разлики между изходните и входните напрежения на съответни-
 те филтрови звена се установява, че приблизително синфазно излъч-
 ване в областта на разделителните честоти може да се получи, ако нис-
 кочестотният и високочестотният високоговорител се свържат син-

фазно, а средночестотният — противофазно за тях. На фиг. 4.54 е означен поляритетът на свързване на съответните високоговорители.

На фиг. 4.56 е дадена принципната схема на разделителен



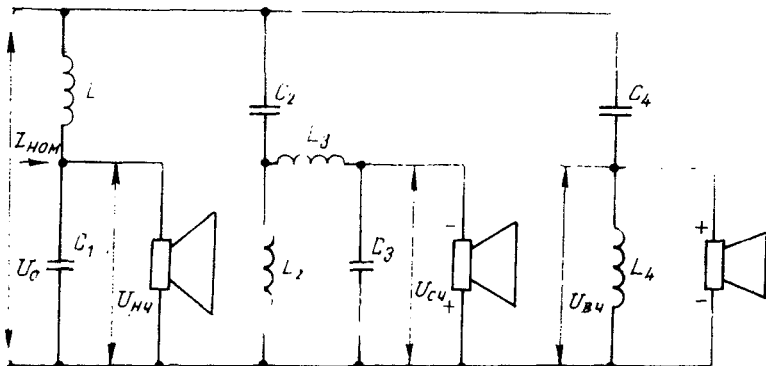
Фиг. 4.57

филтър за трилентово озвучително тяло, в който нискочестотното и средночестотното филтрово звено са идентични с тези на филтъра от фиг. 4.54. Кондензаторите C_4 и C_5 , индуктивността L_4 и високочестотният високоговорител образуват високочестотен филтър от трети ред с разделителна честота f_{p2} . На фиг. 4.57 са дадени честотните характеристики на напреженията, подавани към съответните високоговорители. За получаване на приблизително синфазно излъчване в областта на разделителните честоти средночестотният високоговорител трябва да се свърже противофазно спрямо останалите два.

На фиг. 4.58 е дадена принципната схема на разделителен филтър за трилентово озвучително тяло, в който индуктивността L_1 , кондензаторът C_1 и нискочестотният високоговорител образуват филтър от втори ред с разделителна честота f_{p1} , а индуктивността L_3 , кондензаторът C_3 и средночестотният високоговорител образуват нискочестотен филтър от втори ред с разделителна честота f_{p2} . Останалите две филтрови звена са идентични със съответните им звена от филтъра, даден на фиг. 4.54. На схемата е означен поляритетът на свързване на високоговорителите за избягване противофазното им излъчване в областта на разделителните честоти. На фиг. 4.59 са дадени честотните характе-

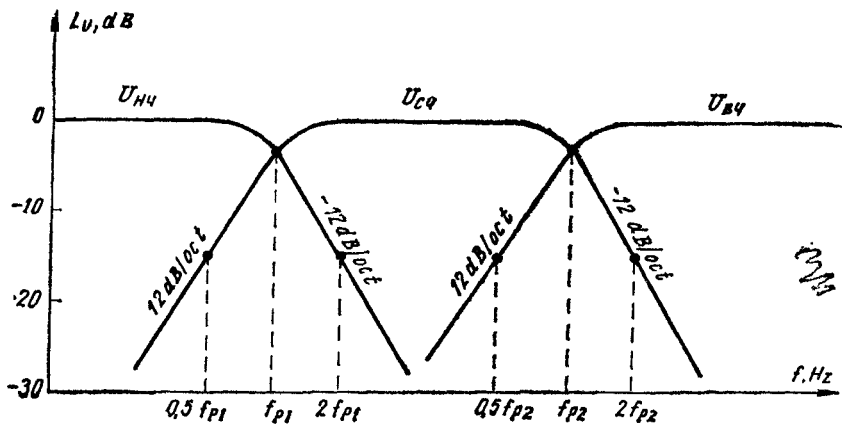
ристики на напреженията, действащи на входните клеми на съответните високоговорители.

Даденият на фиг. 4.60 разделителен филтър за трилентово озвучително тяло е идентичен с филтъра от фиг. 4.58, с изключение на високочестотното звено C_4, C_5, L_4 — високочестотен високоговорител, което е филтър от трети ред. На схемата е означен



УНЧ високоговорител, УСЧ-високоговорител, ВЧ-високоговорител

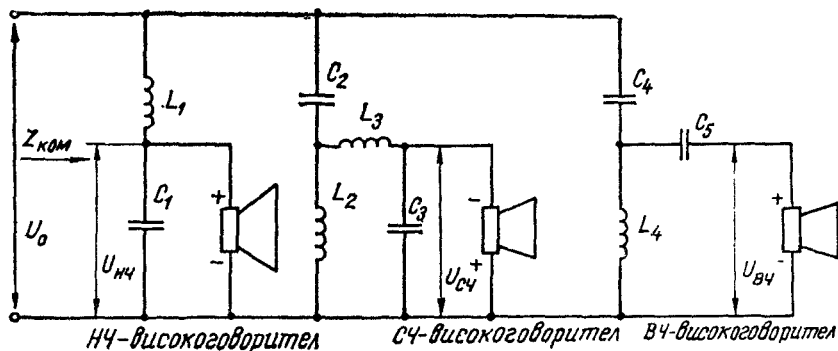
Фиг. 4.58



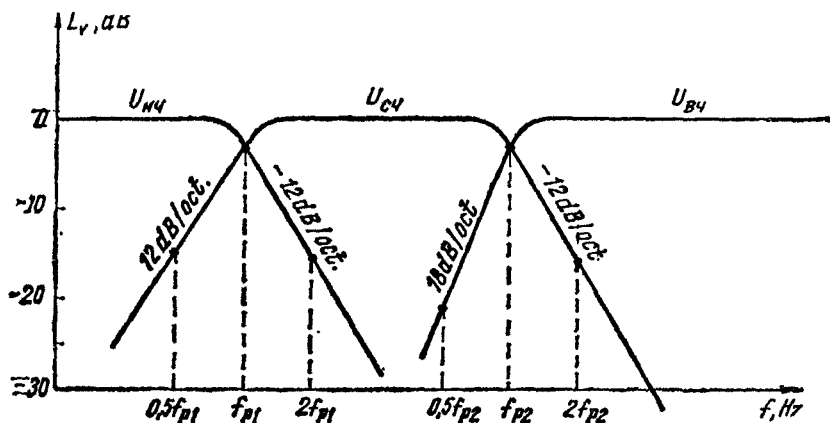
Фиг. 4.59

поляритетът на свързване на високоговорителите. На фиг. 4.61 са дадени честотните характеристики на напреженията, които се установяват на входните клеми на съответните високоговорители.

Възможните комбинации от филтрови звена за получаване на



Фиг. 4.60

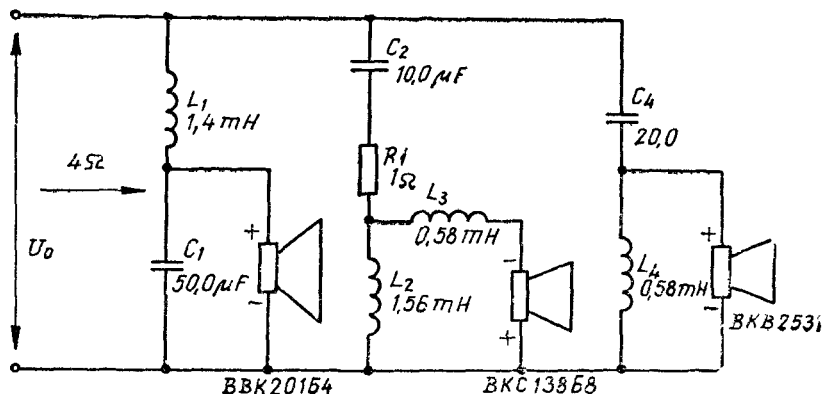


Фиг. 4.61

разделителни филтри за трилентови озвучителни тела са значителен брой, но дадените четири схеми се използват най-често в практиката.

Триленгово озвучително тяло тип ОТМ1-11

Произвежда се от ДСО „РЕСПРОМ“ — завод „Гроздан Николов“ — Благоевград. Изградено е от следните високоговорители: нискочестотен тип ВВК201Б4 с номинален импеданс 4Ω , средно-



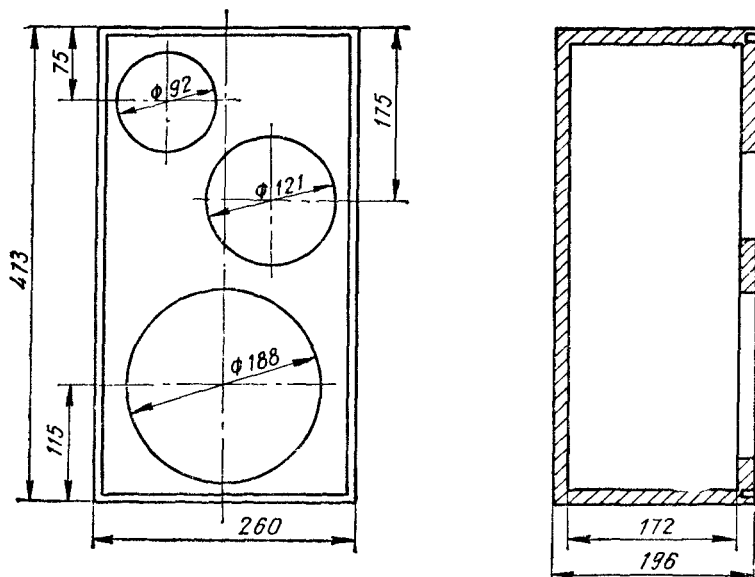
Фиг. 4.62

честотен тип ВКС138Б8 с номинален импеданс 8Ω и висококачествения тип ВКВ2531 с номинален импеданс 8Ω . Разликата между импедансите е възприета с цел да се получи по-равномерна честотна характеристика.

Схемата на разделителния филтър е дадена на фиг. 4.62. Той е съставен от две нискочестотни звена ($L_1 - C_1$ — от втори ред, L_3 — от първи ред) и две висококачествени звена ($L_2 - C_2$ и $L_4 - C_4$) от втори ред. Разделителните честоти на филтъра са $f_{p1} = 600$ Hz и $f_{p2} = 3000$ Hz. Бобините са навити от меден проводник върху пластмасова тръба с диаметър 29 mm и височина 20 mm. За получаване на съответните индуктивности броят на навивките трябва да бъде: за L_1 — 200 нав. от проводник с диаметър 1,3 mm; за L_2 — 150 нав. от проводник с диаметър 0,51 mm; за L_3 — 240 нав. от проводник с диаметър 0,7 mm, и за L_4 — 150 нав. от проводник с диаметър 0,51 mm. Резисторът R_1 е със съпротивление $1,0 \Omega/4 W$ и се поставя за изравняване на честотната характеристика.

На фиг. 4.63 е дадена конструкцията на кутията за озвучително тяло тип ОТМ1-11. В обема ѝ трябва да се постави около 150 g звукопоглъщащ материал.

Основните показатели на ОТМ1-11 са: номинален импеданс — 4Ω ; паспортна мощност 30 W, но може да се комплектува към усилватели с номинална мощност до 50 W; ефективен честотен обхват на възпроизвеждане — от 45 Hz до 18—20 kHz при нерав-

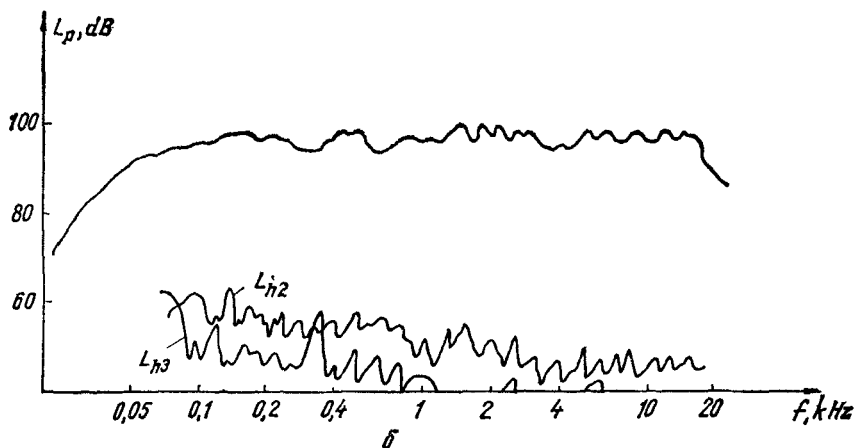


Фиг. 4.63

номерност на честотната характеристика не повече от 12 dB; характеристична чувствителност - $0,4 \text{ Pa W}^{-0,5}$; нелинейните му изкривявания, оценявани с коефициента на хармонични изкривявания, отговарят на изискванията за Hi-Fi клас; нивото на излъчване на $\pm 15^\circ$ от оста се понижава с по-малко от 4 dB в целия честотен обхват. Следователно ОТМ1-11 въпреки малките си размери отговаря на всички изисквания за озвучителни тела от Hi-Fi клас. На фиг. 4.64 са дадени честотните му характеристики.

Триленново озвучително тяло тип ОТГ1-03. То се произвежда в завод „Гр. Николов“ — Благоевград. За създаването му са използвани следните типове високоговорители: нискочестотен тип ВКН1221 с номинален импеданс 4Ω , средночестотен тип ВКС5231 с номинален импеданс 8Ω и високочестотен тип ВЛД404 с номинален импеданс 4Ω . Използвани са високоговорители с

различен номинален импеданс, за да се получи равномерна честотна характеристика. Ако средночестотният високоговорител е също 4Ω , в областта около 1500 Hz се получава връх в честотната характеристика, чието ниво превишава допустимите за Hi-Fi клас 4 dB спрямо средното ниво.



