

**МАССОВАЯ  
РАДИО  
БИБЛИОТЕКА**

*Выпуск 966*

**Э. Л. ВИНОГРАДОВА**

**Конструирование  
громкоговорителей  
со сглаженными  
частотными  
характеристиками**



**МОСКВА-«Э Н Е Р Г И Я»-1978**

ББК 32.87  
В 49  
УДК 681.84.086.001.2

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Берг А. И., Борисов В. Г., Белкин Б. Г., Ванеев В. И., Геништа Е. Н., Гороховский А. В., Демьянов И. А., Ельяшквич С. А., Жеребцов И. П., Корольков В. Г., Смирнов А. Д., Тарасов Ф. И., Чистяков Н. И.,

**Виноградова Э. Л.**

В 49 Конструирование громкоговорителей со сглаженными частотными характеристиками. — М.: Энергия, 1978.—48 с., ил.—(Массовая радиобиблиотека; Вып. 966)

**25 к.**

В брошюре рассматриваются принципы построения громкоговорителя с гладкими частотными характеристиками и с произвольной нижней граничной частотой. Приводятся соотношения, связывающие параметры с частотной характеристикой громкоговорителя, и номограммы, позволяющие вести его точный расчет.

Брошюра рассчитана на радиолюбителей, занимающихся построением высококачественной звуковоспроизводящей аппаратуры.

В  $\frac{30403-256}{051(01)-78} 136-78$

**ББК 32.87**

**6ФФ1.**

*Элеонора Леонидовна Виноградова*

**Конструирование громкоговорителей со сглаженными частотными характеристиками**

Редактор Б. Г. Белкин  
Редактор издательства Н. В. Ефимова  
Обложка художника А. А. Иванова  
Технический редактор Т. А. Маслова  
Корректор Э. А. Филановская

ИБ № 956

Сдано в набор 18.01.78. Подписано к печати 08.08.78. Т-16005. Формат 84X108<sup>2</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская № 2. Гарн. шрифта литературная.

Печать высокая. Усл. печ. л. 2,52. Уч.-изд. л. 3,28. Тираж 40 000 экз. Зак. 443. Цена 25 к.

Издательство «Э н е р г и я»,  
113114, Москва. М-114, Шлюзовая наб.. 10  
Владимирская типография «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
600000, г. Владимир. Октябрьский проспект, д. 7

© Издательство «Энергия», 1978

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Бурный рост электроники и радиотехники в последние годы привел к созданию надежных и высококачественных проигрывателей, магнитофонов, усилителей, пультов, входящих в тракт звукозаписи-звукоспроизведения. Однако не все элементы приборов и преобразователей, находящихся между исполнителем и слушателем, обладают одинаковым классом, хотя современное состояние звукотехники позволяет предъявлять к ним все более высокие требования. Не без основания считается, что наиболее слабое звено тракта звукопередачи его последний элемент—громкоговоритель.

Высококачественный громкоговоритель представляет собой двух-, трехполосную (или более) акустическую систему, в которой отдельные излучающие элементы работают в ограниченных областях частот. Верхняя граница воспроизведения высокочастотными излучателями электродинамического, ленточного, электростатического типов находится за пределами слышимого диапазона. Применение новых материалов, усовершенствования в технологии изготовления помогли создать низкочастотные головки громкоговорителей с резонансными частотами ниже 20 Гц. Но если в области верхних частот граница воспроизведения высокочастотного элемента является одновременно и верхней границей всей акустической системы, то в области низких частот в зависимости от типа акустического оформления низкочастотного излучателя эта граница оказывается, как правило, значительно выше резонансной частоты.

Сложные математические выкладки при анализе работы громкоговорителя долгое время не позволяли перейти к методам точного расчета системы излучатель—акустическое оформление. В результате до настоящего времени господствовал эмпирический метод проектирования громкоговорителей. Формулы и номограммы, полученные опытным путем для некоторых типов головок громкоговорителей, нередко неоправданно распространялись на весь класс излучателей заданного диаметра или с известной резонансной частотой. Выполнение многих рекомендаций, как правило, давало отрицательный результат.

Предлагаемый в данной брошюре метод расчета громкоговорителей основан на строгом математическом анализе работы низкочастотного излучателя в акустическом оформлении. Незначительные упрощения эквивалентной схемы позволили представить громкоговоритель в виде фильтра пропускания высоких частот и свести задачу синтеза громкоговорителя с оптимальными частотными характеристиками к задаче, уже решенной в области радиотехники. Существенной особенностью метода является рассмотрение работы усилителя мощности, излучающей головки и акустического оформления как единого целого. Легко измеряемые параметры этих трех элементов позволяют надежно предсказать частотную характеристику в области поршневого действия излучателя и рассчитать громкоговоритель с гладкой характеристикой, частота среза которой может лежать и ниже собственной резонансной частоты головки громкоговорителя.

Ваши отзывы о брошюре просим направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, изд-во «Энергия», редакция Массовой радиобиблиотеки.

**Автор**

## **АНАЛИЗ РАБОТЫ ГОЛОВКИ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯ В ЯЩИКЕ-ФАЗОИНВЕРТОРЕ**

Громкоговоритель.

Основные определения и понятия

В настоящее время в технической литературе существует немало понятий, в той или иной степени определяющих последний элемент тракта звукопередачи. Это—громкоговоритель, динамик, акустическая система, звуковая колонка и т. п. В брошюре будут использованы следующие термины.

Громкоговоритель — пассивный электроакустический преобразователь, предназначенный для излучения звука в окружающее пространство. Он может содержать одну или более излучающих головок, необходимое акустическое оформление, пассивные электрические устройства (фильтры, трансформаторы, регуляторы и т. п.).

Головка громкоговорителя — самостоятельный узел, предназначенный для преобразования сигналов звуковой частоты из электрической формы в акустическую.

Наиболее распространенным типом головок является электродинамическая головка прямого излучения, состоящая из звуковой катушки, помещенной в воздушный зазор магнитной системы, диффузора с верхним и нижним подвесами и диффузородержателя.

Акустическое оформление — самостоятельный конструктивный элемент громкоговорителя, не участвующий в преобразовании сигналов из электрической формы в акустическую, но обеспечивающий эффективное излучение звука.

Остановимся подробнее на последнем определении и рассмотрим преимущества и недостатки отдельных видов акустических оформлений. Несмотря на большое разнообразие, все они условно могут быть разделены на пять основных классов: плоский экран, ящик с открытой задней стенкой, закрытый ящик, низкочастотный рупор, ящик-фазоинвертор. Плоский экран или ящик с открытой задней стенкой (иначе свернутый экран) редко используется в высококачественных системах звуковоспроизведения. Головка громкоговорителя в такой системе излучает по обе стороны оформления и образующиеся звуковые поля находятся в противофазе по отношению друг к другу, что на низких частотах приводит к уменьшению суммарного звукового давления. Разделить поля можно, увеличив размеры экрана или стенок ящика, однако здесь имеются чисто конструктивные ограничения. Например, чтобы получить удовлетворительное воспроизведение низких частот начиная с 40 Гц, размер каждой стороны экрана должен превышать 4 м.

Наиболее простое и очевидное решение проблемы интерференции волн от передней и тыльной сторон диффузора заключается в поме-

щении головки громкоговорителя в полностью закрытый ящик. Такой громкоговоритель лишь в незначительной степени поддается акустической настройке. Размер оформления по существу определяет нижнюю граничную частоту громкоговорителя, а для получения хорошей частотной характеристики (в ящике приемлемых размеров) требуются головки с очень низкой резонансной частотой.

Низкочастотные рупоры редко используются на практике главным образом потому, что они сложны в исполнении.

С конструктивной точки зрения оформление в виде ящика-фазоинвертора не сложнее оформления в виде закрытого ящика и фактически совпадает с ним, за исключением того, что в передней панели имеется отверстие, которое позволяет использовать звуковое поле, образуемое головкой громкоговорителя внутри ящика. В отличие от плоского экрана или ящика с открытой задней стенкой здесь не происходит взаимного ослабления волн от передней и тыльной сторон диффузора, поскольку образующаяся дополнительная колебательная цепь (масса воздуха в фазоинверсном отверстии и упругость воздуха в ящике) сдвигает по фазе волну, излучаемую фазоинвертором.

Низкочастотная головка громкоговорителя в ящике-фазоинверторе образует сложную колебательную систему, в широких пределах поддающуюся акустической настройке. Последнее обстоятельство определило интерес к такого рода акустическим системам и позволило усилиями Новака, Тиле, Бенсона, Смола и др. создать достаточно строгую теорию работы головки громкоговорителя в ящике-фазоинверторе. Интересной особенностью этой теории является тот факт, что она описывает в качестве частных случаев также работу головки без оформления, в бесконечном экране и в полностью закрытом ящике.

### **Акустическая мощность и коэффициент полезного действия**

Одним из важнейших критериев качества громкоговорителя является его частотная характеристика — зависимость развиваемого звукового давления от частоты входного сигнала. В области поршневого действия, где направленность излучения практически не зависит от частоты, осевая частотная характеристика совпадает с частотной зависимостью излучаемой акустической мощности или к. п. д. громкоговорителя. Поскольку в дальнейшем мы будем интересоваться работой громкоговорителя именно в этом частотном диапазоне и ввиду того, что понятия мощности и к. п. д. поддаются более строгому определению, условимся под частотной характеристикой громкоговорителя подразумевать частотную характеристику его приведенного к. п. д.

В общем виде акустическая мощность любого излучателя определяется объемной скоростью  $U$  на его поверхности и активной частью сопротивления излучения  $R_{ar}$ :

$$P_{ak} = |U|^2 R_{ar}. \quad (1)$$

Объемная скорость находится как произведение колебательной скорости на площадь излучателя.

Сопротивление излучения  $R_{ar}$  зависит от свойств среды, в которую происходит излучение, и от свойств оформления, в котором на-

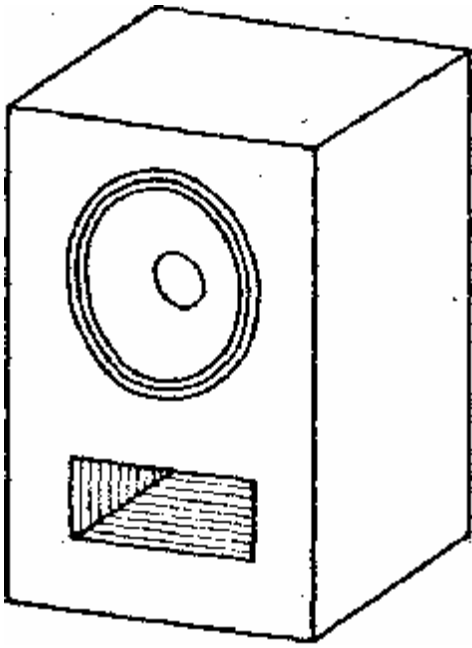


Рис. 1. Низкочастотная головка громкоговорителя в ящике-фазоинверторе.

ходится излучатель. Для многих простых акустических оформлений выражение для  $R_{ar}$  характеризующее меру согласованности излучателя со средой, найдено теоретически. Поэтому для рассматриваемого типа громкоговорителя, изображенного на рис. 1, принято считать, что сопротивления излучения головки и фазоинверсного отверстия равны и определяются выражением:

$$R_{ar} = \frac{\rho f^2 r}{c}, \quad (2)$$

где  $f$ —частота;  $c$ —скорость звука;  $r$ —плотность воздуха. Так как объемная скорость на выходе фазоинверсного отверстия  $U_v$  образована колебаниями тыльной стороны диффузора, она имеет знак, противоположный знаку объемной скорости на поверхности головки  $U_d$  и выражение для излучаемой громкоговорителем акустической мощности с учетом (1) и (2) принимает следующий вид:

$$P_{ak} = \frac{\rho f^2 r}{c} |U_d - U_v|^2. \quad (3)$$

Если источником сигнала для громкоговорителя является усилитель мощности с напряжением открытой цепи  $E_g$  и выходным сопротивлением  $R_g$ , то входная электрическая мощность громкоговорителя определяется формулой

$$P_{эл} = \frac{E_g^2}{(R_e + R_g)^2} R_e, \quad (4)$$

где  $R_e$ —сопротивление звуковой катушки головки постоянному току. Коэффициент полезного действия громкоговорителя — отношение излучаемой акустической мощности к электрической, т. е. используя (3) и (4), получаем:

$$h = \frac{\rho f^2 r (R_e + R_g)^2}{c E_g^2 R_e} |U_d - U_v|^2. \quad (5)$$

Таким образом, чтобы найти абсолютное значение и частотную зависимость к. п. д., т. е. частотную характеристику громкоговорителя, необходимо определить объемные скорости  $U_d$  и  $U_v$  на излучающих поверхностях головки и фазоинверсного отверстия. Для решения этой задачи удобнее всего воспользоваться методом электрических аналогий, т. е. представить громкоговоритель в виде некоторой эквивалентной схемы.

## Эквивалентная схема громкоговорителя

Метод электрических аналогий в анализе механических и акустических цепей широко известен и в применении к громкоговорителям подробно описан Беранеком. Можно считать, что громкоговоритель как сложный электромеханический и механико-акустический преобразователь содержит в себе три типа элементов: акустические, механические и электрические. Так, например, сопротивление излучения относят к акустическим элементам, массу и гибкость подвижной системы головки—к механическим, а сопротивление звуковой катушки—к электрическим. Представляя эти элементы в виде соответствующих полных сопротивлений, можно с помощью известных свойств преобразований перевести сопротивление одного вида в любой другой с тем, чтобы вся схема, отображающая работу громкоговорителя, содержала лишь один тип величин. Образующиеся при этом так называемые эквивалентные акустические, механические или электрические схемы являются схемами электрическими, однако они составлены таким образом, чтобы токи и напряжения в их цепях соответствовали определенным акустическим, механическим или электрическим величинам.

Целесообразность сведения всех элементов громкоговорителя к полным сопротивлениям того или иного вида определяется тем, какие данные о работе громкоговорителя необходимо узнать из эквивалентной схемы. Интересуясь выходными параметрами громкоговорителя (звуковым давлением, акустической мощностью), его представляют в виде схемы, содержащей только акустические величины. Наоборот, определяя частотную зависимость полного электрического сопротивления на зажимах громкоговорителя, акустические и механические сопротивления переводят в соответствующие электрические величины.

Для преобразования какого-либо электрического сопротивления  $Z_e$ , в эквивалентное ему механическое  $Z_m$  или акустическое  $Z_a$  используют следующие соотношения:

$$Z_m = \frac{B^2 l^2}{Z_e}; \quad (6)$$

$$Z_a = \frac{Z_m}{S_d^2}, \quad (7)$$

где  $B$  — плотность магнитного потока а воздушном зазоре магнитной системы головки;  $l$ —длина провода звуковой катушки в зазоре;  $S_d$ — площадь диффузора.

Последняя величина не совпадает с площадью видимой поверхности диффузора, а вычисляется как площадь поршня, эквивалентного головке. Практически  $S_d$  совпадает с площадью выходного отверстия головки за вычетом площади, занимаемой верхним подвесом.

Возвращаясь к решению задачи об объемных скоростях на поверхности головки и в выходном отверстии фазоинвертора, представим громкоговоритель в виде эквивалентной акустической схемы (рис. 2).

Следует оговориться, что здесь и далее рассматривается громкоговоритель, ящик которого имеет идеально жесткие стенки и не возбуждается при колебаниях внутреннего объема воздуха. Такое до-

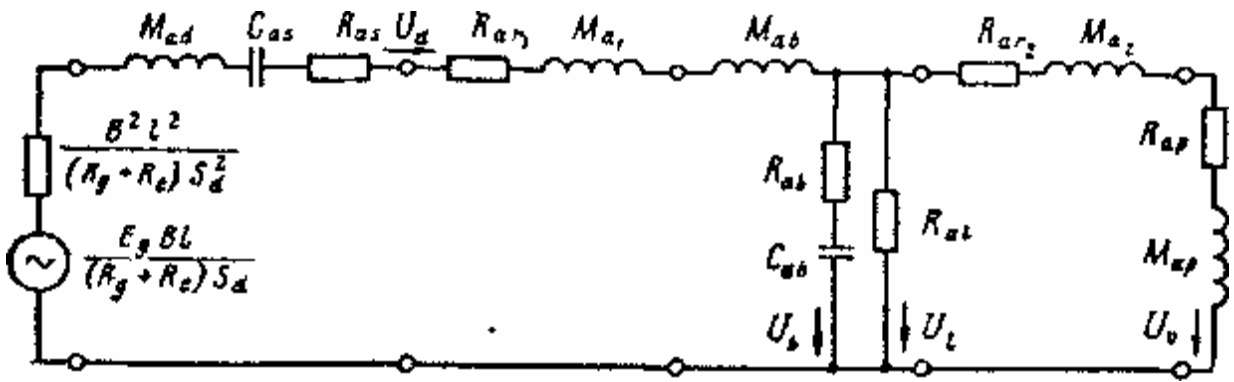


Рис. 2. Полная эквивалентная акустическая схема громкоговорителя.

пущение, справедливое для громкоговорителей с достаточно крепкими стенками ящика, дает возможность не учитывать гибкость конструкции акустического оформления и тем самым упростить эквивалентную схему громкоговорителя. На схеме рис. 2 усилитель мощности, являющийся для громкоговорителя источником сигнала, с напряжением открытой цепи  $E_g$  и выходным сопротивлением  $R_g$  преобразован в генератор напряжений, имитирующий генератор с выходным значением акустического давления

$$P_g = \frac{E_g Bl}{(R_g + R_e) S_d} \cdot \quad (8)$$

Первое после генератора полное сопротивление, представляющее собой сумму активного сопротивления звуковой катушки и выходного сопротивления усилителя, трансформировано с помощью (6) и (7) в акустический аналог и представлено на схеме величиной:

$$Z_a = \frac{B^2 l^2}{(R_g + R_e) S_d^2} \cdot \quad (9)$$

Остальные символы, используемые при составлении схемы рис. 2, означают:  $M_{ad}$  — акустическая масса подвижной системы головки громкоговорителя;  $C_{as}$  — акустическая гибкость подвесов подвижной системы;  $R_{as}$  — акустическое сопротивление подвижной системы, характеризующее активные потери в подвесах;  $R_{ar1}$  — акустическое активное сопротивление излучения передней стороны диффузора;  $M_{al}$  — акустическая присоединенная масса воздуха, соколеблющегося с фронтальной частью подвижной системы головки;  $M_{ab}$  — акустическая присоединенная масса с тыльной стороны диффузора,  $R_{ab}$  — акустическое активное сопротивление ящика, характеризующее потери за счет поглощения звука на стенках и в объеме ящика;  $C_{ab}$  — акустическая гибкость воздуха в ящике;  $R_{ar2}$  — акустическое активное сопротивление излучения отверстия фазоинвертора;  $M_{a2}$  — акустическая присоединенная масса воздуха вблизи отверстий фазоинвертора;  $R_{ap}$  — акустическое активное сопротивление, представляющее потери на трение при колебаниях воздуха в фазоинверсной трубе;  $M_{ap}$  — акустическая масса воздуха внутри трубы;  $R_{al}$  — акустическое сопротивление, определяющее активные потери за счет трения при колебаниях воздуха в отверстиях и щелях ящика.



Обозначенные на схеме токи в отдельных ветвях по своим значениям равны объемным скоростям на поверхности диффузора  $U_d$ , внутри ящика  $U_b$ , в фазоинверсном отверстии  $U_v$  и в щелях ящика  $U_l$ .

В качестве частных случаев из полной эквивалентной акустической схемы могут быть получены схемы, характеризующие работу головки громкоговорителя в закрытом ящике, в бесконечном экране или без оформления. Схема для громкоговорителя в виде закрытого ящика получается путем простого отбрасывания ветви, представляющей собой фазоинвертор и его излучение. Головка громкоговорителя без оформления или в бесконечном экране может быть представлена схемой, образованной из схемы рис. 2 закорачиванием элементов  $C_{ab}$  и  $R_{ab}$ . Различие в оформлении скажется лишь в численных значениях  $R_{ar1}$ ,  $M_{a1}$ ,  $M_{ab}$ .

Для последующего анализа эквивалентная акустическая схема громкоговорителя может быть значительно упрощена без заметного снижения точности конечного результата. На схеме рис. 3 три акустические массы  $M_{ab}$ ,  $M_{a1}$  и  $M_{ab}$  объединены в одну —  $M_{as}$ . Следует подчеркнуть, что такое суммирование несколько искусственно, поскольку  $M_{as}$  не является величиной фиксированной, а зависит от условий работы или измерений (от акустического оформления головки громкоговорителя).  $R_{ar1}$  и  $R_{ar2}$  опущены, несмотря на то что именно они ответственны за акустический выход громкоговорителя. Последнее упрощение схемы, кажущееся на первый взгляд непозволительным, становится понятным, если вспомнить, что громкоговоритель весьма неэффективный преобразователь, к. п. д. которого составляет обычно 0,1—4%. Такие значения к. п. д. являются прямым следствием малых сопротивлений  $R_{ar}$  иными словами, следствием того обстоятельства, что громкоговоритель почти не преобразует (с точностью до тех же 0,1—4%) механические колебания в акустические. Это означает, что колебательная объемная скорость на поверхности диффузора и в отверстии фазоинвертора практически не изменилась бы даже при  $R_{ar1} = R_{ar2} = 0$ . Поскольку эквивалентная схема служит только для нахождения соответствующих объемных скоростей, при ее составлении мы вправе пренебречь элементами  $R_{ar1}$  и  $R_{ar2}$ .

Это допущение оказалось особенно плодотворным потому, что исключило из схемы частотно-зависимые активные сопротивления (2).

$M_{ap}$  и  $M_{a2}$  на схеме рис. 3 собраны вместе и образуют общую акустическую колеблющуюся массу воздуха в фазоинверсной трубе  $M_{av}$ . Наконец,  $R_{ab}$ ,  $R_{ap}$  и  $R_{ab}$  — сопротивления, характеризующие активные потери в щелях, в трубе и в ящике, опущены, так как для большинства случаев добротность  $Q$  цепей, в которых находятся эти сопротивления, высоки по сравнению с  $Q$  головки громкоговорителя.

При дальнейшем упрощении эквивалентной схемы громкоговорителя последовательные активные сопротивления целесообразно

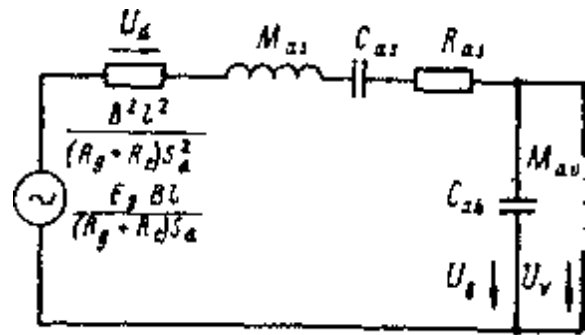


Рис. 3. Упрощенная эквивалентная акустическая схема громкоговорителя.

объединить в одно общее активное акустическое сопротивление головки:

$$R_{at} = R_{as} + \frac{B^2 l^2}{(R_g + R_e) S_d^2}. \quad (10)$$

Из полученной схемы нетрудно найти токи в отдельных ее цепях, т. е. интересующие нас объемные скорости и, подставляя их значения в (5), определить к. п. д. громкоговорителя. Опуская промежуточные вычисления, получаем окончательно:

$$h = \frac{\rho r \ddot{x}}{4\pi c} \frac{B^2 l^2 \ddot{\theta}}{R_e M_{as} S_d^2} \cdot \frac{\dot{u}}{1 + y_1 \frac{\rho f_s \ddot{\theta}^2}{c f \ddot{\theta}} + y_2 \frac{\rho f_s \ddot{\theta}^4}{c f \ddot{\theta}} + y_3 \frac{\rho f_s \ddot{\theta}^6}{c f \ddot{\theta}} + y_4 \frac{\rho f_s \ddot{\theta}^8}{c f \ddot{\theta}}}. \quad (11)$$

где  $f_s$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ ,  $y_4$  выражаются через параметры эквивалентной схемы следующим образом:

$$f_s = \frac{1}{2\rho} (M_{as} C_{as})^{-1/2}; \quad (12)$$

$$y_1 = \frac{C_{as}}{M_{as}} R_{at}^2 - 2 - 2 \frac{C_{as}}{C_{ab}} - 2 \frac{C_{as} M_{as}}{C_{ab} M_{av}}; \quad (13)$$

$$y_2 = 1 + 2 \frac{C_{as}}{C_{ab}} + \frac{\rho C_{as} \ddot{\theta}^2}{c C_{ab} \ddot{\theta}} + 4 \frac{C_{as} M_{as}}{C_{ab} M_{av}} + 2 \frac{\rho C_{as} \ddot{\theta}^2}{c C_{ab} \ddot{\theta}} \frac{\rho M_{as} \ddot{\theta}}{c M_{av} \ddot{\theta}} + \frac{\rho C_{as} \ddot{\theta}^2}{c C_{ab} \ddot{\theta}} \frac{\rho M_{as} \ddot{\theta}^2}{c M_{av} \ddot{\theta}} - 2 \frac{\rho C_{as} \ddot{\theta} \rho C_{as} \ddot{\theta}}{c C_{ab} \ddot{\theta} c M_{av} \ddot{\theta}} R_{at}^2; \quad (14)$$

$$y_3 = \frac{\rho C_{as} \ddot{\theta}^2}{c C_{ab} \ddot{\theta}} \frac{\rho M_{as} \ddot{\theta}^2}{c M_{av} \ddot{\theta}} \frac{\rho C_{as} \ddot{\theta}}{c M_{as} \ddot{\theta}} R_{at}^2 - 2 \frac{C_{as} M_{as}}{C_{ab} M_{av}} - 2 \frac{\rho C_{as} \ddot{\theta}^2}{c C_{ab} \ddot{\theta}} \frac{\rho M_{as} \ddot{\theta}}{c M_{av} \ddot{\theta}} - 2 \frac{\rho C_{as} \ddot{\theta}^2}{c C_{ab} \ddot{\theta}} \frac{\rho M_{as} \ddot{\theta}^2}{c M_{av} \ddot{\theta}}; \quad (15)$$

$$y_4 = \frac{\rho C_{as} \ddot{\theta}^2}{c C_{ab} \ddot{\theta}} \frac{\rho M_{as} \ddot{\theta}^2}{c M_{av} \ddot{\theta}}. \quad (16)$$

Таким образом, выражение для к. п. д. громкоговорителя получено в виде произведения трех сомножителей, из которых первый содержит только физические константы среды, второй — постоянные параметры головки, а третий изменяется с частотой.