Фиг. 4.64

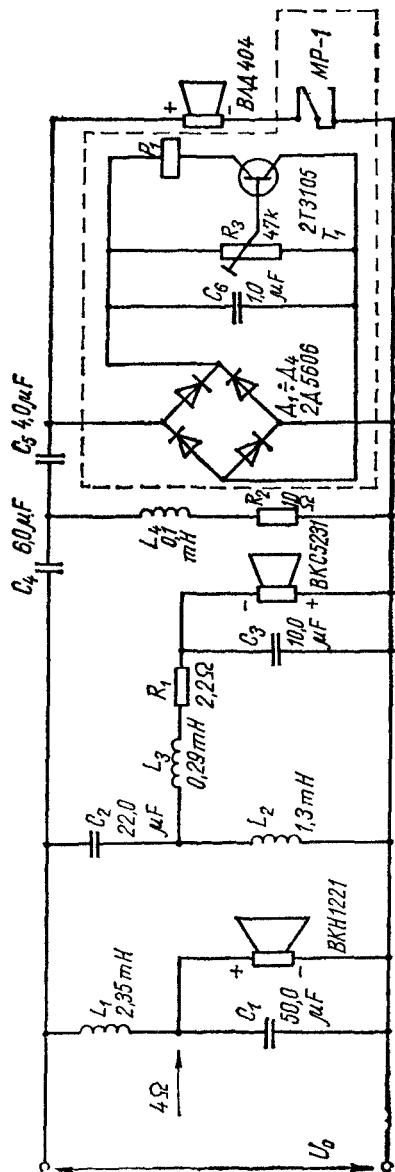
Схемата на разделителния филтър е дадена на фиг. 4.65. Той е съставен от три звена от втори ред и едно звено (C_4 , C_5 , L_4) от трети ред. Разделителните честоти на филтъра са $f_{p1} = 600$ Hz и $f_{p2} = 4000$ Hz. Бобините са навити върху същата тръба както при OTM1-11. За получаване на съответните индуктивности трябва да се изпълнят: за L_1 — 235 нав. от проводник с диаметър 1,2 mm; за L_2 — 200 нав. от проводник с диаметър 0,8 mm; за L_3 — 95 нав. от проводник с диаметър 0,9 mm, и L_4 — 60 нав. от проводник с диаметър 0,9 mm.

Към филтъра е предвидена схема за защита на високочестотния високоговорител тип ВЛД404 от претоварване — заградена с пунктир на фиг. 4.65. Тя е съставена от следните елементи: диоди $D_1 \div D_4$, кондензатор C_6 , донастройващ резистор R_3 , транзистор T_1 , реле P_1 тип PP71e12 и микропревключвател тип МР-1. Цялата контактна система на релето е свалена, а в непосредствена близост до котвата му е закрепен микропревключвателят МР-1. При задействуване на релето котвата му превключва микропревключвателя. Това решение е избрано, тъй като контактите на релето не могат да превключват протичащия през високочестотния

високоговорител ток. Действието на схемата е следното: напрежението, което се подава на входа на високофрековния високоговорител, се подава и на входа на схемата за защита — мостовата изправителна схема, изградена от диодите $D_1 \div D_4$. Това напрежение се изправя и се подава към входа на транзистора T_1 . Кондензаторът C_6 служи като филтър, който не пропуска променлив сигнал към входа на транзистора. Донастройващият резистор R_3 образува делител в базата на транзистора T_1 , който работи в ключов режим. Когато напрежението на входа на транзистора достигне определена стойност, транзисторът се отпушва, в колекторната му верига протича достатъчно голям ток за задействане на релето, включено в тази верига. Котвата на релето превключва микропревключвателя, който прекъсва веригата за захранване на високофрековния високоговорител. Като се изменя съпротивлението на R_3 , се регулира каква част от изправеното напрежение да се подде на входа на транзистора, а с това се регулира при каква големина на напрежението на сигнала да се изключва високофрековният високоговорител.

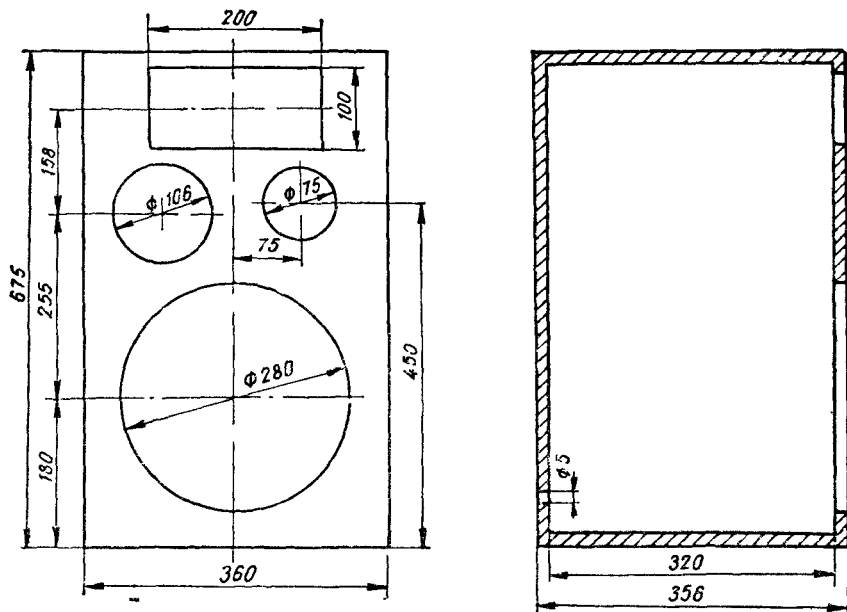
Конструкцията на кутията за озвучително тяло тип ОТГ1-03 е дадена на фиг. 4.66.

Основните показатели на трилентовото озвучително тяло тип ОТГ1-03 са: номинален импеданс — 4Ω ; паспортна мощност — 50 W , но може да се включва към усил-



Фиг. 4.65

ватели с номинална изходна мощност до 80 W; номинален честотен обхват от 32 Hz до 32 kHz при неравномерност на честотната характеристика, не по-голяма от 12 dB; характеристична чувствителност, не по-малка от 0,6 Pa W^{-0,5}; коефициент на хар-

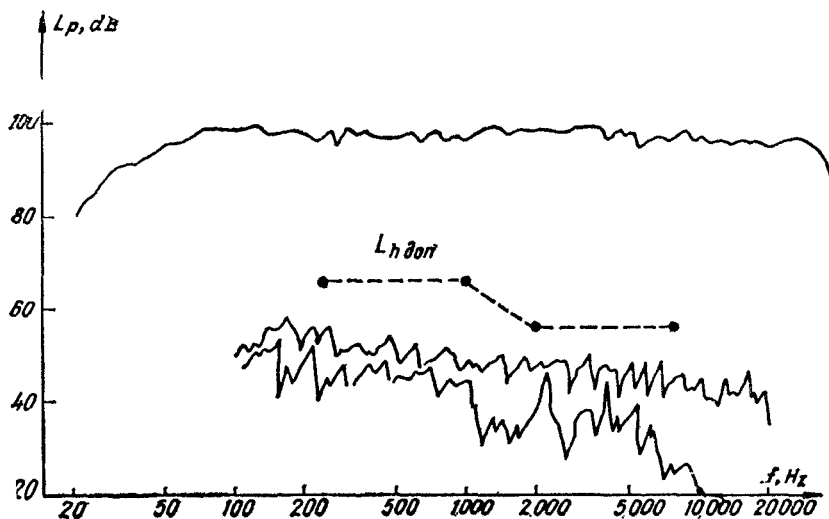


Фиг. 4.66

монични изкривявания — значително по-малък от допустимите стойности за Hi-Fi клас; много добра характеристика на насоченост — в честотния обхват до 20 kHz нивото на звуковото налягане на $\pm 15^\circ$ от оста се понижава с не повече от 3 dB спрямо нивото по оста. За отбелязване е, че субективните оценки за звученето на ОТГ1-03 са много високи. На фиг. 4.67 са дадени честотните характеристики на ОТГ1-03.

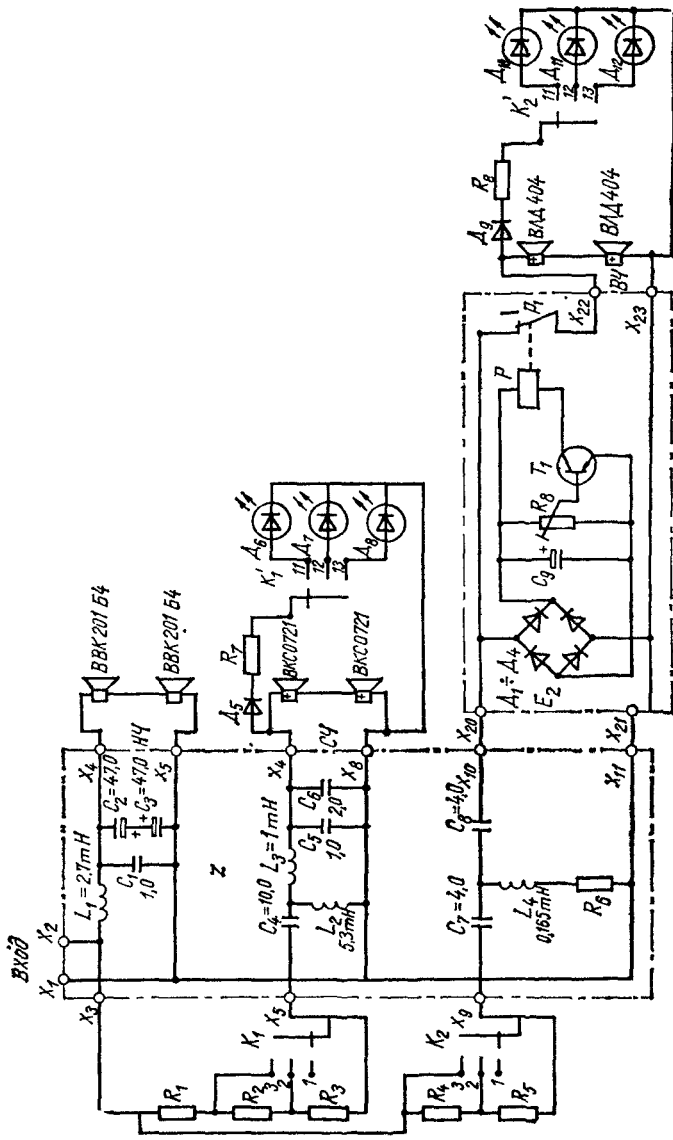
Триленново озвучително тяло тип ОТГ1-05. Произвежда се от българската радиопромишленост. За увеличаване на паспортната му мощност всеки от трите подобхвата на звуковия спектър се възпроизвежда от по два еднотипни високоговорители. Нискочестотният високоговорител е тип ВВК201Б4, средно-

честотният — тип ВКС0721 и високочестотният — тип ВЛД404. Всички високоговорители са с номинален импеданс 4 Ω . Средночестотният и високочестотният високоговорител имат малко по-голяма чувствителност от нискочестотния.



Фиг. 4.67

Разделителният филтър, чиято принципна схема е дадена на фиг. 4.68, е изграден от три звена от втори ред и едно звено (C_7 , C_8 и L_4) от трети ред. Еднотипните високоговорители са свързани последователно, т. е. сумарният номинален импеданс е 8 Ω за всяко звено. Номиналният входен импеданс на озвучителното тяло е също 8 Ω . Разделителните честоти на филтъра са $f_{p1}=1000$ Hz и $f_{p2}=5000$ Hz. Конструктивното изпълнение на бобините е както при ОТМ1-11, при което броят на съответните навивки трябва да бъде: $n_1=275$ нав. от проводник ПЕТ1-F с диаметър 1,2 mm — за L_1 ; $n_2=435$ нав. от проводник ПЕТ1-F с диаметър 0,67 mm — за L_2 ; $n_3=185$ нав. от същия проводник — за L_3 , и $n_4=80$ нав. от проводник ПЕТ1-F с диаметър 0,90 mm за L_4 . Кондензаторите с капацитет 1 и 2 μF са тип КМПГ, с капацитет 4 и 10 μF — тип МБГП-2, а с капацитет 47 μF — тип КЕАЦ — електролитни. Към филтъра е предвидена също защита от претоварване на високочестотните високоговорители, която е аналогична на защитата на ОТГ1-03.



Нивото на излъчваните сигнали от средночестотния и високочестотния подобхват може да се регулира чрез превключвателите, свързани към разделителния филтър. При средно положение на превключвателите честотната характеристика на озвучителното тяло е равномерна, а в другите две положения нивото се изменя с ± 3 dB. Във всяко положение претоварването на съответната група високоговорители се сигнализира от светенето на светодиоди. По такъв начин е възможно да се подчертаят или потиснат сигналите от средночестотния или високочестотния подобхват.

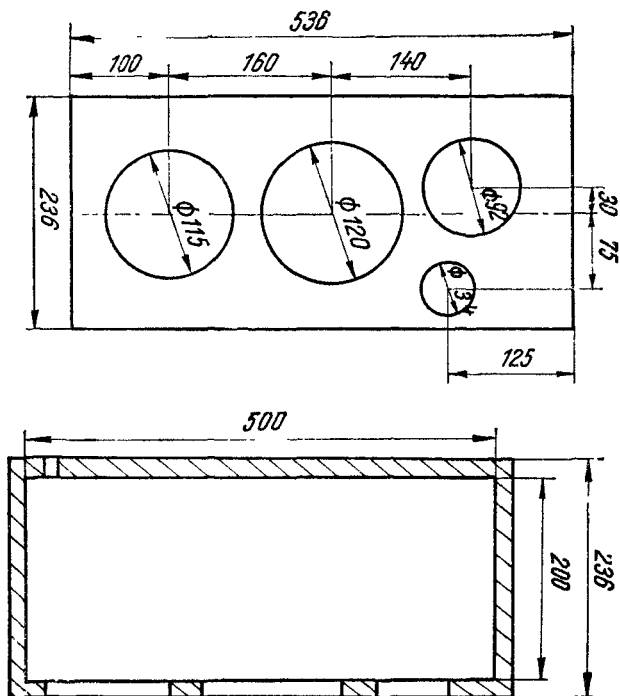
Основните показатели на трилентовото озвучително тяло тип ОТГ1-05 са: паспортна мощност — 80 W; номинален честотен обхват — от 40 Hz до 25 kHz, при неравномерност на честотната характеристика, не по голяма от 12 dB; характеристична чувствителност — не по-малка от $0,6 \text{ PaW}^{-0,5}$; коефициент на хармонични изкривявания — значително по-малък от допустимите стойности за Hi-Fi клас; диаграма на насоченост — отговаряща на изискванията за Hi-Fi клас.

Трилентово озвучително тяло тип ЗОТ25-1. Съчетание на малки размери на озвучителното тяло с добри електроакустични показатели може да се получи, като се използва следната комбинация от високоговорители: нискочестотен тип ВКН0832, средночестотен тип ВКС2531 и високочестотен тип ВКВ2531. Трите високоговорителя са с номинален импеданс 8Ω и паспортна мощност 20 W. Тук се налага едно пояснение — високоговорителят тип ВКН0831 издържа въздействието на частта от музикален сигнал с обща мощност 20 W, която се съдържа в обхвата от 50 Hz до 4 kHz. Ако честотният обхват на сигнала, който се подава на ВКН0832, се стесни, мощността, отдавана на високоговорителя, се намалява. Това означава, че високоговорителят ВКН0832 може да издържи въздействието на музикален сигнал с обща мощност 25—30 W, ако на него се подават сигналите с честота до 1000—1500 Hz. Същото се отнася и за високоговорителя ВКВ2531, ако честотният обхват, който му се подава, се стесни от 5 до 20 kHz вместо от 2 до 20 kHz. Комбинацията от ВКН0832 и ВКВ2531 може да се използва за озвучително тяло с паспортна мощност 20 W. Средночестотният високоговорител тип ВКС2531 разтоварва частично и двата високоговорителя, поради което паспортната мощност на трилентовото озвучително тяло тип ЗОТ25-1 ще бъде 25 W.