### Управление формой частотной характеристики

Если отвлечься от абсолютного значения к. п. д. громкоговорителя, то его частотная характеристика полностью определяется последним сомножителем уравнения (11). Условимся называть его норми-

рованной частотной характеристикой к.п.д. или просто частотной характеристикой громкоговорителя и введем обозначение:

$$h_0(f) = \frac{1}{1 + y_1 \frac{\alpha f_s \ddot{\theta}^2}{\xi f \theta} + y_2 \frac{\alpha f_s \ddot{\theta}^4}{\xi f \theta} + y_3 \frac{\alpha f_s \ddot{\theta}^6}{\xi f \theta} + y_4 \frac{\alpha f_s \ddot{\theta}^8}{\xi f \theta}}. \quad (17)$$

В таком виде выражение для нормированного к. п. д. совпадает с функцией  $|E(j\omega)|^2$  фильтра пропускания высоких частот 4-го порядка, что позволяет при анализе и синтезе частотных характеристик громкоговорителя воспользоваться приемами, уже известными в радиотехнике. Переходя к анализу формы частотной характеристики, целесообразно переписать уравнения (13) — (16), выразив коэффициенты  $y$  через более доступную для измерений систему параметров громкоговорителя. Обозначим через  $f_s$  и  $f_b$  две резонансные частоты — собственную резонансную частоту головки в свободном воздухе (с учетом соколеблющейся массы при работе в акустическом оформлении) и собственную резонансную частоту или частоту настройки ящика-фазоинвертора. Частота  $f_s$  определена уравнением (12),  $f_b$  находится аналогично:

$$f_b = \frac{1}{2p} (M_{av} C_{ab})^{-1/2}. \quad (18)$$

Иными словами,  $f_b$  — частота, на которой масса воздуха в фазиинверторе резонирует с гибкостью воздушного объема внутри ящика.

Введем далее величину  $Q_t$  — общее  $Q$  головки громкоговорителя при работе от определенного усилителя.  $Q_t$  определяется как отношение реактивной части акустического сопротивления головки на частоте резонанса к общему акустическому активному сопротивлению головки (10):

$$Q_t = \frac{(M_{as}/C_{as})^{1/2}}{R_{at}}. \quad (19)$$

Наконец, отношение гибкости подвижной системы головки к гибкости воздушного объема ящика заменим эквивалентным отношением:

$$\frac{C_{as}}{C_{ab}} = \frac{V_{as}}{V}, \quad (20)$$

где  $V$  — внутренний свободный объем ящика-фазиинвертора, а  $V_{as}$  — объем воздуха, соответствующий акустической гибкости подвижной системы:

$$V_{as} = \tau c^2 C_{as}. \quad (21)$$

Используя уравнения (12)—(16), (19)—(21), получаем новую систему уравнений для коэффициентов  $y$ :

$$y_1 = \frac{1}{Q_t^2} - 2 - 2 \frac{V_{as}}{V} - 2 \frac{\alpha f_b \ddot{\theta}^2}{\xi f_s \theta}; \quad (22)$$

$$y_2 = \frac{\alpha}{\xi} \left( 1 + \frac{V_{as}}{V} \frac{\ddot{\theta}^2}{\theta} + \frac{\alpha f_b \ddot{\theta}^2}{\xi f_s \theta} \right) + 2 \frac{V_{as}}{V} + \frac{\alpha f_b \ddot{\theta}^2}{\xi f_s \theta} - \frac{2}{Q_t^2} \frac{\dot{u}}{\ddot{u}}; \quad (23)$$

$$y_3 = \frac{\alpha f_b}{\xi f_s} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \frac{\dot{e}}{e} - \frac{1}{Q_t^2} \frac{\alpha f_b}{\xi f_s} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} - 2 - \frac{V_{as}}{V} - 2 \frac{\alpha f_b}{\xi f_s} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \frac{\dot{u}}{u}; \quad (24)$$

$$y_4 = \frac{\alpha f_b}{\xi f_s} \frac{\ddot{\theta}}{\theta}^4. \quad (25)$$

Как следует из общего вида выражения для нормированного к. п. д. (17), форма частотной характеристики громкоговорителя зависит от численных значений коэффициентов  $y$  при степенях  $f_s/f$ . Например, если бы все коэффициенты  $y$  были равны 0, нормированный к. п. д. оказался бы тождественно равным 1, т. е. не зависящим от частоты. В действительности эти четыре условия:  $y_1=0$ ,  $y_2=0$ ,  $y_3=0$ ,  $y_4=0$  не могут быть выполнены одновременно, поскольку в уравнениях (22) — (25) содержатся только три переменные величины:  $Q_t$ ,  $V_{as}/V$  и  $f_b/f_s$ . Параметр  $Q_t$  и отношения  $V_{as}/V$ ,  $f_b/f_s$  названы здесь переменными в том смысле, что они легко поддаются изменению при настройке громкоговорителя.  $Q_t$  можно изменять, регулируя выходное сопротивление усилителя и включая последовательно с головкой активное сопротивление. Отношения  $V_{as}/V$  и  $f_b/f_s$  принимают различные значения при изменении объема и частоты настройки ящика-фазоинвертора.

Поскольку каждая из величин  $Q_t$ ,  $V_{as}/V$ ,  $f_b/f_s$  поддается настройке и регулировке в широких пределах, имеется возможность подбором комбинации значений  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  и  $y_4$  достигнуть любой желаемой формы кривой частотной характеристики громкоговорителя. Хотя, как было отмечено выше, условие обращения в нуль всех четырех коэффициентов  $y$  выражения (17) физически невыполнимо, за счет переменных  $Q_t$ ,  $V_{as}/V$  и  $f_b/f_s$  можно добиться, чтобы один, два или три коэффициента при степенях  $f_s/f$  были равны 0. В области самых низких частот, где  $f_s/f > 1$ , частотная характеристика громкоговорителя определяется значениями коэффициентов при старших степенях  $f_s/f$ . Напротив, в области частот  $f_s/f < 1$ , т. е. в эффективно воспроизводимом диапазоне частот, форма частотной характеристики более всего зависит от коэффициента  $y_1$ . Максимально гладкой частотной характеристикой принято называть такую, в аналитическом выражении которой большинство из коэффициентов  $y$  равно нулю, включая  $y_1$ .

### Некоторые типы частотных характеристик

Среди большого разнообразия типов синтезируемых частотных характеристик громкоговорителя наибольший практический интерес представляют так называемые гладкие и почти гладкие характеристики, соответствующие фильтрам квази-Баттерворта второго и третьего порядков, Баттерворта и Чебышева четвертого порядка.

*Характеристика, гладкая с точностью до второго порядка*, имеет аналитическое выражение вида

$$h_0(f) = \frac{1}{1 + y_2 \frac{\alpha f_s}{\xi f} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} + y_3 \frac{\alpha f_s}{\xi f} \frac{\ddot{\theta}}{\theta}^6 + y_4 \frac{\alpha f_s}{\xi f} \frac{\ddot{\theta}}{\theta}^8}. \quad (26)$$

Оно получено из (17) путем приравнивания нулю коэффициента  $y_1$ . При этом частотная характеристика стремится к своему асимптотическо-

му значению быстрее, чем  $(f_s/f)^2 \rightarrow 0$ . Под асимптотическим понимается значение, которое принимает характеристика при  $f \gg f_s$ . Из уравнения (22) следует, что условие  $y_1=0$  может быть обеспечено для любого громкоговорителя, имеющего  $Q_t < 0,707$ . Кроме того, между параметрами громкоговорителя должно выполняться соотношение:

$$\frac{1}{2Q_t} = 1 + \frac{V_{as}}{V} + \frac{\alpha f_b \ddot{\theta}}{\xi f_s \dot{\theta}}^2. \quad (27)$$

Характеристика, гладкая до второго порядка частоты, является типичной для громкоговорителя с акустическим оформлением в виде закрытого ящика. Так как для закрытых оформлений  $f_b/f_s=0$ , то упрощается условие (27), уравнения (23)—(25) и выражение для нормированной частотной характеристики громкоговорителя принимает вид:

$$h_0(f) = \frac{1}{1 + y_2 \frac{\alpha f_s \ddot{\theta}}{\xi f \dot{\theta}}^4}. \quad (28)$$

Нижняя граничная частота или частота среза—частота, на которой к.п.д. громкоговорителя снижается на 3 дБ (в 2 раза) относительно своего асимптотического значения, для характеристики типа (28) определяется следующим образом:

$$f_3 = f_s \frac{\alpha}{\xi} \left( 1 + \frac{V_{as}}{V} \frac{\ddot{\theta}}{\dot{\theta}} \right)^{1/2}. \quad (29)$$

*Характеристика квази-Баттерворта третьего порядка описывается уравнением*

$$h_0(f) = \frac{1}{1 + y_3 \frac{\alpha f_s \ddot{\theta}}{\xi f \dot{\theta}}^6 + y_4 \frac{\alpha f_s \ddot{\theta}}{\xi f \dot{\theta}}^8}. \quad (30)$$

Это выражение совпадает с соответствующей характеристикой фильтра четвертого порядка (17) для случая, когда коэффициенты при второй и четвертой степенях  $f_s/f$  равны 0. Анализ показывает, что решение уравнений (22) и (23) при  $y_1=0$  и  $y_2=0$  существует для  $Q_t < 0,563$ .

В зависимости от выбранных соотношений параметров головки громкоговорителя и акустического оформления  $Q_t$ ,  $V_{as}/V$ ,  $f_b/f_s$  можно получить различные коэффициенты  $y_3$  и  $y_4$  и, следовательно, целое семейство характеристик Баттерворта третьего порядка. Особенностью этих характеристик является гладкая без пиков и провалов форма кривой во всей рассматриваемой области частот, причем нижняя граничная частота и частота настройки фазоинвертора оказываются лежащими выше собственной резонансной частоты головки громкоговорителя.

*Характеристика, соответствующая фильтру Баттерворта четвертого порядка, или максимально гладкая частотная характеристика имеет аналитическое выражение вида*

$$h_0(f) = \frac{1}{1 + y_4 \frac{\alpha f_s \ddot{\theta}}{\xi f \dot{\theta}}^8}. \quad (31)$$

Общее выражение для нормированной частотной характеристики к.п.д. громкоговорителя сводится к (31) при  $y_1=0$ ,  $y_2=0$ ,  $y_3=0$ . Эти условия могут быть удовлетворены, как следует из решения уравнений (22) — (24), только для одной комбинации значений параметров головки и акустического оформления, а именно:

$$Q_t = 0,383; \quad V_{as}/V = 1,414; \quad f_b/f_s = 1. \quad (32)$$

При этом оказывается, что нижняя граничная частота  $f_3$  совпадает с собственной резонансной частотой головки  $f_s$  и частотой настройки ящика  $f_b$ .

Следовательно, если выбрать объем ящика-фазоинвертора таким, чтобы он в 1,414 превышал объем, эквивалентный гибкости головки  $V_{as}$ , фазиинвертор настроить на частоту, совпадающую с собственной резонансной частотой головки  $f_s$  и с помощью акустических или электрических средств регулирования добиться того, чтобы  $Q_t$  головки было равно 0,383, частотная характеристика громкоговорителя окажется гладкой и выродится в горизонтальную прямую, начиная с частоты, лишь немного превышающей  $f_s$ .

Характеристики Чебышева четвертого порядка в отличие от характеристик Баттерворта имеют в полосе воспроизведения небольшую неравномерность равной амплитуды, распределенную по частотному диапазону. В зависимости от значения неравномерности получаются различные характеристики, причем нижняя граничная частота громкоговорителя оказывается лежащей ниже собственной резонансной частоты головки. Аналитическое выражение для характеристик Чебышева четвертого порядка получают представлением и последующим преобразованием выражения для характеристики Баттерворта четвертого порядка в комплексной форме.

В вещественной форме выражение для характеристик Чебышева четвертого порядка совпадает с (17), где коэффициенты  $y_1$  и  $y_3$  принима-

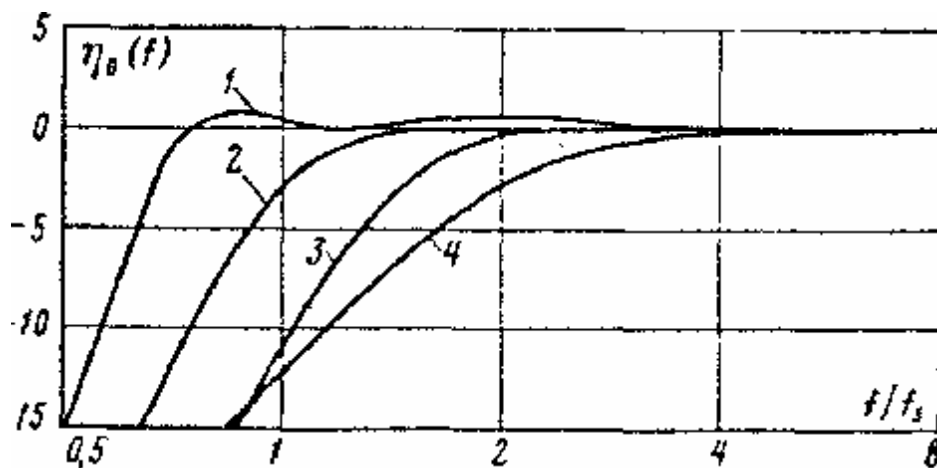


Рис. 4. Различные типы гладких частотных характеристик громкоговорителей.

1 — характеристика Чебышева четвертого порядка с параметрами ( $Q_t = 0,5$ ;  $V_{as}/V = 0,61$ ;  $f_b/f_s = 0,78$ ); 2 — характеристика Баттерворта четвертого порядка с параметрами ( $Q_t = 0,383$ ;  $V_{as}/V = 1,41$ ;  $f_b/f_s = 1$ ); 3 — характеристика квази-Баттерворта третьего порядка с параметрами ( $Q_t = 0,3$ ;  $V_{as}/V = 3,02$ ;  $f_b/f_s = 1,25$ ); 4 — характеристика, гладкая до второго порядка, с параметрами ( $Q_t = 0,353$ ;  $V_{as}/V = 3,02$ ;  $f_b/f_s = 0$ ).

ют отрицательные, а  $y_2$  и  $y_4$  положительные значения. Условия для  $y$  удовлетворяются при соотношениях параметров  $Q_t > 0,383$ ,  $f_b < f_s$ ,  $V_{as}/V < 1,41$ .

На рис. 4 приведены примеры некоторых типов гладких частотных характеристик громкоговорителя. Кривые построены для одной и той же низкочастотной головки (с одними и теми же  $f_s$  и  $V_{as}$ ) и демонстрируют таким образом не только различие в типах характеристик, но и широкие возможности управления формой частотной характеристики за счет настройки акустического оформления и регулировки  $Q_t$ . Кривая 4 представляет собой характеристику Баттерворта второго порядка для оформления в виде закрытого ящика. Кривые 3, 2 и 1 соответствуют характеристикам квази-Баттерворта третьего порядка, Баттерворта и Чебышева четвертого порядка для ящиков-фазоинверторов. Анализ условий, приводящих к различным частотным характеристикам, показывает, что для получения наинизшей граничной частоты (кривая 1) требуется ящик-фазоинвертор наибольших размеров ( $V_{as}/V$  минимально). При одинаковых размерах оформлений ( $V_{as}/V$  равны) для громкоговорителя в виде закрытого ящика нижняя граничная частота оказывается лежащей выше, чем у громкоговорителя в виде ящика-фазоинвертора (кривые 4 и 3).

Кроме рассмотренных выше, сравнительно просто могут быть реализованы и другие известные типы гладких частотных характеристик, в том числе, соответствующие фильтрам Баттерворта и Чебышева более высоких порядков. Общий принцип их синтеза заключается в последовательном соединении с громкоговорителем (фильтром четвертого порядка) еще одного электрического фильтра, помещаемого обычно на входе усилителя мощности.

### Абсолютное значение коэффициента полезного действия

Помимо частотной характеристики, важным параметром громкоговорителя является его эффективность или коэффициент полезного действия. Последний сомножитель выражения (11) для гладких частотных характеристик (для частот выше резонансной) практически не отличается от 1.

Будем считать, следовательно, что в диапазоне  $f > f_s$

$$h = \frac{r}{4\pi c} \frac{B^2 l^2}{R_e M_{as} S_d^2}. \quad (33)$$

Перепишем это выражение, используя другую систему параметров громкоговорителя. Преобразуя выражения (10) и (19), можно получить следующее уравнение для общего  $Q$  головки:

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_a} + \frac{R_e}{Q_e (R_e + R_g)}, \quad (34)$$

где  $Q_a$  — общее  $Q$  головки на частоте резонанса, обусловленное активными потерями в подвижной системе:

$$Q_a = \frac{2\rho f_s M_{as}}{R_{as}}; \quad (35)$$

$Q_e$  — общее  $Q$  головки на частоте резонанса, обусловленное электромагнитным торможением звуковой катушки в зазоре магнитной системы:

$$Q_e = \frac{2pf_s M_{as} R_e S_d^2}{B^2 l^2}. \quad (36)$$

Выразив из уравнения (36)  $B^2 l^2 / R_e$  и подставив его в (33), получим:

$$h \gg \frac{rf_s}{2cQ_e M_{as}}. \quad (37)$$

Акустическую массу подвижной системы головки можно найти через резонансную частоту и акустическую гибкость или эквивалентный объем:

$$M_{as} = \frac{1}{(2pf_s)^2 C_{as}} = \frac{rc^2}{(2pf_s)^2 V_{as}}. \quad (38)$$

Подставляя (38) в (37) и принимая, что  $Q_t$  головки определяется в основном электромагнитным демпфированием, т. е.  $Q_t \approx Q_e$  при  $R_g=0$ , получаем следующее выражение для к. п. д.:

$$h \gg \frac{2p^2 f_s^3 V_{as}}{c^3 Q_t}. \quad (39)$$

Следовательно, абсолютное значение к. п. д. в эффективно воспроизводимом диапазоне частот оказывается зависящим только от тех параметров головки, которые определяют и частотную характеристику громкоговорителя.

Представляет интерес получить выражение для к. п. д. и через общие параметры громкоговорителя. Обозначив отношение  $V_{as}/V$  через  $a$ , а  $f_3/f_s$  через  $b$ , перепишем (39) в виде

$$h \gg \frac{2p^2 f_3^3 V a}{c^3 Q_t b^3}. \quad (40)$$

Анализ показывает что безразмерный коэффициент  $\frac{a}{Q_t b^3} = 3,4$

для всех типов гладких частотных характеристик. Обозначив его через  $k$ , получим:

$$h \gg \frac{2p^2 f_3^3 V}{c^3} k. \quad (41)$$

Таким образом, к. п. д. громкоговорителя прямо пропорционален объему ящика  $V$  и кубу нижней граничной частоты  $f_3$ . Из последнего выражения можно сделать ряд выводов.

Для заданного объема акустического оформления к. п. д. громкоговорителя уменьшается на 9 дБ, если воспроизводимый диапазон расширить на октаву в сторону нижних частот. Иначе говоря, для того чтобы сохранить одинаковую излучаемую акустическую мощность при расширении вниз частотного диапазона громкоговорителя, необходимо увеличивать мощность оконечного усилителя, причем каждая октава потребует увеличения подводимой мощности в 8 раз.



При уменьшении объема ящика-фазоинвертора вдвое при той же нижней граничной частоте к. п. д. громкоговорителя снижается в 2 раза. Следовательно, каким бы способом ни решалась задача уменьшения размеров громкоговорителя, в конечном счете для поддержания одинаковой излучаемой акустической мощности при одной и той же нижней граничной частоте потребуется усилитель, мощность которого во столько раз должна превышать мощность исходного усилителя, во сколько раз уменьшился объем оформления.

### **Три параметра низкочастотной головки громкоговорителя**

Заканчивая раздел, просуммируем те результаты, которые были получены при анализе работы головки громкоговорителя в ящике-фазоинверторе. Эквивалентная схема громкоговорителя в области низких частот, точнее, в области частот, где длина волны превышает окружность головки, после некоторых упрощений свелась к фильтру пропускания высоких частот четвертого порядка, что позволило получить сравнительно простое выражение (11) для частотной характеристики к.п.д. громкоговорителя.

Анализ, сделанный выше, показал, что в области поршневого действия частотная характеристика громкоговорителя [уравнение (17)] контролируется только тремя параметрами головки:  $Q_t$  — общим  $Q$  головки, обусловленным потерями в подвижной системе и потерями, внесенными при движении звуковой катушки в магнитном поле [см. (19)];  $C_{as}$  — акустической гибкостью головки или эквивалентным объемом  $V_{as}$  [см. (21)];  $f_s$  — собственной резонансной частотой головки в свободном воздухе [см. (12)]. Особенностью этих трех параметров является то обстоятельство, что они полностью определяют также и абсолютное значение к. п. д. громкоговорителя [см. (39)].

Кроме параметров головки, в выражение (17) для нормированной частотной характеристики к. п. д. вошли также параметры, характеризующие акустическое оформление: объем  $V$  и собственная резонансная частота или частота настройки  $f_b$  ящика-фазоинвертора. Говоря точнее, форма частотной характеристики громкоговорителя зависит от величин  $Q_t$ ,  $V_{as}/V$  и  $f_b/f_s$ . Ранее были рассмотрены методы получения гладких частотных характеристик, т. е. методы нахождения комбинации значений  $Q_t$ ,  $V_{as}/V$  и  $f_b/f_s$ , приводящих к характеристикам Баттерворта и Чебышева различных порядков.

## **НОМОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ**

### **Расчет акустического оформления**

В области низких частот работа громкоговорителя не зависит от формы ящика или типа фазоинвертора, а определяется лишь двумя параметрами акустического оформления — объемом ящика-фазоинвертора  $V$  и частотой его настройки  $f_b$ . К нахождению этих величин и сводится в основном расчет акустического оформления. Отправным пунктом для такого расчета может служить оговоренная

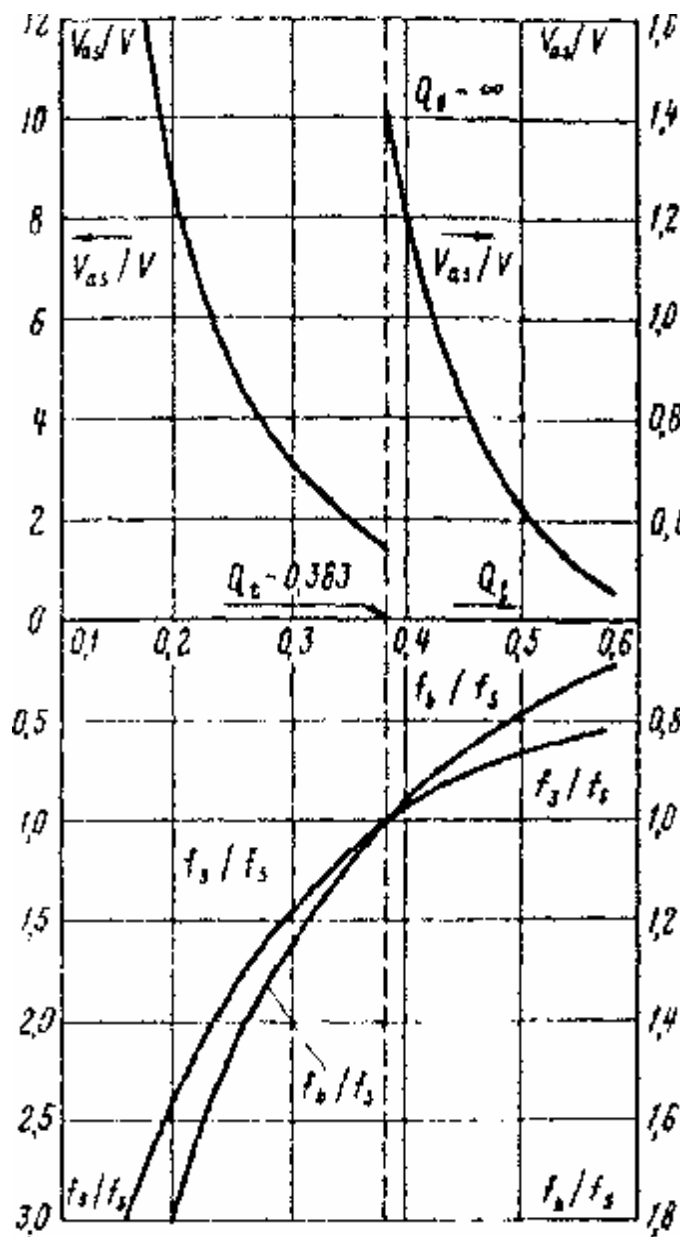


Рис. 5. Номограмма для расчета громкоговорителей с малыми потерями в акустическом оформлении.

если заранее ограничить круг частотных характеристик, которыми должны обладать проектируемые громкоговорители. Так, для наиболее интересных типов гладких частотных характеристик квази-Баттерворта третьего порядка, Баттерворта и Чебышева четвертого порядка взаимную зависимость параметров низкочастотной головки и акустического оформления удастся выразить графически в виде единой номограммы, изображенной на рис. 5.

В прямоугольной системе координат в функции от  $Q_t$  головки в верхней части номограммы представлена зависимость отношения объема, эквивалентного гибкости головки, к объему ящика-фазоинвертора  $V_{as}/V$ . Вообще говоря, плавная кривая  $V_{as}/V$  разбита в точке с абсциссой  $Q_t=0,383$  на две ветви с тем, чтобы увеличить точность считывания значений при малых  $V_{as}/V$ . В нижней части номограммы также в прямоугольной системе координат в функции от  $Q_t$  нанесены зависимости отношений частоты настройки ящика-фазоинвертора

форма частотной характеристики, которой должен обладать проектируемый громкоговоритель. Форма частотной характеристики уравнениями (17), (22)—(25) однозначно связана с определенной комбинацией численных значений величин  $Q_t$ ,  $V_{as}/V$  и  $f_b/f_s$ . Следовательно, решив уравнения (22)—(25) для определенных коэффициентов  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  и  $y_4$ , можно найти требуемые  $Q_t$ ,  $V_{as}/V$ ,  $f_b/f_s$ .