Електрическо проектиране. Приема се нискочестотните звена на разделителния филтър да бъдат от първи ред, а високочестотните — от втори ред. Схемата на филтъра е дадена на фиг. 4.54.

Избор на разделителни честоти. Параметрите на използваните високоговорители позволяват разделителните честоти да се изберат в широк обхват. Все пак първата разделителна честота не трябва да бъде по-ниска от 800 Hz, за да се избягнат изкривяванията в областта на резонансната честота на ВКС2531. Приема се $f_{p1}=1000$ Hz и $f_{p2}=4000$ Hz.

Изчисляване елементите на филтъра. Приема се, че трите филтрови звена са натоварени с активни съпротивления, чиято стойност е равна на номиналния импеданс на високоговорителите — $R_T=8 \Omega$. Използват се зависимостите (2.13), (2.77) и (2.78): $L_1=1,27$ mH; $L_2=1,8$ mH; $C_2=14 \mu\text{F}$; $L_3=0,32$ mH; $L_4=0,45$ mH; $C_3=3,5 \mu\text{F}$.

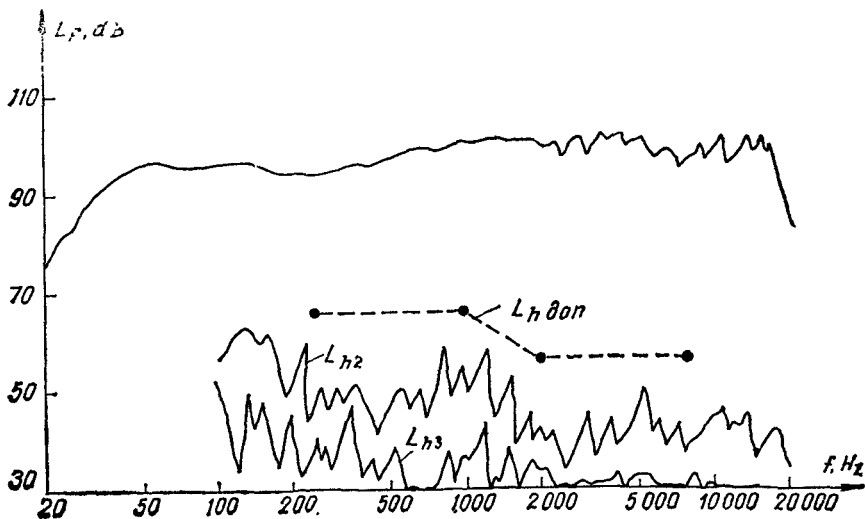


Фиг. 4 69

След реализацията на филтъра елементите му се уточниха на следните стойности: $L_1=1,4$ mH; $C_2=10 \mu\text{F}$; $L_4=0,5$ mH; $L_2=1,1$ mH; $L_3=0,55$ mH; $C_4=3,3 \mu\text{F}$.

Кондензаторите са със стандартни капацитети, а бобините може да се реализират съгласно указанията, дадени във втора глава, като броят на навивките се определя от таблица 2.1.

Акустично проектиране. То се извършва на базата на необходимите размери на озвучителното тяло за разполагане на висо-



Фиг. 4.70

коговорителите върху лицевата му повърхност. Конструкцията на кутията е дадена на фиг. 4.69 и от нея се определя $V=20 \text{ dm}^3$. За коефициента α се получава $\alpha=0,31$. Приема се озвучителното тяло с фазоинвертор, за което $Q_v=Q_L=5$. Изчисленията се извършват с помощта на графиките от фиг. 3.15. Определя се: $Q_T=0,54$; $x_3=0,65$; $h=0,74$.

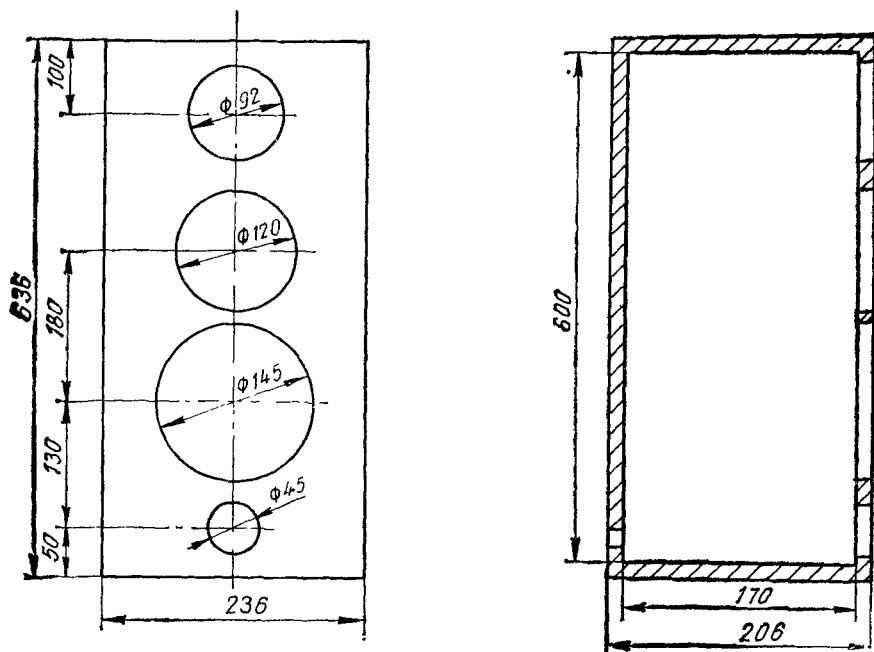
Честотата на срязване на озвучителното тяло е $f_3=39 \text{ Hz}$.

Резонансната честота на фазоинвертора е $f_\phi=14,4 \text{ Hz}$.

Качественият фактор Q_T на озвучителното тяло трябва да бъде по-голям от този на високоговорителя. Необходимо е усилвателят да бъде с $R_i=0,8 \Omega$.

Фазоинверторът може да се изпълни като тръба с диаметър $D_\phi=30 \text{ mm}$. Определя се $\frac{l_\phi}{S_\phi}=80$, а $l_\phi=57 \text{ mm}$.

В обема на озвучителното тяло трябва да се постави около 100 g звукопоглъщащ материал. Тук е необходимо да се има предвид следното: звукопоглъщащият материал при озвучителните тела с фазоинвертор трябва да се постави така, че да



Фиг. 4.71

не внася затихване на звуковите вълни, насочени от високоговорителя към фазоинверсния отвор, затова се препоръчва този материал да се прилепи по стените на кутията.

Ефективният честотен обхват на трилентовото озвучително тяло тип ЗОТ25-1 ще бъде от 28—30 Hz до 18—20 kHz. То ще отговаря на всички изисквания за озвучителни тела от Н₁-F₁ клас. Чувствителността му е от 0,5 PaW^{-0,5}, а номиналният му импеданс 8Ω.

На фиг. 4.70 са показани честотните характеристики на изчисленото озвучително тяло.

Трилентово озвучително тяло тип ЗОТ25-2. То е вариант на ЗОТ25-1, в който нискочестотният високоговорител ~~та~~

ВКН0832 е заменен с тип ВКН0932. Използва се същият филтър със същите разделителни честоти както при ЗОТ25-1. Необходимо е само да се извърши акустично проектиране. Избира се също озвучително тяло с фазоинвертор, като $Q_v = Q_L = 5$, при което за изчисленията се използват графиките от фиг. 3.15. В този случай се приема да се реализира озвучително тяло, чиято честотна характеристика да съответствува на максимално плоска характеристика на филтъра на Батърворт от четвърти ред. Това е възможно само ако $Q_T = 0,414$, т. е. по-малка стойност от 0,523. От фиг. 3.15 се отчита

$$\alpha = 0,9; x_3 = 1; h = 1.$$

Обемът на озвучителното тяло е $V = 20,3 \text{ dm}^3$.

Честотата, при която нивото на честотната характеристика е с 3 dB по-ниско от максималното, е $f_3 = 50 \text{ Hz}$.

Резонансната честота на фазоинвертора е $f_\phi = 50 \text{ Hz}$.

За намаляване на качествения фактор от 0,523 на 0,414 е необходимо усилвателят, който захранва озвучителното тяло, да бъде с отрицателно изходно съпротивление $R_L = -2,8 \Omega$.

Приема се фазоинверсната тръба с диаметър $D_\phi = 40 \text{ mm}$. Определя се $\frac{l_\phi}{S_\phi} = 39$ и $l_\phi = 49 \text{ mm}$.

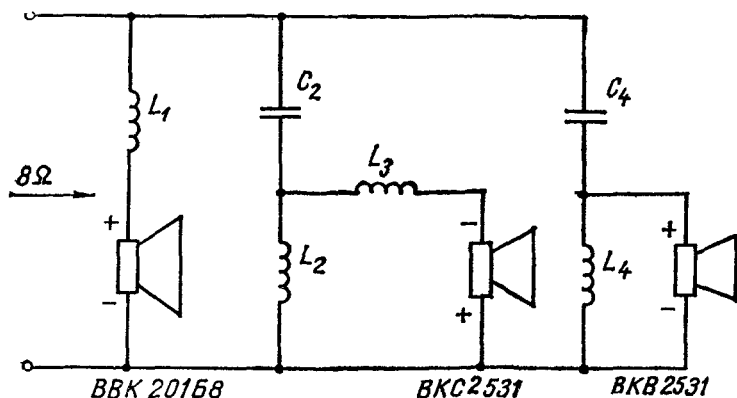
Конструкцията на кутията е дадена на фиг. 4.71.

Показателите на ЗОТ25-2 са идентични с тези на ЗОТ25-1, с тази разлика, че ефективният честотен обхват е от 40 Hz до 18—20 kHz.

Триленново озвучително тяло тип ЗОТ35-1. За увеличаване паспортната мощност на озвучителното тяло трябва да се използват високоговорители с по-голяма паспортна мощност, поне за нискочестотния високоговорител това е задължително. Ако средночестотният и високочестотният високоговорител са с по-малки паспортни мощности, трябва да се стесни честотният спектър, който им се подава за възпроизвеждане, спрямо номиналния им честотен обхват. При това трябва да се увеличи долната гранична честота, за да се намалат сигналите с по-ниска честота, тъй като с увеличаване на честотата намалява енергията, която носят сигналите. Озвучителното тяло тип ЗОТ35-1 ще се проектира с паспортна мощност 35 W, като се използват високоговорителите: нискочестотен тип ВВК201Б8, средночестотен тип ВКС2531 и високочестотен тип ВКВ2531. Последните два високоговорителя са с паспортна мощност 20 W и за да се използват в озвучително тяло с паспортна мощност 35 W, необходимо е долната гранична честота на възпроизвеждания от тях честотен обхват да бъ-

де поне с 1 октава по-висока от долната гранична честота на номиналния им честотен обхват.

Електрическо проектиране. Избира се филтър с нискочестотни звена от първи ред и високочестотни звена от втори ред. Схемата му е дадена на фиг. 4.72.



Фиг. 4.72

Избор на разделителни честоти. Поради посочените по-горе съображения се приема $f_{p1}=1500$ Hz и $f_{p2}=5000$ Hz.

Определяне елементите на филтъра. За определяне стойностите на съответните елементи се използват зависимостите (2.13), (2.77) и (2.78), като се приема, че всички филтрови звена са натоварени с активен товар $R_T=8\Omega$.

$$L_1=0,85 \text{ mH}; L_2=1,2 \text{ mH}; C_2=9,4 \text{ }\mu\text{F}; L_3=0,25 \text{ mH}; \\ L_4=0,36 \text{ mH}; C_4=2,8\mu\text{F}.$$

Входният импеданс на високоговорителите при разделителните честоти не е активен, поради което при реализирането на филтъра елементите му бяха уточнени на следните стойности:

$$L_1=1,0 \text{ mH}; L_2=0,74 \text{ mH}; L_3=0,35 \text{ mH}; L_4=0,4 \text{ mH}; \\ C_2=8 \text{ }\mu\text{F}; C_4=3,0 \text{ }\mu\text{F}.$$

Капацитет $8 \mu\text{F}$ може да се получи от паралелното свързване на два кондензатора тип МБГП-2 по $4 \mu\text{F}$, а $3 \mu\text{F}$ — от паралелното свързване на два кондензатора тип КМПТ с капацитет $2 \mu\text{F}$ и $1 \mu\text{F}$.

Бобините може да се навият върху пластмасова тръба (или цилиндър от дърво) с диаметър 29 mm и височина 20 mm, като броят на навивките за получаване на съответните индуктивности е: $n_1=180$ нав. от проводник с диаметър 1,2 mm за L_1 ; $n_2=170$ нав. от проводник с диаметър 0,51 mm—за L_2 ; $n_3=114$ нав. от проводник с диаметър 0,8 mm — за L_3 и $n_4=140$ нав. от проводник с диаметър 0,51 mm.

Акустично проектиране. Нискочестотният високоговорител е подходящ за създаване на озвучително тяло с пасивна мембрана. Като база за проектирането трябва да се приеме обемът на озвучителното тяло, за да може да се разположат високоговорителите и пасивната мембрана на лицевата му повърхност. На фиг. 4.73 е дадена конструкцията на кутията за ЗОТ35-1, от която се определя $V=50 \text{ dm}^3$. За пасивна мембрана трябва да се използва мембрана от същия високоговорител, при което $S_n = S$ и $\delta = \alpha$. Приема се, че загубите в обема определят $Q_v = Q_L = 7$. При тези условия изчисленията се провеждат с помощта на графиките от фиг. 3.21.

Определя се коефициентът $\alpha=1,74$.

От графиките на фиг. 3.21 се отчита:

$$x_3=1,28; \quad h=1,30; \quad Q_T=0,38; \quad g=0,76.$$

За параметрите на озвучителното тяло се получава

$$f_s=38,4 \text{ Hz}; \quad f_n^1=22,8 \text{ Hz}; \quad f_v=39 \text{ Hz}.$$

Пълният качествен фактор на озвучителното тяло се получи по-малък от този на високоговорителя. За реализирането му е необходимо да се използва усилвател с отрицателно вътрешно съпротивление. Какво би се получило, ако качественият фактор се запази — $Q_T=0,51$, т. е. фактическият качествен фактор да бъде с 34% по-висок от изчисления? Съгласно [35] в областта около 50 Hz ще се получи повишаване на нивото на честотната характеристика с около 3 dB. Това е в рамките на допустимата неравномерност на честотната характеристика, но има опасност при възпроизвеждане на музикални програми да се подчертават сигналите с ниска честота, което се чува като „думкане“.

За получаване на изчислената резонансна честота на пасивната мембрана трябва да се увеличи масата ѝ.

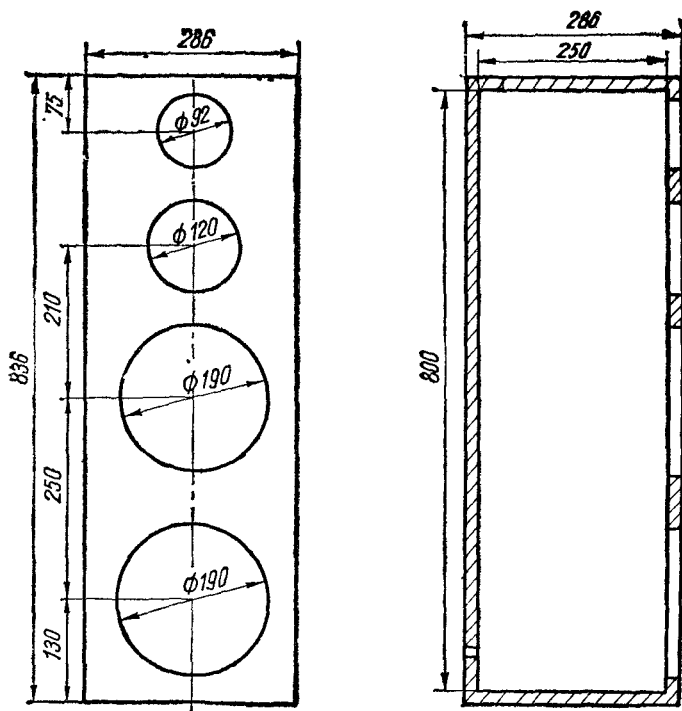
Необходимата обща маса на пасивната мембрана е $m_n=31,5 \text{ g}$.

Допълнителната маса, която трябва да се прибави към пасивната мембрана, е $m_{don}=19 \text{ g}$.

Желателно е да се измери резонансната честота на пасивната

мембрана с допълнителната маса, за да се установи дали резонансната ѝ честота е 22,8 Hz.

Изчисленото трилентово озвучително тяло тип ЗОТ35-1 е от Hi-Fi клас със следните показатели: номинален импеданс 8Ω ;



Фиг. 4.73

паспортна мощност 35 W; ефективен честотен обхват на възпроизвеждане от 35 Hz до 18—20 kHz, при неравномерност на честотната характеристика, не по-голяма от 12 dB; малки нелинейни изкривявания, добра пространствена характеристика.

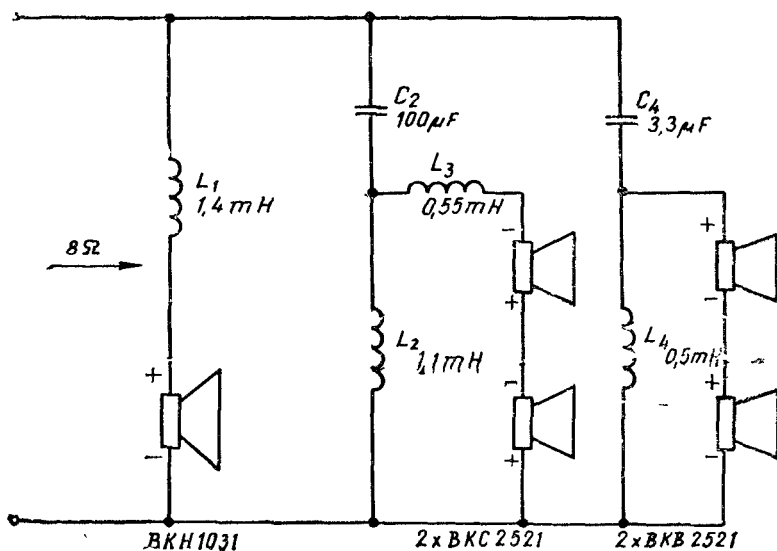
При същия обем, ако би се реализирало озвучително тяло с фазоинвертор, то би имало почти същите показатели, но необходимият качествен фактор е по-малък — $Q_T = 0,35$. Това може да се установи от фиг. 3.15 за $\alpha = 1,74$.

Трилентово озвучително тяло тип ЗОТ50-1. Паспортната мощност на озвучителното тяло ще бъде 50 W и затова се прие-

ма нискочестотният високоговорител да бъде тип ВКН1031, чиято паспортна мощност е 40 W, а номиналният му импеданс — 8 Ω. За средночестотен високоговорител се избира два броя от типа ВКС2521, чиято паспортна мощност е 20 W, а номиналният импеданс 4 Ω, а високочестотният — два броя от типа ВКВ 2521, също с паспортна мощност 20 W и номинален импеданс 4 Ω. Пояснено бе, че с включването на средночестотен високоговорител в дадено озвучително тяло може да се увеличи паспортната му мощност. Именно това се използва при ЗОТ50-1.

Електрическо проектиране. Приема се нискочестотните филтрови звена да бъдат от първи ред, а високочестотните — от втори ред. Еднотипните високоговорители трябва да се свържат последователно, за да се получи товар $R_T = 8 \Omega$ за всички филтрови звена, при което и номиналният импеданс на озвучителното тяло ще бъде 8 Ω. Схемата на филтъра е дадена на фиг. 4.74.

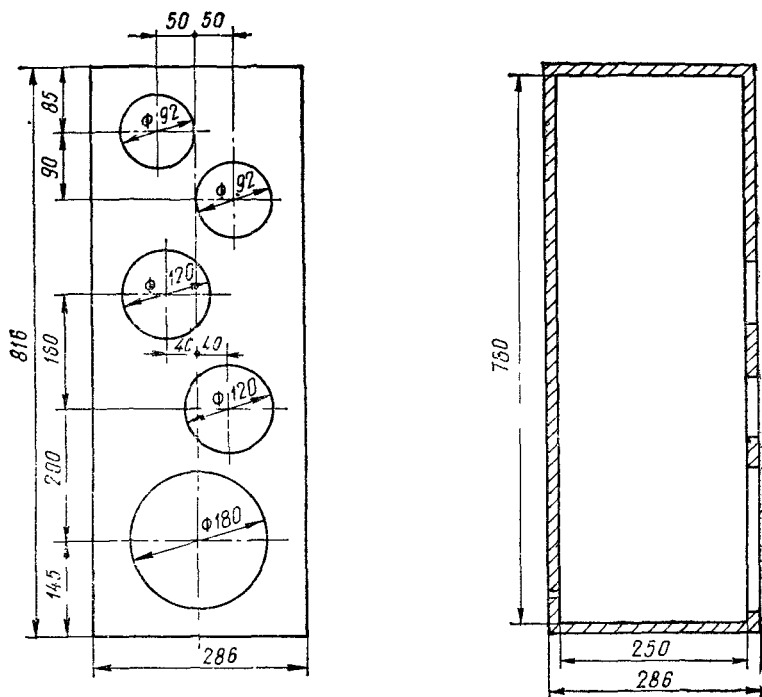
Избор на разделителни честоти. Приема се $f_{p1} = 1000 \text{ Hz}$ и



Фиг. 4.74

$f_{p2} = 4000 \text{ Hz}$, т. е. същите разделителни честоти както при ЗОТ25-1. Поради това, че и еквивалентните товари на съответните филтрови звена са равни, може да се използва филтърът за ЗОТ25-1 — на фиг. 4.74 са означени стойностите на елементите.

Акустично проектиране. Със същия нискочестотен високоговорител тип ВКН1031 бе проектирано двулентово озвучително тяло тип ЗОТ40-2, при което възпроизвеждането на ниските честоти се получи много добро. Полученият обем за озвучителното тяло е за-



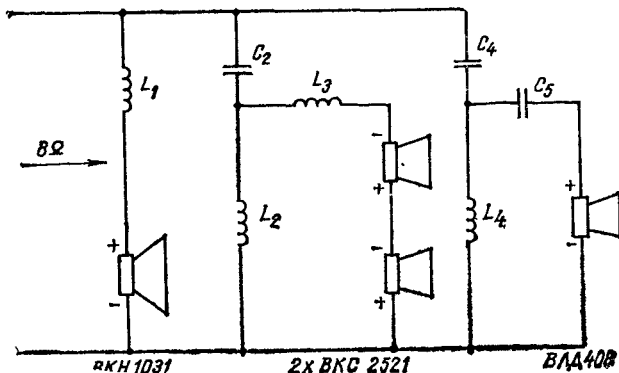
Фиг. 4.75

доволителен и позволява лицевата му повърхност да бъде достатъчна за разполагане на високоговорителите. Затова се приема същото акустично решение. На фиг. 4.75 е дадена конструкцията на кутията за ЗОТ50-1, която трябва да се изработи от ПДЧ (талашит) с дебелина 18—20 mm и да се фурнирова подходящо. В обема трябва да се постави около 200 g звукопоглъщащ материал, който трябва да се прилепи по стените на кутията.

Триленото озвучително тяло тип ЗОТ50-1 може да се разглежда като усъвършенствуван вариант на двулентово озвучително тяло тип ЗОТ40-2. С прибавянето на два средночестотни висо-

коговорители се увеличава паспортната мощност и се подобрява субективно качеството на възпроизведената звукова програма.

Триленното озвучително тяло тип ЗОТ50-2. В озвучителното тяло тип ЗОТ50-1 двата куполни високочестотни високоговорителя



Фиг. 4.76

говорителя тип ВКВ2521 може да се заменят с един лентов високочестотен високоговорител тип ВЛД408, който има паспортна мощност 40 W и номинален импеданс 8Ω. Чувствителността му е с 2—3 dB по-висока от тази на ВКВ2531, така че замяната е осъществима и няма да наруши баланса между нивата, създавани от различните групи високоговорители.

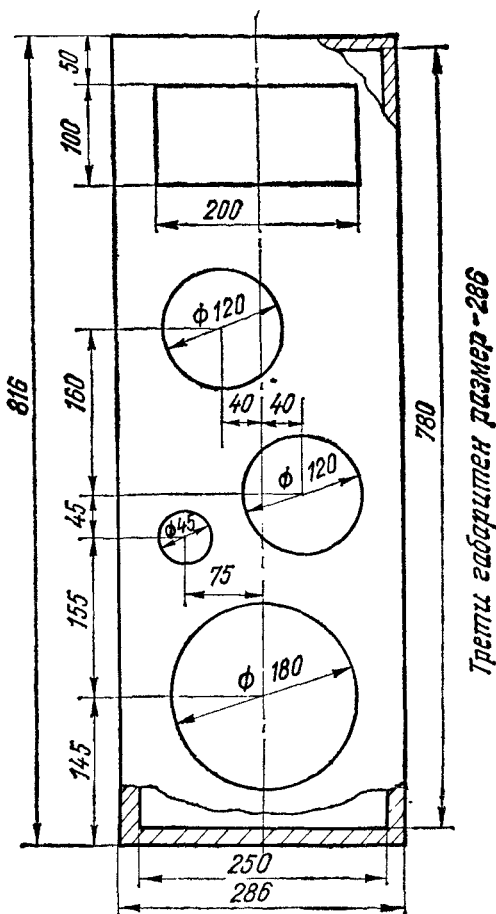
Електрическо проектиране. Нискочестотните звена на филтъра може да бъдат от първи ред, а високочестотните звена трябва да бъдат съответно от втори и трети ред. Схемата на филтъра е дадена на фиг. 4.76.

Избор на разделителни честоти. Приема се $f_{p1}=1000$ Hz, а $f_{p2}=6000$ Hz. Втората разделителна честота е избрана по-висока, отколкото при ЗОТ50-1, тъй като лентовият високоговорител поначало е чувствителен към претоварвания, а се поставя да функционира при малко по-тежки условия — паспортната мощност на озвучителното тяло е 50 W, а на високоговорителя — 40 W.

Определяне елементите на филтъра. Необходимо е да се преизчислят L_3 и елементите на високочестотното звено от трети ред при $R_T=8_\Omega$. $L_3=0,21$ mH.

За определяне елементите на високочестотното звено от \bar{t} тре-
ти ред се използват зависимостите (2.88), като се приема $m=0,5$.

$$C_4=2,2 \mu\text{F}; C_5=3,3 \mu\text{F}; L_4=0,106 \text{ мН.}$$



Фиг. 4.77

При настройка на филтъра при реални условия на работа се оказва, че елементите му трябва да бъдат

$$L_3=0,22 \text{ мН}; L_4=0,18 \text{ мН}; C_4=2,2 \mu\text{F}; C_5=3,3 \mu\text{F}.$$

Кондензаторите са със стандартни капацитети, а бобините може да се изпълнят както при ЗОТ35-1, при което броят на навивките трябва да бъде: $n_3=102$ нав. от проводник с диаметър 0,9 mm и $n_4=84$ нав. от проводник с диаметър 0,9 mm.

Акустично проектиране. Много добрите резултати, получени при акустичното проектиране на ЗОТ40-2, са достатъчно основание да се приеме същото акустично решение и за ЗОТ50-2. На фиг. 4 77 е показано разположението на високоговорителите върху лицевата повърхност на кутията, като останалите размери са както при кутията за ЗОТ50-1.

Ефективният честотен обхват на трилентовото озвучително тяло тип ЗОТ50-2 е от 25 Hz до 35—40 kHz, останалите му показатели са като на ЗОТ50-1.

Трилентово озвучително тяло тип ЗОТ40 1. Използува се комбинация от следните високоговорители: нискочестотен тип ВКН1031, средночестотен тип ВКС5231 и високочестотен тип ВКВ3731. И трите високоговорителя са с номинален импеданс 8 Ω и издържат въздействието на музикален сигнал с обща мощност 40 W. Чувствителностите им са приблизително равни и честотната характеристика на озвучителното тяло ще бъде достатъчно равномерна.

Електрическо проектиране. Трите типа високоговорители са подобни на тези, използвани при ЗОТ50-1. Поради това се приема същото електрическо решение — приемат се същите разделителни честоти и се използва същият филтър, който се използва и при ЗОТ25-1. Схемата на свързване е дадена на фиг. 4.78.

Акустично проектиране. Трилентовото озвучително тяло тип ЗОТ40-1 се реализира с пасивна мембрана. За база при акустичното проектиране се приема обемът на озвучителното тяло — $V=60 \text{ dm}^3$. Загубите в озвучителните тела при добро изпълнение почти винаги са еднакви и затова и тук се приема $Q_v=Q_L=7$. Ще се използва мембраната на високоговорителя тип ВКН1031 и за пасивна мембрана, при което $S_n=S$ и $\delta=\alpha$. При тези условия изчисленията могат да се извършат с помощта на графиките от фиг. 3.21.

Определя се коефициентът $\alpha=1,07$.