После подстановки в два последних отношения измеренных численных значений объема, эквивалентного акустической гибкости головки  $V_{as}$ , и собственной резонансной частоты  $f_s$  определяются объем оформления  $V$  и частота его настройки  $f_b$ .

Если требуемое значение  $Q_t$  отличается от вычисленного по формуле (34), для обеспечения точного значения нижней граничной частоты громкоговорителя необходима также дополнительная регулировка общего  $Q$  головки. Такой в общем виде весьма трудоемкий способ расчета акустического оформления может быть значительно упрощен,

и частоты среза громкоговорителя к собственной резонансной частоте головки в свободном воздухе —  $f_b/f_s$ , и  $f_3/f_s$ .

$Q_t$  однозначно определяет тип частотной характеристики, который может быть получен для данной низкочастотной головки. При  $Q_t < 0,383$  рассчитываемый громкоговоритель будет иметь частотную характеристику квази-Баттерворта третьего порядка, отличающуюся тем, что нижняя граничная частота находится выше собственной резонансной частоты головки ( $f_3/f_s > 1$ ). Для  $Q_t = 0,383$  частотная характеристика громкоговорителя окажется максимально гладкой (Баттерворта четвертого порядка), причем  $f_3 = f_s = f_b$ . Наконец, для  $Q_t > 0,383$  громкоговоритель будет обладать частотной характеристикой Чебышева четвертого порядка с частотой среза, лежащей ниже собственной резонансной частоты головки ( $f_3/f_s < 1$ ). Неравномерность в полосе воспроизведения для характеристик Чебышева возрастает с увеличением  $Q_t$ , однако для значений, указанных на номограмме, не превышает 2 дБ.

Для того чтобы уяснить методику расчета громкоговорителей с помощью номограммы, рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. Рассчитать оптимальное акустическое оформление для известной низкочастотной головки. Допустим, что с помощью измерений параметры головки определены:  $Q_a = 3,2$ ,  $Q_e = 0,33$ ,  $V_{as} = 0,120 \text{ м}^3$ ,  $f_s = 40$  Гц. При работе от усилителя с нулевым выходным сопротивлением ( $R_g = 0$ )  $Q_t$  головки (см. [34]) составит 0,3.

Отметим на оси абсцисс точку  $Q_t = 0,3$ , проведем через нее перпендикулярную оси прямую и найдем ординаты точек пересечения прямой с кривыми в верхней и нижней частях номограммы:  $V_{as}/V = 3$ ,  $f_b/f_s = 1,25$ ,  $f_3/f_s = 1,47$ . Подставляя в полученные отношения измеренные значения параметров головки  $V_{as} = 0,120 \text{ м}^3$ ,  $f_s = 40$  Гц, находим:  $V = 0,04 \text{ м}^3$ ,  $f_b = 50$  Гц,  $f_3 = 59$  Гц. Таким образом, если не принимать мер к дополнительному регулированию  $Q_t$ , для получения гладкой частотной характеристики громкоговорителя заданную головку достаточно поместить в ящик-фазоинвертор объемом  $0,04 \text{ м}^3$  и настроить его на частоту 50 Гц. Частота среза громкоговорителя при этом окажется равной 59 Гц.

Пример 2. Для той же исходной головки с  $Q_a = 3,2$ ,  $Q_e = 0,33$ ,  $V_{as} = 0,120 \text{ м}^3$ ,  $f_s = 40$  Гц требуется так рассчитать параметры ящика-фазоинвертора, чтобы частота среза громкоговорителя оказалась равной 35 Гц. При оговоренной частоте среза расчет начинается с определения  $f_3/f_s$ . В рассматриваемом случае  $f_3/f_s = 0,875$ . Далее через точку с ординатой 0,875 на кривой  $f_3/f_s$  проводится прямая, перпендикулярная оси абсцисс, и определяются координаты точек пересечения ее с кривыми  $V_{as}/V$  и  $f_b/f_s$ , т. е.  $Q_t = 0,415$ ,  $V_{as}/V = 1,05$ ,  $f_b/f_s = 0,93$ . Подставляя в полученные отношения значения параметров головки  $V_{as} = 0,12 \text{ м}^3$ ,  $f_s = 40$  Гц, находим  $V = 0,114 \text{ м}^3$ ,  $f_b = 37$  Гц.

Следовательно, для того чтобы получить гладкую частотную характеристику громкоговорителя с частотой среза  $f_3 = 35$  Гц, объем ящика-фазоинвертора должен составлять  $0,114 \text{ м}^3$ , а частота настройки - 37 Гц. Кроме того, поскольку требуемое значение общего  $Q$  головки отличается от измеренного (при работе от усилителя с нулевым выходным сопротивлением  $Q_t = 0,3$ ), для достижения желаемой формы частотной характеристики потребуется дополнительное регулирование этого параметра.

Пример 3. Дана низкочастотная головка ( $Q_a = 3,2$ ,  $Q_e = 0,33$ ,  $V_{as} = 0,12 \text{ м}^3$ ,  $f_s = 40$  Гц) и задан объем акустического оформления

$V=0,06 \text{ м}^3$ . Требуется рассчитать громкоговоритель, обладающий гладкой частотной характеристикой.

Определим отношение  $V_{as}/V=2$ . Через точку с ординатой 2 на кривой  $V_{as}/V$  проведем прямую, перпендикулярную оси абсцисс, и найдем координаты точек пересечения ее с кривыми  $f_b/f_s$  и  $f_3/f_s$ :  $Q_t=0,345$ ;  $f_b/f_s=1,1$ ;  $f_3/f_s=1,2$ . Подставляя в последние отношения значения параметров головки, находим  $f_b=44 \text{ Гц}$ ,  $f_3=48 \text{ Гц}$ .

Таким образом, чтобы с данной головкой и в ящике оговоренных размеров получить гладкую частотную характеристику громкоговорителя, потребуется настроить ящик-фазоинвертор на частоту  $f_b=44 \text{ Гц}$  и с помощью средств регулирования довести общее  $Q$  головки до значения 0,345.

## Способы регулирования $Q_t$

Как можно было убедиться из рассмотренных примеров, при построении громкоговорителя с заданной частотной характеристикой в общем случае требуется регулирование  $Q_t$  головки. Принципиальная возможность управления  $Q_t$  видна из анализа эквивалентной схемы рис.3 и выражений (10), (19), (34). Совершенно очевидно, что общее  $Q$  головки в значительной степени определяется выходным сопротивлением усилителя  $R_g$ . Способ регулирования  $Q_t$  с помощью подбора необходимого значения выходного сопротивления усилителя является универсальным, поскольку позволяет как уменьшить (при  $R_g<0$ ), так и увеличить (при  $R_g>0$ ) значение  $Q_t$  головки. Необходимое выходное сопротивление усилителя определяется следующим образом:

$$R_g = R_e \frac{Q_t Q_a}{(Q_a - Q_t) Q_e} - 1 \quad (42)$$

где  $Q_a$  и  $Q_e$  — измеренные значения;  $Q_t$  — требуемое значение общего  $Q$  головки.

При таком способе регулирования  $Q_t$  для примеров 2 и 3 (см. стр. 19) потребовались бы усилители с выходными сопротивлениями, составляющими 0,445 и 0,17 сопротивления головки постоянному току  $R_e$ .

На практике для головок с небольшими и слабыми магнитами измеренные значения  $Q_e$  оказываются столь велики, что  $Q_t$  при  $R_g=0$  вообще не попадает в область значений, указанную на номограмме. Требуемое значение  $Q_t$  для таких головок можно получить, используя усилители с отрицательным выходным сопротивлением. Сопротивление громкоговорителя во всем частотном диапазоне обычно не ниже  $R_e$ , поэтому условием стабильной работы усилителя можно считать  $R_e+R_g>0$ . Необходимое значение  $R_g<0$  достигается введением в схему усилителя отрицательной обратной связи по напряжению и положительной обратной связи по току (обратной связи по напряжению, пропорциональному выходному току). Замена знака обратной связи приводит к изменению знака  $R_g$ .

При очевидных достоинствах способ управления  $Q_t$  с помощью изменения выходного сопротивления усилителя обладает существенным недостатком. Им можно воспользоваться только тогда, когда ведется одновременное проектирование громкоговорителя и усилителя, при

этом усилитель оказывается пригодным для работы только с одним типом громкоговорителя.

Рассмотрим другие способы регулирования  $Q_t$  головки. Один из них весьма прост и заключается в соединении последовательно с головкой дополнительного сопротивления  $R'$ . В этом случае первое после источника сигнала сопротивление (см. рис. 3) будет

$$\frac{B^2 l^2}{(R_e + R_g + R\zeta) S_d^2},$$

в соответствии с чем изменяются выражения (10), (19) и (34) для  $R_{at}$  и  $Q_t$ . Если  $Q_a$  и  $Q_e$  головки измерены, дополнительное сопротивление, необходимое для получения требуемого значения  $Q_t$ , определяется следующим образом:

$$R\zeta = R_e \frac{Q_t Q_a}{(Q_a - Q_t) Q_e} - \frac{R_e + R_g}{R_e} \quad (43)$$

Для усилителя с нулевым выходным сопротивлением последнее выражение совпадает с (42). Однако в отличие от  $R_g$  дополнительно включенное активное сопротивление может принимать только положительные значения и, следовательно, с его помощью можно лишь увеличить общее  $Q$  головки. Таким образом, для примеров 2 и 3 регулирование  $Q_t$  может быть осуществлено также включением последовательно с головкой активных сопротивлений, равных  $0,445 R_e$  и  $0,17 R_e$ , соответственно.

Если оставить в стороне способ регулирования  $Q_t$  с помощью выходного сопротивления усилителя, задача уменьшения  $Q_t$  головки решается довольно сложно. Выше рассматривались способы регулирования  $Q_t$  за счет изменения сопротивления, вносимого при торможении звуковой катушки о магнитном поле [второго слагаемого в уравнении (10)]. В принципе имеется возможность уменьшить  $Q_t$  и за счет увеличения общего акустического сопротивления головки [первого слагаемого в уравнении (10)].

Увеличить  $R_{as}$  — акустическое сопротивление, возникающее за счет потерь на трение в подвижной системе головки, можно, например, нанося слой вязкой смазки на верхний подвес или часть диффузора. Однако производить какие-либо изменения в подвижной системе головки крайне нежелательно. Они могут привести к увеличению нелинейности подвеса или повлечь за собой ухудшение работы головки на средних или верхних частотах. Кроме того, механический способ регулирования  $Q_t$  неудобен тем, что не оставляет возможности вернуться к исходному состоянию головки.

Известно, что сопротивление  $R_{as}$  и, следовательно,  $Q_t$  зависит не только от механических потерь в подвижной системе головки, но и от так называемых акустических потерь, возникающих при движении соколеблющейся массы воздуха. Явление акустического демпфирования подвижной системы головки заключается в том, что при определенных внешних акустических условиях присоединенная масса воздуха, соколеблющаяся вместе с диффузором, может терять часть своей энергии.

Практически демпфирование осуществляется следующим образом. С тыльной стороны головки все свободные промежутки в диффузородержателе плотно закрываются одним или более слоями жесткого, перфорированного мелкими отверстиями материала — дюралюминия, пластмассы и т. д. (толщиной 1-3 мм).

Воздух, заключенный между тыльной стороной диффузора и кожухом, при колебаниях диффузора вытесняется через отверстия, и часть энергии этого движения переходит в тепло.

Акустическое демпфирование при прочих равных условиях происходит тем интенсивнее, чем ближе к подвижной системе находится закрывающий ее перфорированный или жесткий пористый материал. Ясно поэтому, что, хотя и можно осуществить демпфирование подвижной системы головки с помощью единого колпака, закрывающего сзади всю головку вместе с диффузородержателем, эффективность его действия не будет высокой.

Способ акустического демпфирования подвижной системы головки позволяет в широких пределах изменять значение  $Q_t$ . К сожалению, из-за разнообразия в конфигурациях диффузородержателей способ не поддается предварительному расчету и для получения необходимого значения  $Q_t$  требуется экспериментальный подбор демпфирующего материала.

### Потери в акустическом оформлении

При составлении эквивалентной схемы громкоговорителя (см. рис. 3) в последующих вычислениях, формулах и при построении номограммы предполагалось, что активные потери, вносимые ящиком-фазоинвертором, много меньше потерь в подвижной системе головки или потерь, обусловленных торможением звуковой катушки в магнитном поле. Иначе говоря, было принято, что  $Q$  акустического оформления  $Q_b$  много больше  $Q_a$  и  $Q_e$ . Действительно, в правильно сконструированных громкоговорителях  $Q_b$  в десятки раз превосходит  $Q_e$ , и, следовательно, расчет по формуле (17) или номограмме рис. 5 справедлив с точностью до нескольких процентов.

Для того чтобы убедиться в правильности расчетов, необходимо прежде всего оценить потери, вносимые акустическим оформлением. В тех же случаях, когда соотношение  $Q_b \gg Q_e$  не выполняется, задачу расчета громкоговорителя следует решать в общем виде с учетом потерь в акустическом оформлении.