От графиките на фиг. 3.21 се отчита :

$$Q_T=0,44; \quad x_3=1,02; \quad h=1,03; \quad g=0,76.$$

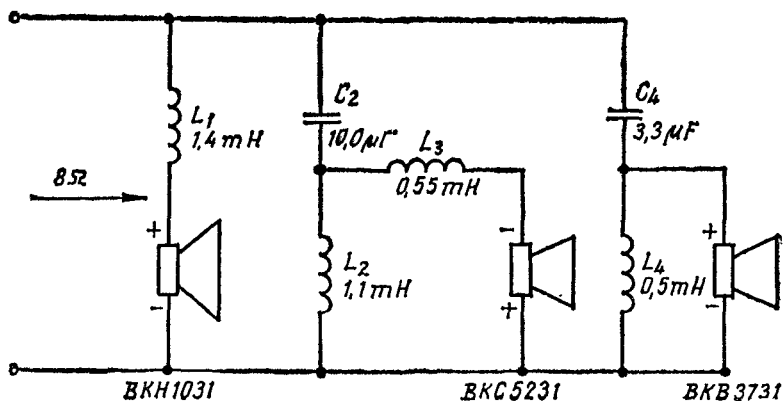
За параметрите на озвучителното тяло се получава :

честотата на сръза $f_3=28,5 \text{ Hz}$;

резонансна честота на пасивната мембрана $f_n=21,2 \text{ Hz}$;

резонансна честота на обема $f_0 = 28,75$ Hz.

Необходимият пълен качествен фактор на озвучителното тяло се получи по-голям от съответния качествен фактор на високоговорителя. За точно постигане на изчислените параметри е необ-



Фиг. 4.78

ходимо озвучителното тяло да се захранва през усилвател с $R_i = 1,7 \Omega$. Ако озвучителното тяло се захранва от усилвател с $R_i = 0$, нивото на честотата му характеристика в областта около 50 Hz ще бъде с 1—2 dB по-ниско от оптималното. Това няма да наруши баланса на възпроизвежданата програма.

За получаване на изчислителната резонансна честота динамичната маса на пасивната мембрана трябва да бъде $m_n = 38,5$ g.

Към пасивната мембрана трябва да се прибави допълнителна маса

$$m_{\text{дон}} = m_n - m + m_{\text{зв.б.}} = 38,5 - 22 + 8 = 24,5 \text{ g.}$$

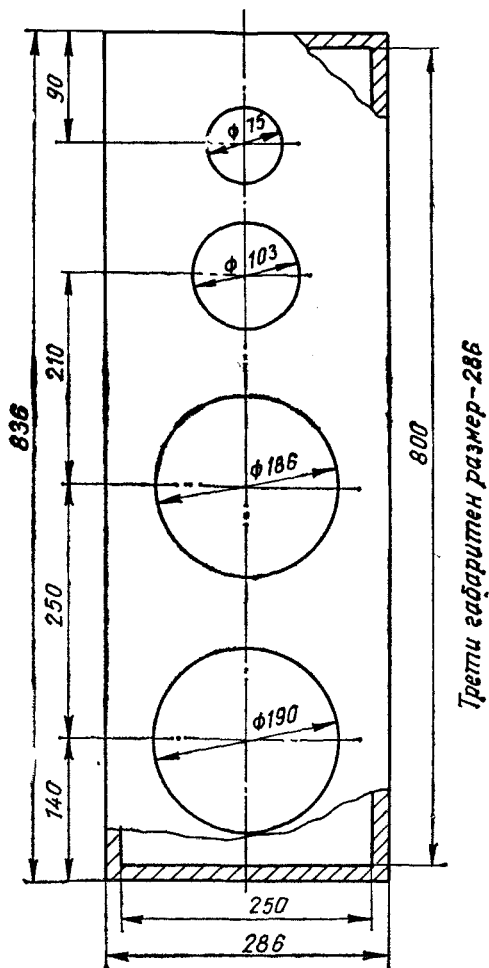
Конструкцията на кутията за ЗОТ40-1 е дадена на фиг. 4.79.

Ефективният честотен обхват на изчисленото трилентово озвучително тяло тип ЗОТ40-1 е от 25 Hz до 18—20 kHz, при неравномерност на честотната му характеристика не повече от 12 dB, а чувствителността му е $0,7 \text{ PaW}^{-0.5}$. Паспортната му мощност е 40 W, но използваните високоговорители и избраният режим на работата им дават основание да се препоръчва включването му към усилватели с номинална изходна мощност до 50—60 W. Има малки нелинейни изкривявания и добра пространствена ха-

рактеристика, поради което се категоризира като озвучително тяло от Hi-Fi.

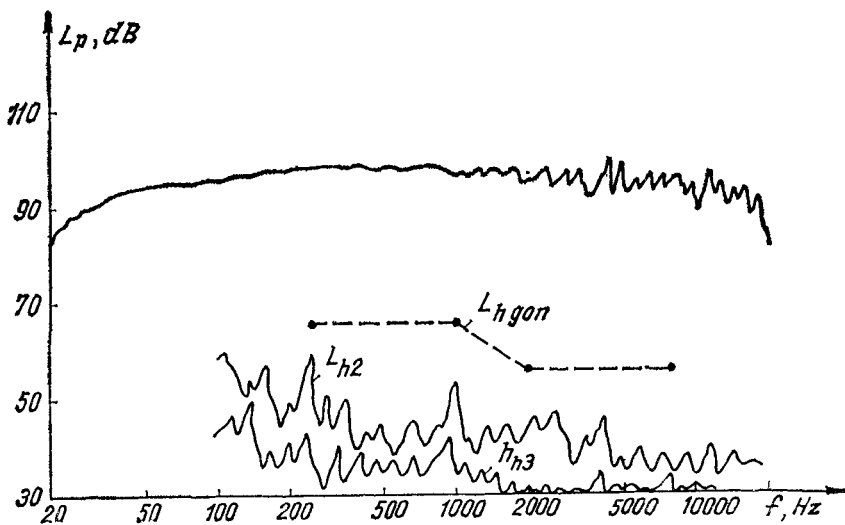
На фиг. 4.80 са дадени честотните му характеристики.

Триленново озвучително тяло тип ЗОТ40-2. То представлява разновидност на ЗОТ40-1 — вместо куполния високочестотен ви-

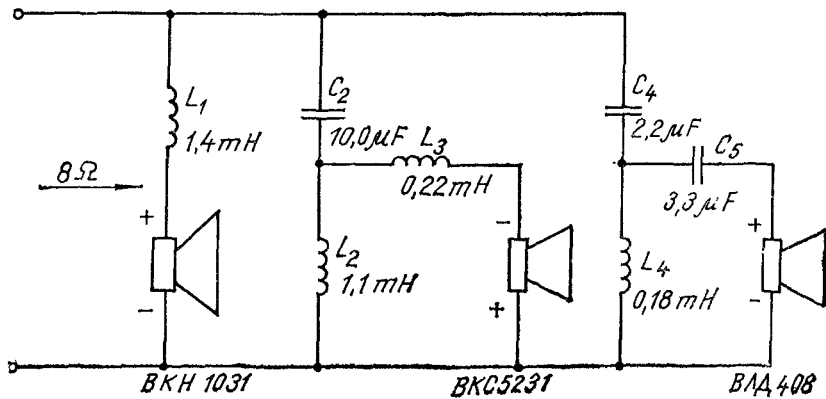


Фиг. 4.79

сокоговорител тип ВКВ3731 се използва лентовият високочестотен високоговорител тип ВЛД408. Може да се разглежда и като вариант на озвучително тяло ЗОТ50-2, в което двата средночестотни високоговорители тип ВКС2521 са заменени с един средно-



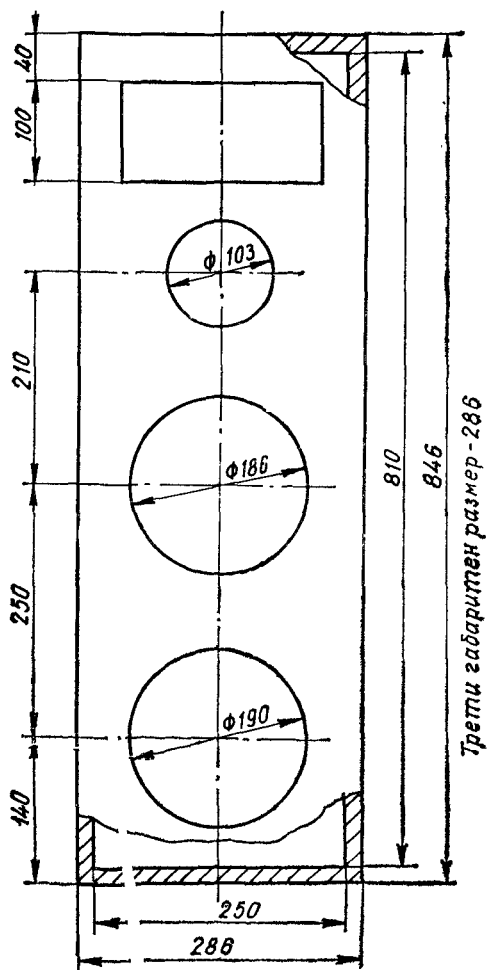
Фиг. 4.80



Фиг. 4.81

честотен високоговорител тип ВКС5231. Приема се същата структура на филтъра с $f_{p1} = 1000$ Hz и $f_{p2} = 6000$ Hz както за ЗОТ50-2 (фиг. 4.81).

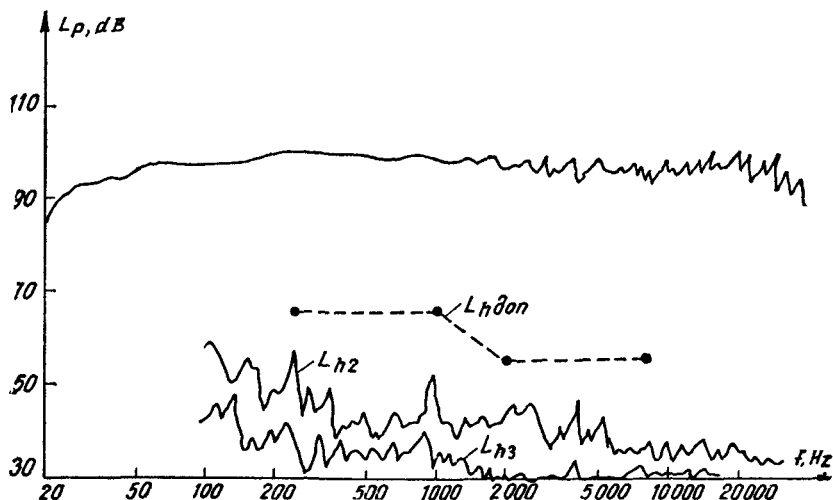
Акустичното решение на ЗОТ40-2 се приема еднакво с това на ЗОТ40-1 — полученото възпроизвеждане на ниските честоти е достатъчно добро за озвучителни тела от супер Hi-Fi клас.



Фиг. 4.82

С използването на високочестотния високоговорител тип ВЛД408 се подобрява възпроизвеждането и на сигналите с висока честота. На фиг. 4.82 е дадена кутията за ЗОТ40-2.

На фиг. 4.83 са дадени честотните характеристики на изчисленото трилентово озвучително тяло тип ЗОТ40-2.



Фиг. 4.83

Трилентово озвучително тяло тип ЗОТ40-3. Нискочестотните високоговорители с по-големи размери и ниска резонансна честота се характеризират с голям обем, който е еквивалентен на гъвкавостта на окачването. Поради това оптималното им функциониране е свързано с изискването за голям обем на озвучителното тяло. Независимо от това любителите на висококачествено възпроизвеждане на музиката в домашни условия отдават предпочитание на озвучителните тела с нискочестотен високоговорител с големи размери. За реализирането на трилентово озвучително тяло тип ЗОТ40-3 ще се използва нискочестотният високоговорител тип ВКН1221, който е с диаметър 310 mm. Възпроизвеждането на средните честоти ще се осъществява от два куполни високоговорителя тип ВКС2531, а на високите честоти — от два лентови високоговорителя тип ВЛД408.

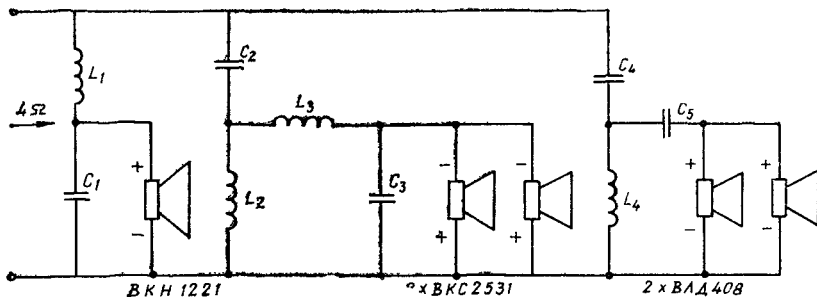
Електрическо проектиране. Всички звена на разделителния филтър се приемат от втори ред, с изключение на високочестотното звено за лентовите високочестотни високоговорители, кое-

то се приема от трети ред. Номиналният импеданс на нискочестотния високоговорител е 4Ω , което определя номиналния импеданс на озвучителното тяло. Средночестотните и високочестотните високоговорители са избрани с номинален импеданс 8Ω и при паралелното им свързване ще се получи еквивалентен импеданс от по 4Ω . При тези условия двата средночестотни и двата високочестотни високоговорители ще създават с 3 dB по-високо ниво на звуковото налягане, отколкото би създавал по един от тези високоговорители с номинален импеданс 4Ω , при условие, че на входа на озвучителното тяло се поддържа постоянно по големина напрежение със синусоидална форма. Следователно честотната характеристика на озвучителното тяло ще се получи равномерна, ако чувствителността на средночестотните високоговорители е с 3 dB по-ниска от тази на нискочестотния високоговорител. В действителност високоговорител тип ВКС 2531 е с по-ниска чувствителност от ВКН 1221 с около 3 dB , но чувствителността на високоговорителя тип ВЛД 408 е с $1-2 \text{ dB}$ по-ниска от тази на ВКН 1221 и нивото на честотната характеристика в областта на високите честоти ще бъде с $1-2 \text{ dB}$ по-високо от средното ниво. Разликата не е голяма, но ако все пак е нежелана, може да се коригира от усилвателя при възпроизвеждането. Необходимо е да се обърне внимание на следното: двата високочестотни (или средночестотни) високоговорителя може да се изберат с номинален импеданс 4Ω и да се свържат последователно. Такова решение няма да обремени функционирането на озвучителното тяло, а ще го облекчи. Въпреки факта, че едно (или две) от филтровите звена е с номинален входен импеданс 8Ω , номиналният импеданс на озвучителното тяло си остава 4Ω — контролира се само минимумът на импедансната характеристика на озвучителното тяло. Обаче звуковото налягане, което ще създават два високоговорителя с номинален импеданс 4Ω , свързани последователно в озвучителното тяло с номинален импеданс 4Ω , е равно на звуковото налягане, което би създавал само единият от тях. Увеличаване се два пъти само паспортната мощност, която биха могли да издържат двата високоговорителя заедно. Например два високоговорителя с паспортна мощност 20 W , свързани по този начин, могат да функционират нормално в озвучително тяло с паспортна мощност 80 W (а не 40 W). Принципната схема на разделителния филтър и свързването на високоговорителите е дадено на фиг. 4.84.