Строго говоря, потери в ящике-фазоинверторе могут быть вызваны тремя различными причинами: щелями и отверстиями в ящике, звукопоглощением внутри ящика или в фазоинверсном отверстии. Указанные потери на полной эквивалентной схеме громкоговорителя (см. рис. 2) представлены акустическими сопротивлениями  $R_{ab}$ ,  $R_{ab}$ ,  $R_{ap}$  и могут быть пересчитаны в соответствующие  $Q$ :  $Q_b$ ,  $Q_{ab}$  и  $Q_p$ .

$Q_b$  — общее  $Q$  акустического оформления определяется из выражения:

$$\frac{1}{Q_b} = \frac{1}{Q_l} + \frac{1}{Q_{ab}} + \frac{1}{Q_p}. \quad (44)$$

Как показали многочисленные измерения, наибольший вклад в  $Q_b$  вносят активные потери, возникающие за счет трения при колебаниях воздуха в щелях и отверстиях ящика. Щели в ящике могут быть образованы некачественным соединением стенок, незаделанными отверстиями из-под болтов, шурупов или выходных концов от головок, недостаточно плотным креплением головки к передней панели.

Рис. 6. Частотные характеристики громкоговорителя с различными щелевыми потерями в акустическом оформлении.

1—  $Q_l = \infty$  (без потерь);  
 2—  $Q_l = 10$ ; 3—  $Q_l = 5$ ; 4—  
 $Q_l = 3$  (основные параметры громкоговорителя:  $Q_t = 0,5$ ;  $V_{as}/V = 0,61$ ;  $f_b/f_s = 0,78$ ).

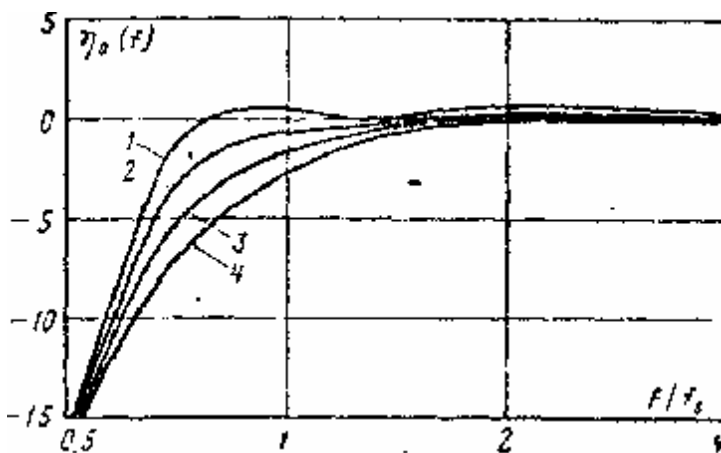


Рис. 7. Частотные характеристики громкоговорителя с различными акустическими потерями в ящике.

1—  $Q_{ab} = \infty$  (без потерь);  
 2—  $Q_{ab} = 10$ ; 3—  $Q_{ab} = 5$ ;  
 4—  $Q_{ab} = 3$  (основные параметры громкоговорителя:  $Q_t = 0,5$ ;  $V_{as}/V = 0,61$ ;  $f_b/f_s = 0,78$ ).

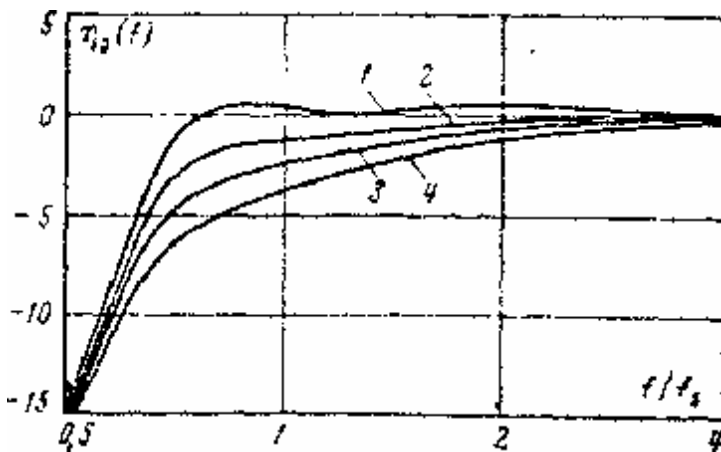
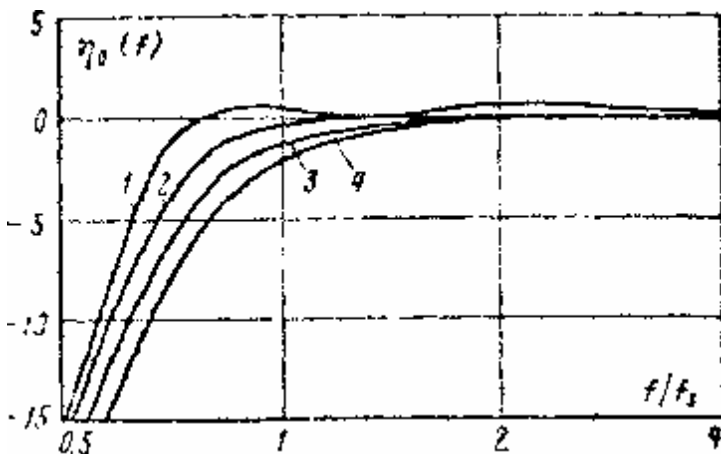


Рис. 8. Частотные характеристики громкоговорителя с различными потерями в трубе инвертора.

1—  $Q_p = \infty$  (без потерь); 2—  
 $Q_p = 10$ ; 3—  $Q_p = 5$ ; 4—  $Q_p = 3$   
 (основные параметры громкоговорителя:  $Q_t = 0,5$ ;  
 $V_{as}/V = 0,61$ ;  $f_b/f_s = 0,78$ ).



К группе щелевых потерь акустического оформления относятся и потери, возникающие за счет утечки воздуха через неплотную подвижную систему головки, например через верхний подвес или центрирующую шайбу и пылезащитный колпачок. Отсюда следует, что щелевые потери в громкоговорителе могут оставаться достаточно высокими даже при самом тщательном исполнении ящика-фазоинвертора. Обычно в зависимости от качества исполнения ящика и низкочастотной головки  $Q_b$  находится в пределах 3—30. У громкоговорителей с так называемыми «крепкими» ящиками, все «швы» которых, включая место крепления головки, промазаны изнутри мастикой или пластилином,  $Q_b$  не опускается ниже 10.

В ящиках-фазоинверторах без звукопоглощающего материала внутри ящика или в фазоинверсном отверстии  $Q_{ab}$  и  $Q_p$  много больше  $Q_l$  и имеют значения:  $Q_{ab} > 100$ ,  $Q_p > 50$ .

Даже при наличии на стенках ящика небольшого количества звукопоглощающего материала, применяемого для предотвращения образования стоячих волн и сглаживания частотной характеристики в области средних частот,  $Q_{ab}$  остается достаточно высоким (большим 30). Потери внутри ящика оказываются значительными (соответствующие  $Q_{ab}$  снижаются до 3—5) лишь при плотном заполнении ящика звукопоглощающим материалом.

Малые значения  $Q_p$  типичны для громкоговорителей, у которых выходные отверстия инверторов закрыты либо специальными панелями акустического сопротивления, либо плотной декоративной тканью.

На рис. 6—8 приведены частотные характеристики громкоговорителей с различными потерями в акустическом оформлении. Как следует из рассмотрения кривых, при любом типе поглощения для  $Q_b \leq 10$  частотная характеристика громкоговорителя столь заметно отличается от соответствующей характеристики громкоговорителя без потерь ( $Q_b = \infty$ ), что расчет акустического оформления по номограмме рис. 5 становится неудовлетворительным.

### Расчет громкоговорителей с учетом потерь в акустическом оформлении

Выражение для частотной характеристики громкоговорителя с учетом потерь в акустическом оформлении может быть получено при анализе рис. 2 тем же способом, который был использован при выводе уравнения (11).

Однако в общем виде, с учетом всех типов потерь это выражение оказывается слишком громоздким. Полагая, что при правильном построении громкоговорителя поглощение внутри ящика и в фазоинверсном отверстии относительно невелико, можно ограничиться рассмотрением только щелевых потерь в акустическом оформлении,

В случае, когда  $Q_b = Q_l$ , уравнение для частотной зависимости приведенного к. п. д. совпадает с уравнением (17) для частотной характеристики громкоговорителя без потерь. Выражения для коэффициентов  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ ,  $y_4$  отличаются от (22)—(25) и являются сложными функциями  $Q_l$ ,  $V_{as}/V$ ,  $f_b/f_s$  и  $Q_l$ .

Неизменность общего вида выражения для частотной характеристики при любом  $Q_l$  позволяет рассчитывать громкоговорители с такими же типами гладких частотных характеристик, которые получались при расчете громкоговорителей без потерь в акустическом оформлении. При подстановке численного значения  $Q_l$  в уравнения для коэффициентов  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ ,  $y_4$  остаются три переменные величины  $Q_l$ ,  $V_{as}/V$ ,  $f_b/f_s$ , взаимную зависимость которых, пользуясь уже известными приемами, можно выразить в виде номограмм. Такие номограммы для  $Q_l = 10$  и  $Q_l = 5$  приведены на рис. 9 и 10 соответственно. Следовательно, если в результате предварительных измерений потери в ящике известны и оцениваются  $Q_l > 10$ ,  $Q_l = 10$  или  $Q_l = 5$ , расчет параметров ящика-фазоинвертора следует вести по номограммам рис. 5, 9 или 10.

Методика расчета по номограммам рис. 9 и 10 полностью совпадает с методикой, рассмотренной ранее. Потери в ящике могут оказаться и



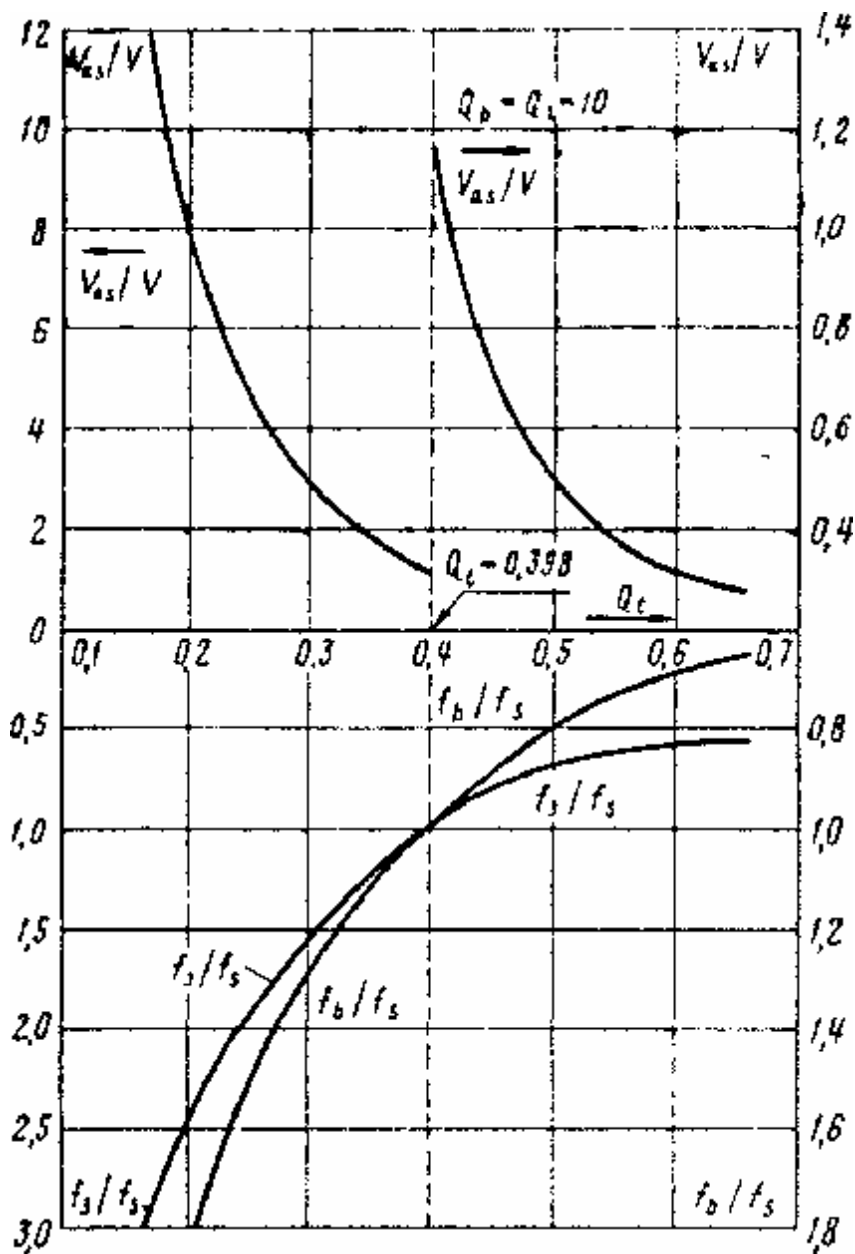


Рис. 9. Номограмма для расчета громкоговорителей с потерями в акустическом оформлении ( $Q_b = Q_l = 10$ ).

отличными от значения, для которых построены номограммы. В этих случаях для нахождения соответствующих параметров ящика-фазоинвертора и громкоговорителя можно воспользоваться приемом интерполяции. Рассмотрим применение этого способа на конкретных примерах.

Пример 1. Требуется рассчитать ящик-фазоинвертор для головки, параметры которой по результатам предварительных измерений составляют:  $Q_a = 4,2$ ;  $Q_e = 0,36$ ;  $f_s = 35$  Гц;  $V_{as} = 0,08$  м<sup>3</sup>.

Поскольку во время измерений головка помещается в некоторый произвольного размера испытательный ящик-фазоинвертор, оказывается возможным предварительно оценить и  $Q_b$ . Строго говоря, полученное значение  $Q_b$  относится непосредственно к измерительному ящику. Однако можно принять, что в окончательном варианте акустического оформления рассчитываемого громкоговорителя  $Q_b$  не изменится, так как при тщательном исполнении ящиков-фазоинверторов потери в них характеризуют в основном эффект «продуваемости» низкочастотной головки.

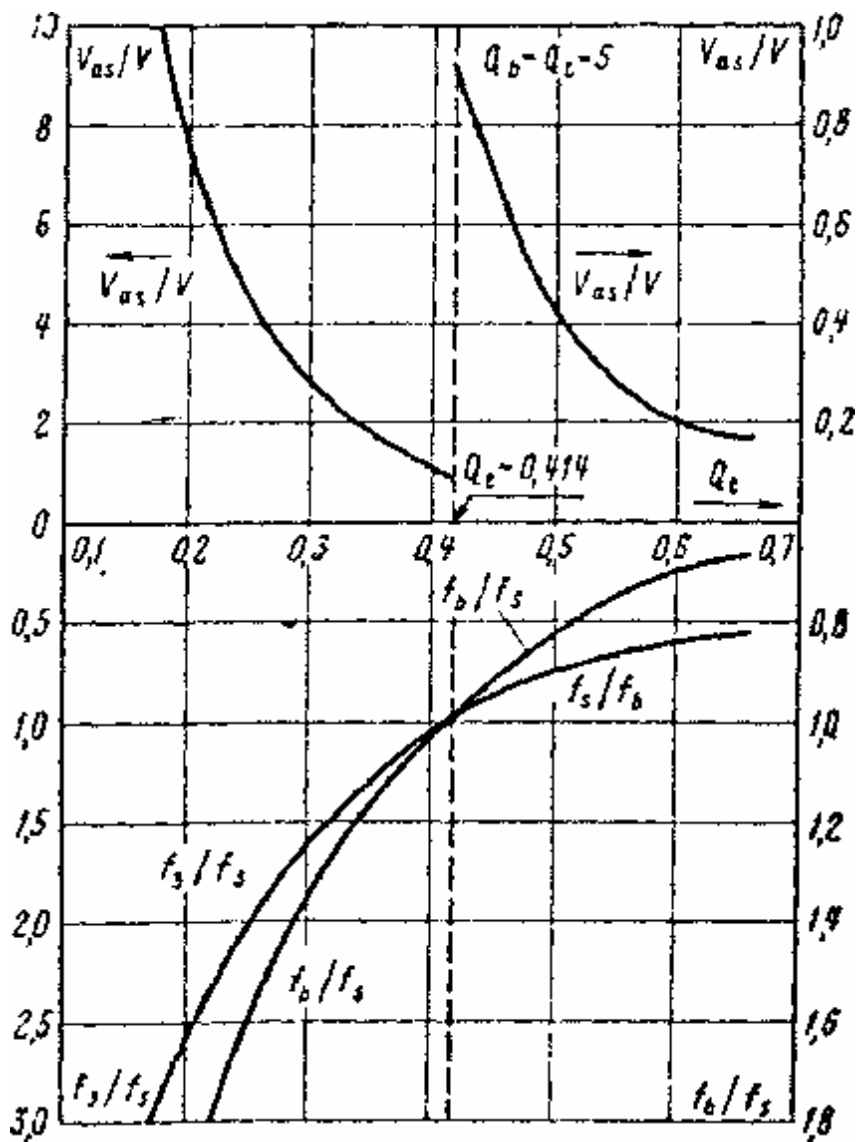


Рис. 10. Номограмма для расчета громкоговорителей с потерями в акустическом оформлении ( $Q_b = Q_l = 5$ ).

Допустим, что в нашем примере  $Q_b = 6$ . Для такого значения нет готовых графиков расчета, поэтому воспользуемся методом усреднения данных, содержащихся в номограммах для  $Q_b = \infty, 10, 5$ .

В рассматриваемой задаче не оговорены частота среза громкоговорителя  $f_3$  или объем ящика  $V$ , т. е. ищется решение акустического оформления, при котором нет необходимости регулировать  $Q_l$  головки. В этом смысле данный пример подобен примеру 1 (см. с. 19) и решается аналогичным образом. Для головки с  $Q_a = 4,2$  и  $Q_e = 0,36$  при работе от усилителя, выходное сопротивление которого  $R_g = 0$ , в соответствии с уравнением (34)  $Q_l = 0,33$ . Это значение наряду с параметрами  $f_s = 35$  Гц,  $V_{as} = 0,08$  м<sup>3</sup>,  $Q_b = 6$  примем в качестве исходного для расчета ящика-фазоинвертора.

На каждой из трех номограмм (см. рис. 5, 9 и 10) через точку с абсциссой 0,33 проводим вертикальную прямую и отмечаем ординаты точек пересечения ее с кривыми  $V_{as}/V$ ,  $f_b/f_s$ ,  $f_3/f_s$ .

Находим для  $Q_b = \infty$ :  $V_{as}/V = 2,25$ ,  $f_b/f_s = 1,15$ ,  $f_3/f_s = 1,28$ ; для  $Q_b = 10$ :  $V_{as}/V = 2,15$ ,  $f_b/f_s = 1,18$ ,  $f_3/f_s = 1,34$ ; для  $Q_b = 5$ :  $V_{as}/V = 2,1$ ,  $f_b/f_s = 1,25$ ,  $f_3/f_s = 1,41$ .

Полученную зависимость параметров громкоговорителя от значений  $Q_b$  можно выразить графически (рис. 11, а, б, в). В каждом из

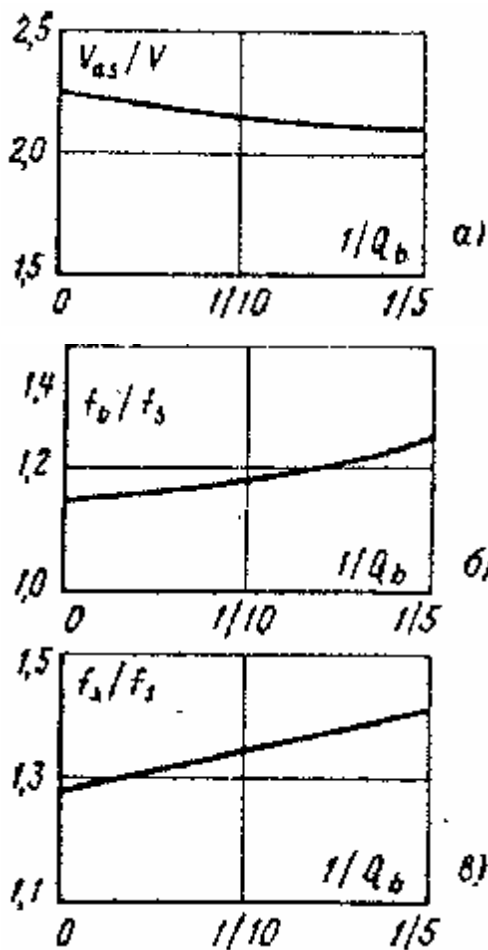


Рис. 11. Зависимость параметров  $V_{as}/V$ ,  $f_b/f_s$ ,  $f_3/f_s$  от  $1/Q_b$  для головки громкоговорителя с  $Q_t = 0,33$ .

отношения значения;  $V_{as} = 0,08 \text{ м}^3$  и  $f_s = 35 \text{ Гц}$ , находим окончательно  $V = 0,038 \text{ м}^3$ ,  $f_b = 43 \text{ Гц}$ ,  $f_3 = 49 \text{ Гц}$ .

Таким образом, с учетом потерь в акустическом оформлении найдены объем и частота настройки ящика-фазоинвертора, обеспечивающие для данной головки гладкую частотную характеристику. Заметим, что если бы расчет ящика-фазоинвертора производился без учета потерь в оформлении по номограмме рис. 5, решение  $V = 0,035 \text{ м}^3$ ,  $f_b = 40 \text{ Гц}$ ,  $f_3 = 45 \text{ Гц}$  привело бы к частотной характеристике громкоговорителя с завалом в области частот выше  $f_b$ , т. е. к характеристике, подобной кривой 2 или 3 на рис. 6. Найденные же выше параметры ящика-фазоинвертора с учетом потерь в оформлении дают возможность получить действительно гладкую частотную характеристику (типа кривой 1 на рис. 6). Компенсация спада частотной характеристики осуществляется за счет изменения объема и частоты настройки ящика-фазоинвертора, что приводит одновременно к некоторому увеличению частоты среза громкоговорителя.

Пример 2. Для заданной низкочастотной головки требуется рассчитать громкоговоритель с гладкой частотной характеристикой и частотой среза  $f_3 = 35 \text{ Гц}$ . Параметры головки и потери в акустическом оформлении те же, что и в предыдущем примере:  $Q_a = 4,2$ ;  $Q_e = 0,36$ ;  $f_s = 35 \text{ Гц}$ ;  $V_{as} = 0,08 \text{ м}^3$ ,  $Q_b = 6$ .

При оговоренном значении  $f_3$  расчет громкоговорителя начинается с определения отношения  $f_3/f_s = 1$ . По аналогии с примером 2

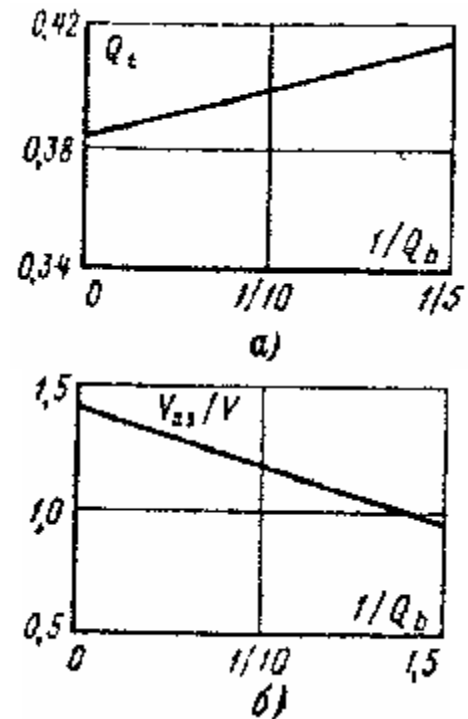


Рис. 12. Зависимость параметров  $Q_t$  и  $V_{as}/V$  от  $1/Q_b$  для громкоговорителя с  $f_3/f_s = 1$ .

графиков нетрудно отыскать значение параметра, соответствующее  $Q_b = 6$ , т. е.  $V_{as}/V = 2,11$ ,  $f_b/f_s = 1,22$ ,  $f_3/f_s = 1,39$ . Подставляя в последние

(см. стр. 19) на каждой из номограмм рис. 5, 9, 10 через точку с ординатой 1 на кривой  $f_3/f_s$  проводится вертикальная прямая и отмечаются координаты точек пересечения ее с кривыми  $V_{as}/V$  и  $f_b/f_s$ . Получаем для  $Q_b = \infty$ :  $Q_t = 0,383$ ,  $V_{as}/V = 1,41$ ,  $f_b/f_s = 1$ ; для  $Q_b = 10$ :  $Q_t = 0,398$ ,  $V_{as}/V = 1,17$ ,  $f_b/f_s = 1$ ; для  $Q_b = 5$ :  $Q_t = 0,414$ ,  $V_{as}/V = 0,95$ ,  $f_b/f_s = 1$ .

Построив графики зависимостей параметров от  $1/Q_b$  (рис. 12, а и б), определим для  $Q_b = 6$ :  $Q_t = 0,408$  и  $V_{as}/V = 1$ . Отношение  $f_b/f_s$  в данном примере равно 1 для любых  $f_b/f_s$ , в том числе и для  $Q_b = 6$ . Таким образом, из расчета следует, что для получения гладкой частотной характеристики с частотой среза  $f_3 = 35$  Гц необходимо обеспечить следующее соотношение параметров головки и акустического оформления:  $Q_t = 0,408$ ,  $V_{as}/V = 1$ ,  $f_b/f_s = 1$ . Подставляя в последние отношения  $V_{as} = 0,08 \text{ м}^3$  и  $f_s = 35$  Гц, находим объем  $V = 0,08 \text{ м}^3$  и частоту настройки  $f_b = 35$  Гц ящика-фазоинвертора. Получить нужное значение  $Q_t$  можно, включив последовательно с головкой активное сопротивление, которое при работе громкоговорителя от усилителя с  $R_g = 0$  находим по формуле (43). Оно составляет  $0,26 R_e$ .

Найденное решение дает возможность получить максимально-гладкую характеристику ( $f_s = f_b = f_3$ ), однако по сравнению с громкоговорителем,  $Q_b$  которого равно  $\infty$ , для компенсации потерь в акустическом оформлении требуется в 1,41 раза больший по объему ящик-фазоинвертор и несколько большее значение  $Q_t$  головки.