Избор на разделителни честоти. Паспортната мощност на озвучителното тяло не е голяма — 40 W , т. е. средночестотните високоговорители може да се използват и за възпроизвеждането

на по-ниски честоти. Затова се приема $f_{p1}=850$ Hz и $f_{p2}=5000$ Hz.

Определяне елементите на филтъра. Използват се зависимостите (2.57), (2.58), (2.77), (2.78) и (2.88), като се приема, че товарът на всички филтрови звена е $R_T=4\Omega$, а $m=0,5$.



Фиг. 4.84

$C_1=C_2=33 \mu\text{F}$; $L_1=L_3=1,06$ mH; $C_3=5,65 \mu\text{F}$; $L_3=0,18$ mH;
 $C_4=5,35 \mu\text{F}$; $C_5=8 \mu\text{F}$; $L_4=64 \mu\text{H}$.

За получаване на максимално плоски характеристики на филтровите звена при натоварването им със съответните висоговорители и получаване на избраните разделителни честоти е необходимо елементите на филтъра да имат следните, опитно установени стойности:

$C_1=50 \mu\text{F}$; $C_2=20 \mu\text{F}$; $C_3=4 \mu\text{F}$; $C_4=4 \mu\text{F}$; $C_5=6 \mu\text{F}$;
 $L_1=1,3$ mH; $L_2=1,0$ mH; $L_3=0,25$ mH; $L_4=0,08$ mH.

Изчислените стойности на индуктивностите на бобините се получават, като се навият върху цилиндър от немагнитен материал с диаметър на основата 29 mm и височина 20 mm следният брой навивки:

$n_1=195$ нав. от проводник с диаметър 1,3 mm;
 $n_2=190$ нав. от проводник с диаметър 0,8 mm;
 $n_3=90$ нав. от проводник с диаметър 0,8 mm;
 $n_4=50$ нав. от проводник с диаметър 0,8 mm.

Акустично проектиране. Независимо от големия обем, еквивалентен на гъвкавостта на окачване на нискочестотния висоговорител, се избира озвучително тяло с фазоинвертор. Приема се обем $V=100$ dm³, за да се получи по-ниска долната гранична честота и да не се изисква пълният качествен фактор на озвучи-

телното тяло да бъде много малък. Приема се $Q_v = Q_L = 5$ и се използвават графиките от фиг. 3.15.

Определя се коефициентът $\alpha = 3,8$.

От фиг. 3.15 за $\alpha = 3,8$ се отчита:

$$Q_T = 0,28; x_3 = 1,7; h = 1,5.$$

Пълният качествен фактор на нискочестотния високоговорител тип ВКН 1221 е $Q_T = 0,28$, т. е. той е с 35 % по-голям от този за озвучителното тяло. Ако се реализират изчислените параметри, честотната характеристика ще съответствува на максимално плоска характеристика на филтър квази-Батърворт от трети ред. Пълният качествен фактор може да се намали, като се увеличат механичните загуби в самия високоговорител или като се използва усилвател с отрицателно вътрешно съпротивление. Ако пълният качествен фактор не може да се намали до изчислената стойност, тогава честотната характеристика няма да бъде максимално плоска, а в областта на ниските честоти ще се получи повишаване на нивото ѝ. Съгласно [1] и [35] при разлика между качествените фактори от 35 % нивото на честотната характеристика ще се повиши с 3—5 dB.

За параметрите на озвучителното тяло се получава:

честота на срязване $f_s = 42,5$ Hz;

резонансна честота на фазоинвертора $f_\phi = 37,5$ Hz.

Приема се диаметърът на фазоинверсната тръба $D_\phi = 100$ mm, при което $S_\phi = 7,85 \cdot 10^{-3}$ m² и се определя $\frac{l_\phi}{S_\phi} = 22$, а $l_\phi = 170$ mm.

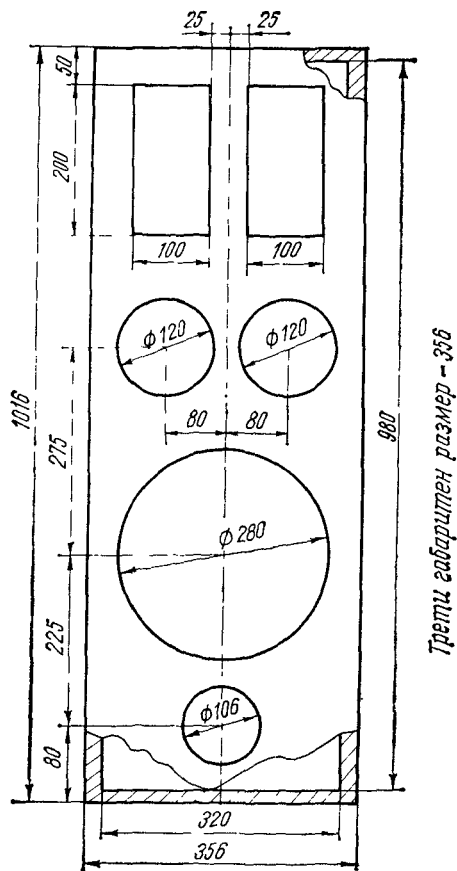
Конструкцията на кутията за ЗОТ40-3 е дадена на фиг. 4.85.

Съобразно големите ѝ размери трябва да се изработи от плочи от дървесни частици с дебелина 20—22 mm. В обема трябва да се постави около 300 g звукопоглъщащ материал, който да се прилепи по стените на кутията.

Основните показатели на изчисленото озвучително тяло тип ЗОТ40-3 са: паспортна мощност — 40 W, ефективен честотен обхват на възпроизвеждане от 35 Hz до 40 kHz, при неравномерност на честотната характеристика не повече от 12 dB, чувствителност — $0,8$ Pa W^{-0,5}, малки нелинейни изкривявания и добра пространствена характеристика. То може да се причисли към озвучителните тела от супер Hi-Fi клас.

Триленгово озвучително тяло тип ЗОТ80-1. Нискочестотният високоговорител тип ВКН 1233 е с паспортна мощност 80W и номинален импеданс 8 Ω . Комбинация от този високоговорител с два броя средночестотни високоговорители тип ВКС 5221 и два

броя високофреотни високоговорители тип ВКВ 3721 ще представява озвучително тяло с паспортна мощност 80 W. Среднофреотните и високофреотните високоговорители са с номинален импеданс 4 Ω и тяхното последователно свързване е задължи-



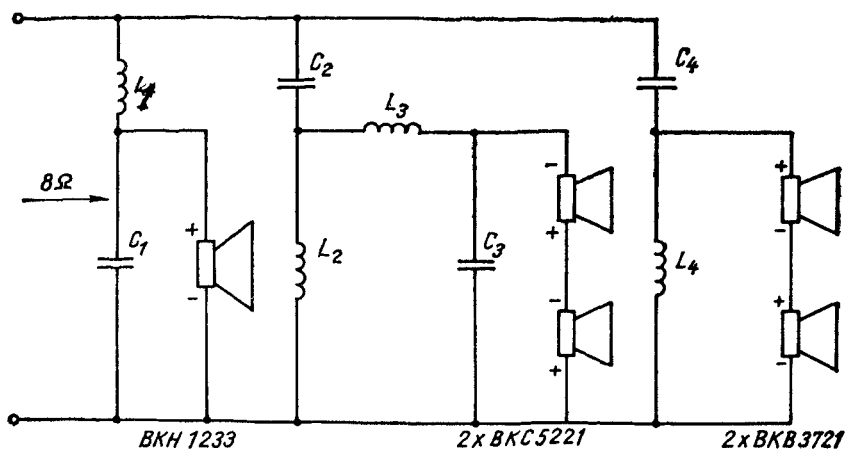
Фиг. 4.85

телно за получаване на номинален импеданс за озвучително тяло 8 Ω . При тези условия всеки от високофреотните и среднофреотните високоговорители ще поеме съответната част от паспортна мощност 40 W. Независимо от това, че производителят

гарантира паспортна мощност по 20 W за тези високоговорители, установено е от практиката, че те понасят натоварвания до 40—50 W. Създаването ниво на звуковото налягане от двата средночестотни високоговорители ще бъде с 3 dB по-високо от нивото, създавано само от един високоговорител с импеданс 8 Ω. Същото се отнася и за високочестотните високоговорители.

Електрическо проектиране. Всички звена на разделителния филтър ще бъдат от втори ред, тъй като не съществува опасност от претоварване, която да налага използване на филтър от трети ред. Освен това не е желателно да се използва нискочестотно филтрово звено от първи ред за ВКН 1233, тъй като създаването ниво на звуковото налягане от средночестотните високоговорители е достатъчно високо и може да се получи нежелано допълнително повишаване на нивото на характеристиката. Същото се отнася и за средночестотните и високочестотните високоговорители. Принципната схема на разделителния филтър е дадена на фиг. 4.86.

Избор на разделителни честоти. Средночестотните високоговорители позволяват значително натоварване. По принцип е же-



Фиг. 4.86

лателно първата разделителна честота да бъде между 600 и 800 Hz, ако средночестотните високоговорители позволяват това. Избира се $f_{p1}=650$ Hz и $f_{p2}=4500$ Hz.

Определяне елементите на филтъра. Изчисленията за всички

филтрови звена се извършват за товар $R_T = 8 \Omega$, като се използват зависимостите (2.57), (2.58), (2.77) и (2.78).

$$C_1 = C_2 = 21,5 \mu\text{F}; L_1 = L_2 = 2,78 \text{ mH}; C_3 = C_4 = 3,1 \mu\text{F}; \\ L_3 = L_4 = 0,4 \text{ mH}.$$

При реализиране и настройка на филтъра при реални условия елементите му бяха уточнени на следните стойности:

$$C_1 = 50 \mu\text{F}; C_2 = 20 \mu\text{F}; C_3 = 4 \mu\text{F}; C_4 = 3,3 \mu\text{F}; \\ L_1 = 2,70 \text{ mH}; L_2 = 2,8 \text{ mH}; L_3 = 0,6 \text{ mH}; L_4 = 0,45 \text{ mH}.$$

При реализиране на бобините може да се използва цилиндрична основа от немагнитен материал с диаметър на основата 29 mm и височина 20 mm. Необходимият брой навивки е:

$$n_1 = 280 \text{ нав. от проводник с диаметър } 1,2 \text{ mm}; \\ n_2 = 286 \text{ нав. от проводник с диаметър } 1,2 \text{ mm}; \\ n_3 = 140 \text{ нав. от проводник с диаметър } 1,2 \text{ mm}; \\ n_4 = 132 \text{ нав. от проводник с диаметър } 0,8 \text{ mm}.$$

Акустично проектиране. Озвучително тяло със затворен обем с нискочестотен високоговорител тип ВКН 1233 няма да възпроизвежда достатъчно ефективно сигналите с ниска честота. Едно голямо и скъпо озвучително тяло, каквото е ЗОТ80-1, трябва да има много високи качествени показатели, за да оправдае изразходваните средства и заеманото място в жилището. Ако се използва фазоинвертор, може да се получи завихряне на трептящия във фазоинверсия отвор въздух поради голямата паспортна мощност на озвучителното тяло. Това ще се възприема като неприятно свистене при функциониране на пълна мощност. Затова се избира озвучително тяло с пасивна мембрана. За улеснение ще се използва пасивна мембрана от същия високоговорител, т. е. $S_n = S$ и $\delta = \alpha$. Приема се, че загубите в озвучителното тяло са нормални и $Q_v = Q_L = 7$. За изходна величина при проектирането се приема обемът на озвучителното тяло. От съображения за получаване на добро звучене и за осигуряване необходимото място за разполагане на всички високоговорители и пасивната мембрана на лицевата повърхност на озвучителното тяло се приема $V = 130 \text{ dm}^3$. При тези условия изчисленията се извършват с помощта на графиките от фиг. 3.21 в следния ред:

Определя се коефициентът $\alpha = 2,36$.

От фиг. 3.21 за $\alpha = 2,36$ се отчита:

$$Q_l = 0,33; x_3 = 1,42; h = 1,42; g = 0,76.$$

Определят се параметрите на озвучителното тяло:

честота на срязване $f_3=35,5$ Hz;

резонансна честота на пасивната мембрана $f_n=19$ Hz;

резонансна честота на обема $f_v=35,5$ Hz.

Пълният качествен фактор на озвучителното тяло трябва да бъде 5 % по-малък от този на самия високоговорител. Корекция обаче не е необходима, тъй като разликата е в рамките на допустимите производствени толеранси. Освен това качественият фактор ще бъде с малко по-висок от оптималния, от което следва, че честотната характеристика ще повиши нивото си с 0,5 до 1 dB в областта на ниските честоти, но това няма да влоши, а ще подобри качествата на озвучителното тяло. Дори се препоръчва изходното съпротивление на усилвателя да бъде по-голямо от нула — например $R_i=0,5 \Omega$, за да се повиши качественият фактор на озвучителното тяло и да се получи повишаване на нивото на честотната характеристика в областта на ниските честоти с около 2 dB.

Трептящата маса на пасивната мембрана за получаване на изчислената резонансна честота трябва да бъде $m_n=76,5$ g.

Към мембраната трябва да се прибави допълнителна маса, която се определя от зависимостта

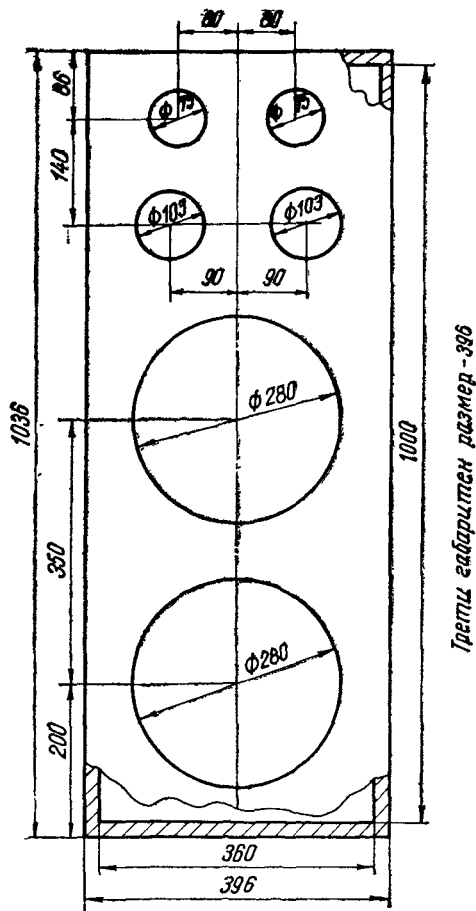
$$m_{\text{дон}}=m_n-m+m_{\text{зв. б.}}=76,5-44+12=44,5 \text{ g.}$$

Желателно е да се измери резонансната честота на пасивната мембрана с допълнителната маса, а също и резонансната честота на обема, т. е. на монтираната към кутията на озвучителното тяло пасивна мембрана, при запушени отвори за високоговорителите.

Трябва да се има предвид, че амплитудата на пасивната мембрана ще бъде 2,2 пъти по-голяма от амплитудата на трептящата система на нискочестотния високоговорител. При голямата паспортна мощност на озвучителното тяло съществува опасност гънките да ограничават трептенето на пасивната мембрана и да се внесат недопустими изкривявания при възпроизвеждането на сигналите с ниска честота.

На фиг. 4.87 е дадена конструкцията на кутията за ЗОТ80-1. Големият обем е получен за сметка на по-голямата височина. По принцип широчината на озвучителните тела трябва да бъде колкото е възможно по-малка, за да заемат те по малка част от жилищното помещение. Пространството над озвучителните тела е свободно и височината им се ограничава единствено от естетически съображения. Трилентовото озвучително тяло ще възпроизвежда ефективно сигналите от 28—30 Hz до 18—20 kHz, при

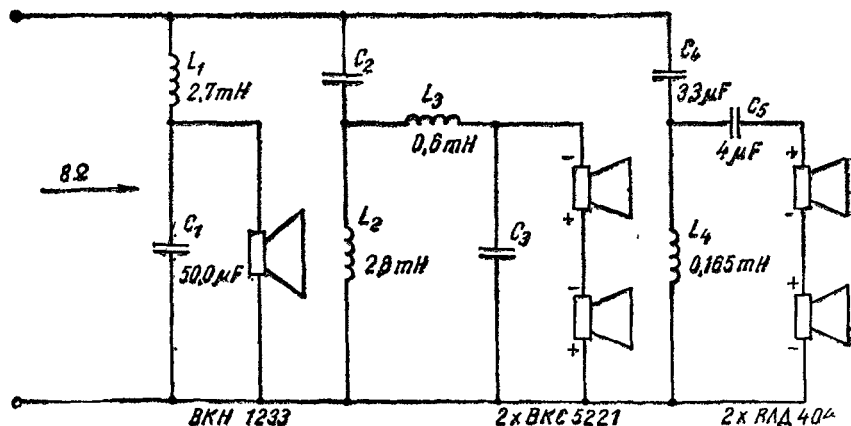
неравномерност на честотната му характеристика, не по голяма от 12 dB. Чувствителността му е 0,8 Pa W^{-0,5}. Внася много малки нелинейни изкривявания към възпроизвежданите музикални програми и има много добра пространствена характеристика. При



Фиг. 4.87

пълно натоварване може да създаде в жилищно помещение звуково налягане с ниво над 110 dB. Издържа значителни краткотрайни претоварвания.

Триленово озвучително тяло тип ЗОТ80-2. То е модификация на ЗОТ80-1 — куполните високофреотни високоговорители тип ВКВ 3721 са заменени с лентови високофреотни високоговорители тип ВЛД 404. Приема се същото електрическо реше-



Фиг. 4.88

ние, т. е. $f_{p1} = 650$ Hz и $f_{p2} = 4500$ Hz. Налага се обаче да се използва филтър от трети ред за лентовите високоговорители. Схемата на филтъра е дадена на фиг. 4.88. Необходимо е да се определят само елементите за филтровото звено от трети ред, като се използва зависимостта (2.88) при $m = 0,5$:

$$C_4 = 2,95 \mu\text{F}; C_5 = 4,42 \mu\text{F}; L_4 = 0,141 \text{ mH}.$$

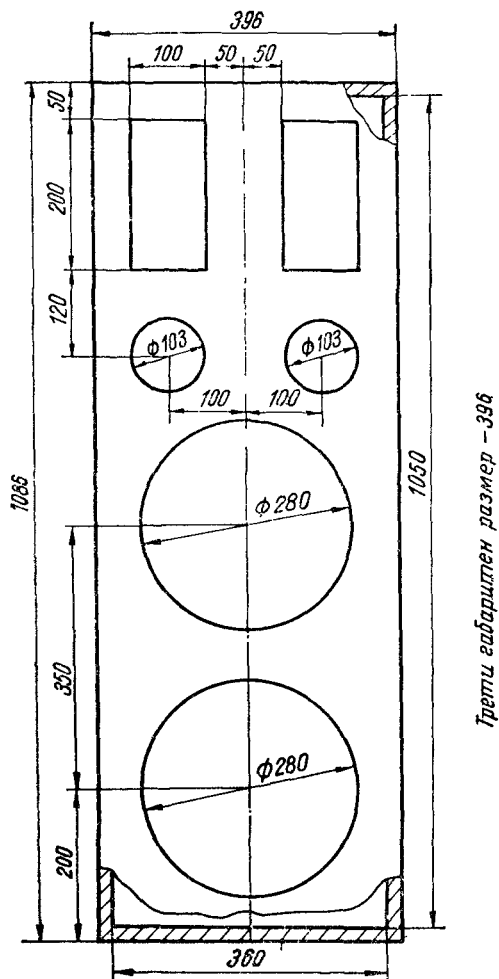
При реализацията на филтъра се получи:

$$C_4 = 3,3 \mu\text{F}; C_5 = 4 \mu\text{F}; L_4 = 0,165 \text{ mH}.$$

За изработване на бобината е необходимо да се навият $n_4 = 80$ нав. от проводник с диаметър 0,9 mm върху тръба от немагнитен материал с външен диаметър 29 mm и височина 20 mm.

Приема се същото акустично оформяне както при ЗОТ80-1. На фиг. 4.89 е дадено разположението на високоговорителите върху лицевия панел на кутията.

Показателите на триленовото озвучително тяло тип ЗОТ80-2 са същите, както на ЗОТ80-1 с тази разлика, че ефективният честотен обхват на възпроизвеждане се разширява до 40 kHz.



Фиг. 4.89

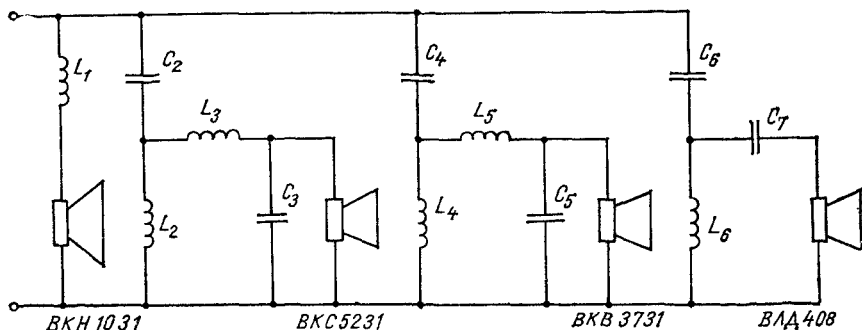
4.8. ЧЕТИРИЛЕНТОВИ ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА

Четирилентовите озвучителни тела се конструират с цел да се получи по-голяма паспортна мощност и по-високо качество на възпроизвеждане. Четвъртият високоговорител се поставя да въз-

произвежда онзи честотен подобхват, който или не се възпроизвежда, или сигналите от този обхват претоварват някой от високоговорителите. В последно време се създават специални супервисокофреотни високоговорители, които възпроизвеждат сигнали с честота от 10—15 kHz до 40 kHz, а в някои случаи и до 100—120 kHz. Тези високоговорители се поставят като четвърти в трилентово озвучително тяло, за да възпроизвеждат сигналите с честота над 16 kHz. В някои случаи четвъртият високоговорител се поставя с цел да се облекчи функционирането на нискофреотния високоговорител и възпроизвежда сигналите с честота от 300—400 Hz до 1000—2000 Hz.

Четирилентово озвучително тяло тип 40Т60-1. Четирилентово озвучително тяло с паспортна мощност 60 W се получава, като се използва комбинация от следните високоговорители: нискофреотен тип ВКН 1031, среднофреотен тип ВКС 5231, средно-високофреотен тип ВКВ 3731 и високофреотен тип ВЛД 408. Тъй като всеки от високоговорителите ще възпроизвежда само част от номиналния си честотен обхват, за който е обявена паспортната му мощност, ще може да издържи без повреди частта от обща паспортна мощност за озвучителното тяло 60 W.

Електрическо проектиране. Разделителният филтър ще съдържа общо 6 филтрови звена. Едното от тях задължително трябва да бъде от трети ред — за високоговорителя ВЛД 408.



Фиг. 4.90

Първото филтрово звено (за високоговорителя тип ВКН 1031) може да бъде от първи ред. Всички останали филтрови звена трябва да бъдат от втори ред. Принципната схема на филтъра и свързването на високоговорителите е дадено на фиг. 4.90.

Избор на разделителни честоти. Претоварването е по-критично за високоговорителите ВКВ 3731 и ВЛД 408, поради което на тях се предоставят по-тесни подобхвати за възпроизвеждане. Приема се $f_{p1}=1000$ Hz, $f_{p2}=4000$ Hz и $f_{p3}=10000$ Hz.

Определяне елементите на филтъра. Товарът на всички филтрови звена е $R_T=8 \Omega$. Използват се зависимостите (2.13), (2.57), (2.58), (2.77), (2.78) и (2.88) за $m=0,5$. Използват се резултатите от изчисленията на филтрите за ЗОТ25-1 и ЗОТ80-1.

$$L_1=1,4 \text{ mH}; \quad L_2=1,1 \text{ mH}; \quad C_2=10 \mu\text{F};$$

$$L_3=0,52 \text{ mH}; \quad C_3=3,3 \mu\text{F};$$

$$L_4=0,50 \text{ mH}; \quad C_4=3,3 \mu\text{F}.$$

Изчисляват се следните елементи:

$$L_5=0,18 \text{ mH}; \quad C_5=1,4 \mu\text{F};$$

$$C_6=1,32 \mu\text{F}; \quad C_7=1,98 \mu\text{F};$$

$$L_6=0,063 \text{ mH}.$$

При реализирането на филтъра се получиха следните стойности:

$$C_5=1 \mu\text{F}; \quad C_6=1,5 \mu\text{F};$$

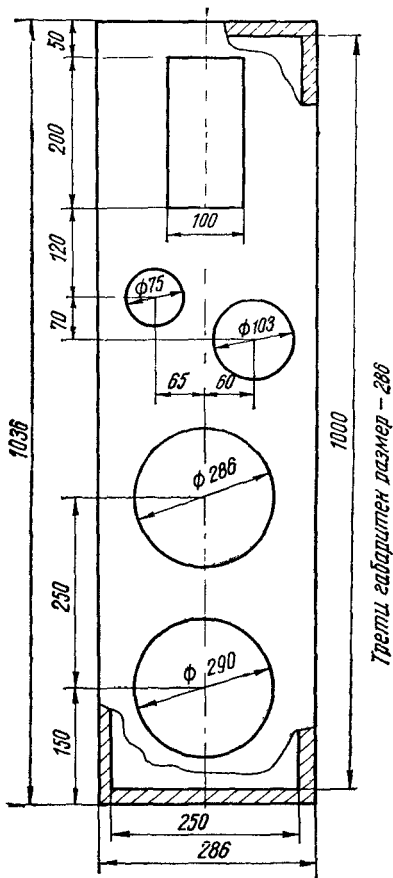
$$C_7=2,2 \mu\text{F};$$

$$L_5=0,25 \text{ mH}; \quad L_6=0,08 \text{ mH}.$$

Акустично проектиране. Резултатите от акустичното проектиране на ЗОТ40-1 са много добри и ще се използват и за изчисляването трилентово озвучително тяло тип ЗОТ60-1, което може да се разглежда като модификация

на ЗОТ40-1 — прибавен е още един високочестотен високоговорител. На фиг. 4.91 е дадена кутията за ЗОТ60-1, като е запазен обемът от 60 dm^3 . Трябва да се има предвид, че при мощност 60 W пасивната мембрана ще трепти с големи амплитуди.

Ефективният честотен обхват на възпроизвеждане на ЗОТ60-1

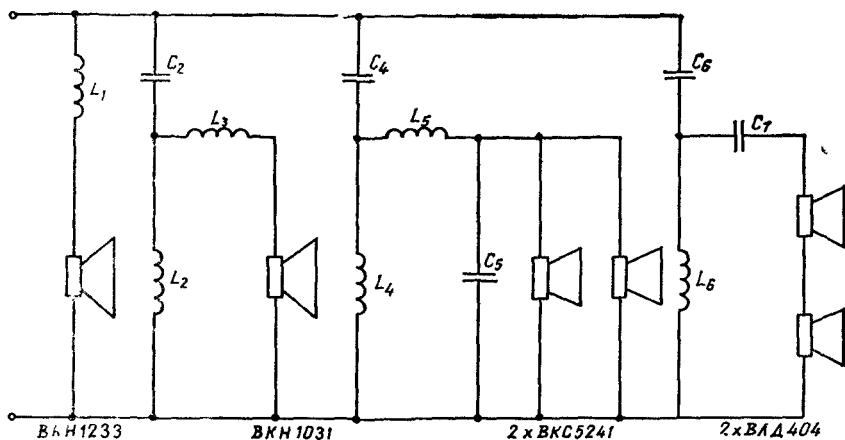


Фиг. 4.91

е от 25 Hz до 40 kHz, паспортната му мощност е 60 W, а останалите показатели са като на ЗОТ40-1.

Четириленното озвучително тяло тип 40Т100-1. Озвучително тяло с паспортна мощност 100 W може да се реализира от комбинация в четирилентова система на следните високоговорители: нискочестотен тип ВКН 1233, втори нискочестотен тип ВКН 1031, средночестотен тип ВКС 5241 — два броя, и високочестотен тип ВЛД 404 — два броя.

Електрическо проектиране. Двата нискочестотни високоговорители са с номинален импеданс 8 Ω . Най-добре е нискочестотната част на филтрите звена да бъде от първи ред, а високочестотната на ВКН 1031 — от втори ред. Средночестотните високоговорители са с номинален импеданс 16 Ω и за да се получи равна честотна характеристика на озвучителното тяло, трябва да се свържат паралелно, при което еквивалентният им импеданс ще бъде 8 Ω . Подходящо е захранването им да стане през средночестотен филтър, на който и двете звена са от втори ред. Високочестотните високоговорители са с номинален импеданс 4 Ω и трябва да се свържат последователно, за да се получи еквивалентен импеданс 8 Ω . Захранването им трябва да стане задължи-



Фиг. 4.92

телно през филтър от трети ред. Принципната схема на разделителния филтър е дадена на фиг. 4.92.

Избор на разделителни честоти. Нискочестотните високоговорители са по един, а от другите типове са по два броя. Висо-

коговорителят тип ВКН 1031 е с паспортна мощност 40 W, а е включен само един в озвучителното тяло от 100 W. Следователно на него трябва да му се подава относително тесен честотен обхват за възпроизвеждане — не повече от две октави. От тези съображения се избира $f_{p1} = 500$ Hz, $f_{p2} = 1500$ Hz и $f_{p3} = 6000$ Hz.

Определяне елементите на филтъра. Товарът на всички филтрови звена е $R_T = 8$ Ω . Приема се $m = 0,5$ и се използват штираните вече зависимости:

$$\begin{aligned} L_1 &= 2,54 \text{ мН}; L_2 = 3,6 \text{ мН}; C_2 = 28 \text{ }\mu\text{F}; L_3 = 0,85 \text{ мН}; \\ L_4 &= 1,2 \text{ мН}; C_4 = 9,3 \text{ }\mu\text{F}; L_5 = 0,225 \text{ мН}; \\ C_5 &= 1,75 \text{ }\mu\text{F}; C_6 = 1,7 \text{ }\mu\text{F}; C_7 = 2,55 \text{ }\mu\text{F}; L_6 = 0,08 \text{ мН}. \end{aligned}$$

Стойностите на елементите на разделителния филтър, функциониращ при реални условия, са:

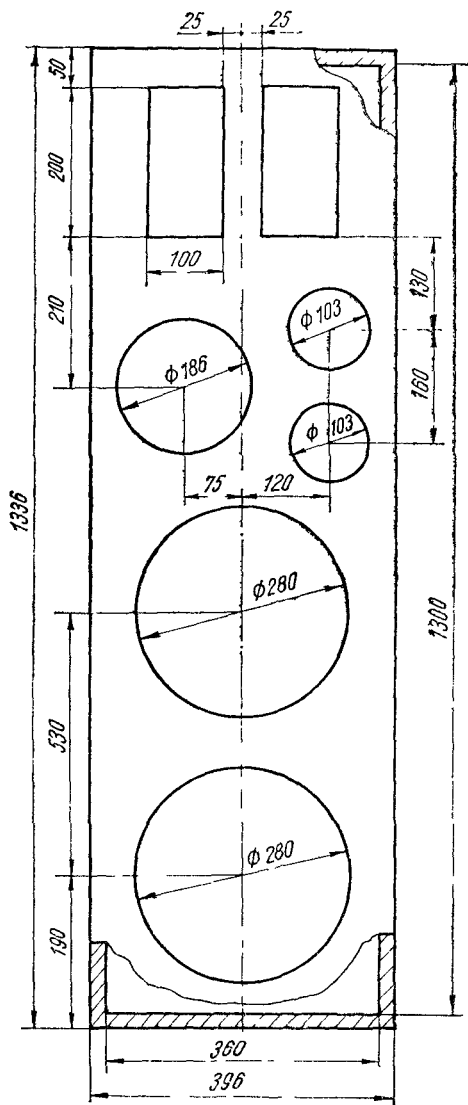
$$\begin{aligned} L_1 &= 3,8 \text{ мН}; L_2 = 3,0 \text{ мН}; C_2 = 24 \text{ }\mu\text{F}; \\ L_3 &= 1,3 \text{ мН}; L_4 = 1,4 \text{ мН}; C_4 = 4 \text{ }\mu\text{F}; \\ L_5 &= 0,3 \text{ мН}; C_5 = 2 \text{ }\mu\text{F}; \\ L_6 &= 0,1 \text{ мН}; C_6 = 2 \text{ }\mu\text{F}; C_7 = 2 \text{ }\mu\text{F}. \end{aligned}$$

Бобините може да се навият върху цилиндър с диаметър на основата 29 mm и височина 20 mm, при което необходимият брой навивки е:

$$\begin{aligned} n_1 &= 350 \text{ нав. от проводник с диаметър } 1,2 \text{ mm}; \\ n_2 &= 300 \text{ нав. от проводник с диаметър } 1,2 \text{ mm}; \\ n_3 &= 200 \text{ нав. от проводник с диаметър } 0,8 \text{ mm}; \\ n_4 &= 212 \text{ нав. от проводник с диаметър } 0,8 \text{ mm}; \\ n_5 &= 96 \text{ нав. от проводник с диаметър } 0,9 \text{ mm}; \\ n_6 &= 60 \text{ нав. от проводник с диаметър } 0,9 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Акустично проектиране. Акустичното оформяне на озвучителното тяло тип ЗОТ80-1 осигурява много добро възпроизвеждане на сигналите с ниска честота и е подходящо и за четирилентовото озвучително тяло тип 4ОТ100 1. Обемът му е достатъчен, за да се разположат високоговорителите и пасивната мембрана върху лицевата повърхност. Конструкцията на кутията за 4ОТ100 1 е дадена на фиг. 4.93. Нискочестотният високоговорител тип ВКН 1031 трябва да се затвори в собствен обем от 6—8 dm³ за предпазване на мембраната му от въздействието на звуковото налягане в обема, създавано от ВКН 1233.

Четирилентовото озвучително тяло тип 4ОТ100-1 ще възпроизвежда ефективно и с незабележими изкривявания сигналите



Третий газаритен размер - 316

Фиг. 4.93

с честота от 28—30 Hz до 40 kHz. Разделността на звучене на отделните музикални инструменти при възпроизвеждане на оркестрови изпълнения ще се възприема ясно от слушателите.

4.9. ПРАКТИЧЕСКО ИЗПЪЛНЕНИЕ НА РАЗДЕЛИТЕЛНИ ФИЛТРИ ЗА ОЗВУЧИТЕЛНИ ТЕЛА

Изработването на филтрите не е трудна работа и може да се извърши при домашни условия.

Изработка на бобина с определена индуктивност. Бобините трябва да се навият на няколко слоя върху немагнитна основа с цилиндрична форма. За предпочитане е да се използват пластмасови тръби с диаметър около 40 mm и височина около 20 mm. Необходимият брой навивки се изчислява от (2.17) или се използва табл. 2.1, ако диаметърът на проводника е 1 mm. Бобините за филтрите трябва да се изработват от меден изолиран проводник, като за нискочестотните филтри диаметърът трябва да бъде не по-малък от 1 mm, за средночестотните — $0,5 \div 0,7$ mm и за високочестотните — $0,31 \div 0,4$ mm. При навиване на всеки слой трябва да се нанася лепило. За предпочитане е да се използват ограничителни шайби и навивките да се нареждат плътно една до друга. След изработката бобината трябва да се завърже с шнур или лента, за да не се размотае.

Изработка на монтажната платка. Може да се използва платка от нефолиран гетинакс, листов полистирол или друг листов немагнитен материал, а монтажът да бъде обемен. За предпочитане е обаче да се използва едностранно фолиран гетинакс, за да се осъществи печатен монтаж. Поради малкия брой връзки фолиевата картина се създава сравнително лесно.

Закрепване на елементите. Ако се използват кондензатори с цилиндрична форма и неголеми размери, закрепването им става с изводите им. Кондензаторите с по-големи размери и форма на паралелепипед (като напр. от типа МБГП) трябва да се закрепват с допълнителна скоба или с винтове, ако имат уши за закрепване.

Бобините трябва да се притиснат към платката с шайба с диаметър, приблизително равен на външния диаметър на бобината и да се закрепят с винт и гайка от немагнитен материал.

Електрическата връзка (запояването) едва ли може да предизвика трудности и не се нуждае от указания.

Закрепването на платката към кутията на озвучителното тяло става с винтове за дърво в 4 точки, разположени близо до ъг-

лите на платката. Между платката и кутията задължително трябва да се постави една шайба от гума или друг мек материал. Платката трябва да бъде достатъчно здрава, а закрепването ѝ към кутията — достатъчно сигурно, тъй като масата на бобините на филтрите е голяма и съществува реална опасност от счупване на платката по време на транспорта. Закрепването на филтрите към кутията се извършва през отворите за високоговорителите, тъй като кутиите на съвременните озвучителни тела са компактни. Обикновено филтърът се закрепва зад нискофrequentния високоговорител или между него и среднофrequentния високоговорител.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградова, Э. Конструирование громкоговорителей со сглаженными частотными характеристиками. М., Энергия, 1978.
2. Вълчев, Ив. Електроакустика. С., Техника 1975.
3. Эфрусс, М. Громкоговорители и их применение. М., Энергия, 1976.
4. Йофе, В. В. Корольков, М. Сапожков. Справочник по акустике. М., Связь, 1979.
5. Малайков, Сл. Електроакустични преобразуватели. С., Музика, 1977.
6. Павловская, В., А Кочерович, А. Лукьянов. Акустика и электроакустическая аппаратура. М., Искусство, 1977.
7. Полянев, Д. Нискофrequentен високоговорител за Hi-Fi цели. — Радио телевизия, електроника. 1971, кн. 9.
8. Полянев, Д. Озвучително тяло със затворен обем и ниска резонансна честота. Авторско свидетелство № 22022, МПК 10К1 1/00, с приор. от 19. IV. 1975.
9. Полянев, Д. Озвучително тяло с пасивен излъчвател. Авторско свидетелство № 24000783 с приор. от 1. IV. 1977.
10. Полянев, Д. Входен електрически импеданс на Г-образни LC-разделителни филтри за озвучителни тела. — Електропромишленост и приборостроене, 1979, кн. 6.
11. Полянев, Д. Несиметрични електрически разделителни филтри от втори ред за озвучителни тела. — Радио, телевизия, електроника, 1979, кн. 5.
12. Полянев, Д. Практическо изчисляване на електрически разделителни филтри от втори ред за двулентови озвучителни тела. — Радио, телевизия, електроника, 1979, кн. 6.
13. Полянев, Д. Нискофrequentен високоговорител от Hi-Fi клас тип ВВК 200 — Радио, телевизия, електроника, 1979, кн. 10.
14. Полянев, Д. Куполен високофrequentен високоговорител от Hi-Fi клас. — Радио, телевизия, електроника, 1978, кн. 5.
15. Полянев, Д. Двулентово озвучително тяло от Hi-Fi клас тип ОТГ1-02. — Радио, телевизия, електроника, 1979, кн. 2.

16. Попянев, Д. Практическо изчисляване на електрически разделителни филтри от втори ред за трилентови озвучителни тела. — Радио, телевизия, електроника, 1982, кп.

17. Попянев, Д. Трилентово озвучително тяло от Hi-Fi клас тип OTM1-11. — Радио, телевизия, електроника, 1982, кп.

18. Попянев, Д. Върху една възможност за намаляване резонансната честота на озвучително тяло със затворен обем. Михайловград, национална конференция по акустика с международно участие „Акустика 81“.

19. Попянев, Д. Високоговорители и озвучителни тела. С., Техника, 1981.

20. Попянев, Д., К. Д. Влахов. Битова звукотехника. С., Техника, 1981.

21. Ненов Г., Д. Попянев, Радиотехника. С., Техника, 1981.

22. Сапожков, М. Електроакустика, М., Связь, 1978.

23. Кинг, Г. Руководство по звукотехнике. Превод от английски. Л., Энергия, 1981.

24. Allison, R. F. Low — Frequency Response and Efficiency Relationships in Direct — Radiator Loudspeaker Systems. JAFS, vol. 13, № 1, January 1965.

25. Brociner, V. D. R. von Recklinghausen. Interrelation of Speaker and Amplifier Design. JAES, vol. 12 № 2, April 1964.

26. Brociner, V. Speaker Size and Performance in Small Cabinets. Audio, March 1970.

27. Clarke, T. L. Augmented Passive Radiator Loudspeaker Systems part 1. JAES, vol. 29, № 6, June 1981; Part II, JAES, vol. 19, № 7/8, July August 1981.

28. Keele, D. B. A New Set of Sixth-Order Vented-Box Loudspeaker System Alignments. JAES, vol. 23, № 5, June 1975.

29. Margolis, G. R. II. Small Personal Calculator Programs for Approximate Vented-Box and Closed-Box Loudspeaker System Design. JAES, vol. 29, № 6, June 1981.

30. Newman, R. J. A Loudspeaker System Design Utilizing a Sixth-Order Butterworth Response Characteristic. JAES, vol. 21, № 6, July/August 1973.

31. Novak, J. F. Performance of Enclosures for Low-resonance High-Compliance Loudspeakers. JRE Transactions on Audio, vol. AU 7 № 1, January/February 1959.

32. Olson, H. F. Direct Radiator Loudspeaker Enclosures. JAES, vol. 17 № 1, January 1969.

33. Small, R. H. Closed-Box Loudspeaker Systems, Part I: Analysis, JAES, vol. 20, № 10, December 1972; Part II: Synthesis, JAES, vol. 21, № 1, January/February 1973.

34. Small, R. H. Vented-Box Loudspeaker Systems, Part I: Small Signal Analysis, JAES, vol. 21 № 5, June 1973; Part II: Large-Signal Analysis, JAES, vol. 21, № 6, July/August 1973; Part III: Synthesis, JAES, vol. 21, № 7, September 1973; Part IV: Appendixes, JAES, vol. 21, № 8, October 1973.

35. Small, R. H. Passive-Radiator Loudspeaker Systems, Part I: Analysis, JAES, vol. 22, № 8, October 1974; Part II: Synthesis, JAES, vol. 22, № 9, November 1974.

36. Thiele, A. N. Loudspeakers in Vented Boxes: Part I, JAES, vol. 19, № 5, May 1971; Part II, JAES, vol. 19, № 6, June 1971.

СЪДЪРЖАНИЕ

Предговор	5
Глава първа. Електродинамични високоговорители	7
1.1. Определение и класификация	7
1.2. Устройство и принцип на действие на електродинамичните високоговорители	8
1.3. Електрически параметри на електродинамичните високоговорители	12
1.4. Електроакустични характеристики на високоговорителите	19
1.5. Видове електродинамични високоговорители	23
1.6. Измерване на основните параметри на електродинамичните високоговорители	43
Глава втора. Електрически разделителни филтри за озвучителни тела	47
2.1. Определения и основни параметри	47
2.2. Видове разделителни филтри	50
2.3. Разделителни филтри от първи ред	51
2.4. Разделителни филтри от втори ред	66
2.5. Разделителни филтри от трети ред	83
Глава трета. Основна теория на озвучителните тела	86
3.1. Акустично оформяне на високоговорителите	86
3.2. Озвучително тяло със затворен обем	90
3.3. Озвучително тяло с фазоинвертор	98
3.4. Озвучително тяло с пасивна мембрана	113
3.5. Основни сведения и параметри на озвучителните тела	128
3.6. Влияние на вида на акустичното оформяне върху честотната характеристика на озвучителните тела	141
Глава четвърта. Конструирание на озвучителни тела за домашно ползване	145
4.1. Еднолентови озвучителни тела	145
4.2. Двухлентови озвучителни тела — общи сведения	152
4.3. Двухлентови озвучителни тела с разделителен филтър от първи ред	157
4.4. Трилентови озвучителни тела с разделителен филтър от първи ред	174
4.5. Двухлентови озвучителни тела с разделителен филтър от втори ред	188
4.6. Двухлентови озвучителни тела с разделителен филтър от различен ред	218
4.7. Трилентови озвучителни тела с разделителни филтри от първи, втори и трети ред	226
4.8. Четирилентови озвучителни тела	266
4.9. Практическо изпълнение на разделителни филтри за озвучителни тела	272