### **Частотные характеристики громкоговорителей с неоптимальными соотношениями параметров**

Вследствие неточности измерений параметров головки, ошибок в расчетах или в конструкции ящика частотная характеристика громкоговорителя может отличаться от идеальной кривой заданного типа. С учетом потерь в акустическом оформлении частотная характеристика громкоговорителя в области низких частот определяется значениями четырех параметров:  $Q_t$ ,  $V_{as}/V$ ,  $f_b/f_s$ ,  $Q_b$ . Любое отклонение от оптимального значения (номинального значения для известной характеристики) одной или более из перечисленных величин в принципе ведет к изменению формы частотной характеристики.

На рис. 6—8 показано, как искажается частотная характеристика громкоговорителя при несоблюдении номинального значения  $Q_b$ . Номинальным для характеристик рис. 6—8 являлось  $Q_b = \infty$ . Аналогичным образом могут быть построены частотные характеристики громкоговорителей, для которых одна из величин  $Q_t$ ,  $V_{as}/V$  или  $f_b/f_s$  не соответствует оптимальному значению (рис. 13—15).

На этих рисунках номинальными значениями, приводящими к частотной характеристике Чебышева четвертого порядка, являются:  $Q_t = 0,5$ ,  $Q_b = \infty$ ,  $V_{as}/V = 0,61$ ,  $f_b/f_s = 0,78$ .

Кривая 4 на рис. 13, 14 и кривая 3 на рис. 15 изображают частотную характеристику громкоговорителя с оптимальными соотношениями параметров, а прочие кривые соответствуют характеристикам громкоговорителя, один из параметров которого в 1,2; 1,5 или 2 раза отличается от номинального значения.

Как следует из рис. 13, увеличение или уменьшение значения  $Q_t$  относительно номинального приводит к появлению пика или провала в частотной характеристике. Положение этого экстремума совпа-

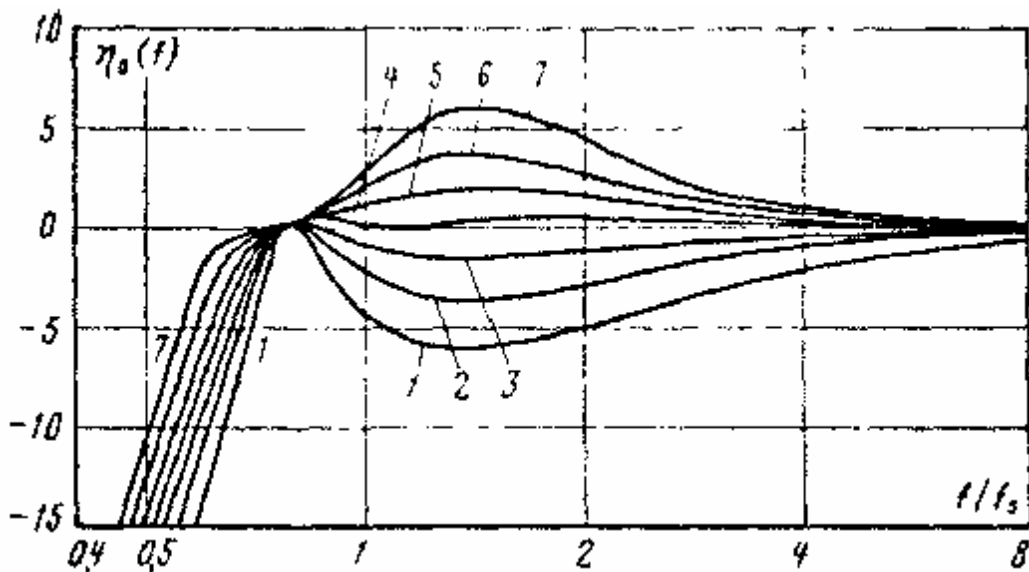


Рис. 13. Зависимость частотных характеристик от значений  $Q_t$ .  
 1 —  $Q_t = 0,25$ ; 2 —  $Q_t = 0,33$ ; 3 —  $Q_t = 0,416$ ; 4 —  $Q_t = 0,5$ ; 5 —  $Q_t = 0,6$ ; 6 —  $Q_t = 0,75$ ; 7 —  $Q_t = 1$  (основные параметры громкоговорителя:  $Q_b = \infty$ ,  $Q_t = 0,5$ ,  $V_{as}/V = 0,61$ ,  $f_b/f_s = 0,78$ ).

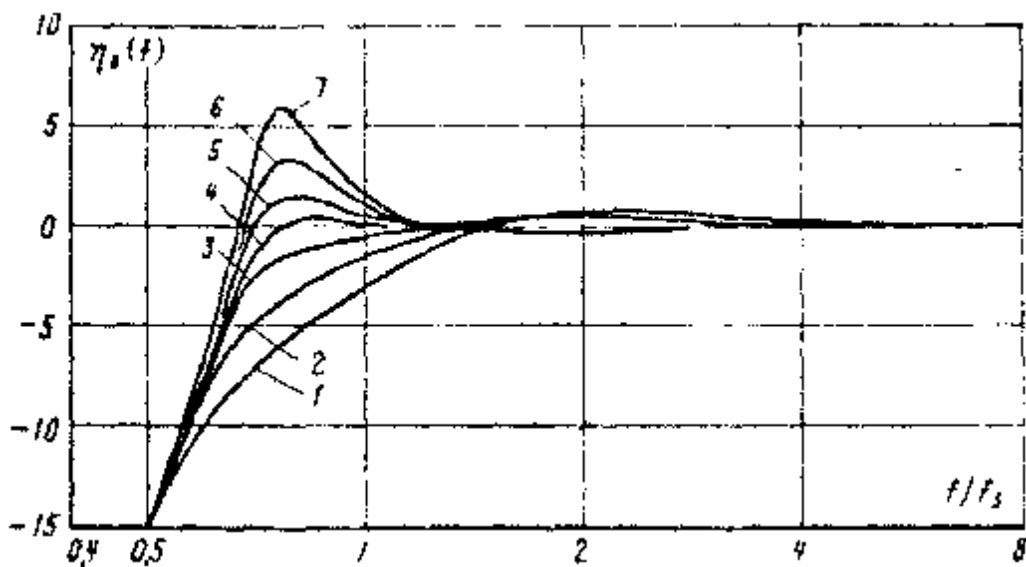


Рис. 14. Зависимость частотных характеристик громкоговорителя от значений  $V_{as}/V$ .  
 1 —  $V_{as}/V = 1,22$ ; 2 —  $V_{as}/V = 0,913$ ; 3 —  $V_{as}/V = 0,73$ ; 4 —  $V_{as}/V = 0,61$ ; 5 —  $V_{as}/V = 0,507$ ; 6 —  $V_{as}/V = 0,407$ ; 7 —  $V_{as}/V = 0,305$  (основные параметры громкоговорителя:  $Q_b = \infty$ ,  $Q_t = 0,5$ ,  $V_{as}/V = 0,61$ ,  $f_b/f_s = 0,78$ ).

дает с положением второго максимума частотной характеристики модуля полного электрического сопротивления громкоговорителя. Таким образом, при  $Q_t$ , превышающем номинальное значение  $Q_{t \text{ ном}}$ , происходит подъем частотной характеристики тем больший, чем выше отношение  $Q_t/Q_{t \text{ ном}}$ . При  $Q_t/Q_{t \text{ ном}} = 2$  высота пика составит 6 дБ, а при  $Q_t/Q_{t \text{ ном}} = 4$  составит 12 дБ. Наоборот, когда головка громко-

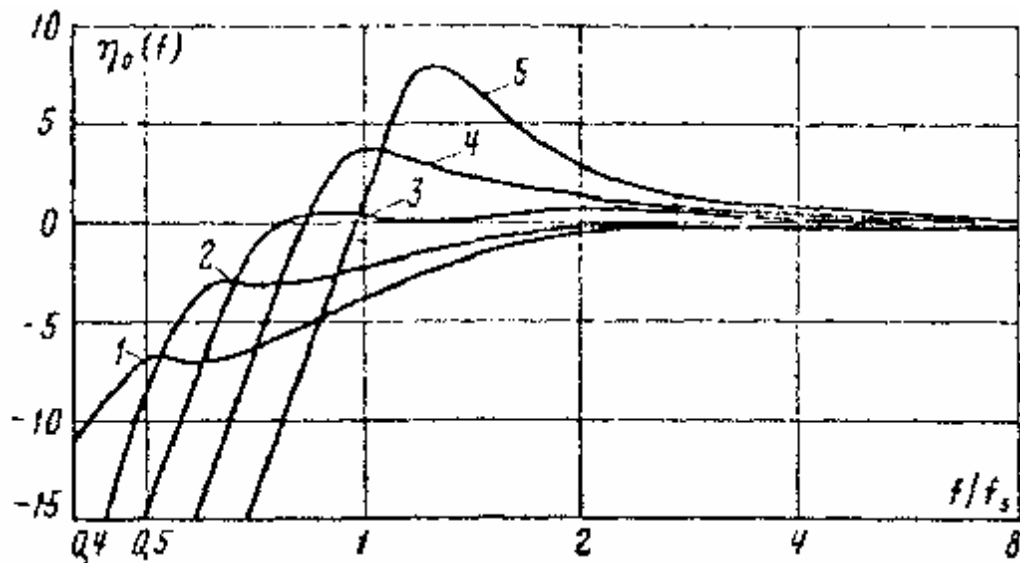


Рис. 15. Зависимость частотных характеристик громкоговорителя от значений  $f_b/f_s$ .

1 —  $f_b/f_s = 0,52$ ; 2 —  $f_b/f_s = 0,65$ ; 3 —  $f_b/f_s = 0,78$ ; 4 —  $f_b/f_s = 0,935$ ; 5 —  $f_b/f_s = 1,17$  (основные параметры громкоговорителя:  $Q_b = \infty$ ;  $Q_t = 0,5$ ;  $V_{as}/V = 0,61$ ;  $f_b/f_s = 0,78$ ).

говорителя передемпфирована, в частотной характеристике образуется провал с глубиной в 6 или 12 дБ при  $Q_t/Q_{t\text{ном}} = 1/2$  или  $Q_t/Q_{t\text{ном}} = 1/4$ .

Отклонение от номинального значения отношения  $V_{as}/V$  сказывается главным образом на форме частотной характеристики громкоговорителя вблизи собственной резонансной частоты ящика-фазоинвертора  $f_b$  (см. рис. 14). Для громкоговорителя с объемом ящика, превышающим расчетное значение, образующийся подъем в частотной характеристике приводит к повышенным переходным искажениям и субъективному ощущению «бубнежки». С уменьшением объема ящика диапазон воспроизведения низких частот сужается, частота среза  $f_3$  увеличивается.

В не меньшей степени частота среза громкоговорителя оказывается зависящей от отношения собственной резонансной частоты ящика-фазоинвертора к собственной резонансной частоте головки в свободном воздухе  $f_b/f_s$  (см. рис. 15). Интересно отметить, что отклонение от номинального значения  $f_b/f_s$  в любую сторону ведет к увеличению  $f_3$ . Таким образом, оптимальная настройка ящика-фазоинвертора обеспечивает наименьшую, возможную для данных  $Q_t$ ,  $Q_b$  и  $V_{as}/V$  частоту среза громкоговорителя.

### Номограмма для расчета низкочастотных головок громкоговорителей

Как можно было убедиться на рассмотренных ранее примерах, для построения громкоговорителя с заданной частотной характеристикой необходимо прибегать к сложной процедуре управления  $Q_t$  головки. Не всегда при этом глубина регулирования оказывается достаточной, чтобы обеспечить требуемое значение параметра. Даже если  $Q_t$  головки не превышает 0,6 и имеется принципиальная возможность получить один

из типов гладких или почти гладких характеристик громкоговорителя, нет гарантии, что расчет не приведет к акустическому оформлению неприемлемо больших размеров. Эти и другие примеры могут служить еще одним подтверждением, что для многих низкочастотных головок параметры, характеризующие поведение громкоговорителя в области поршневого действия ( $Q_t, f_s, V_{as}$ ), не являются оптимальными. Между тем знание соотношений, связывающих параметры головки и акустического оформления и приводящих к частотным характеристикам с известными частотами среза, позволяет разумно подойти к выбору этих величин на стадии проектирования головки.

В самом деле, пользуясь номограммой, показанной на рис. 5, нетрудно найти резонансную частоту  $f_s$ , и объем, эквивалентный гибкости  $V_{as}$ , которыми должна обладать головка, чтобы в ящике-фазоинверторе заданного объема  $V$  получить частотную характеристику с известной частотой среза  $f_3$  и определенного типа (с конкретным  $Q_t$ ). Найденные из графиков рис. 5 параметры головки  $f_s$  и  $V_{as}$  вместе с заданным  $Q_t$  хотя и являются достаточными для получения требуемой частотной характеристики громкоговорителя, но служат лишь отправными пунктами для выбора и расчета прочих конструктивных и электроакустических параметров низкочастотной головки.

Пользуясь известными формулами и исходя из найденных численных значений  $Q_t, f_s, V_{as}$ , можно определить механическую гибкость  $C_{ms}$  и массу подвижной системы  $M_{ms}$ , произведение индукции в магнитном зазоре на длину провода звуковой катушки  $Bl$ :

$$C_{ms} = \frac{V_{as}}{rc^2 S_d^2}; \quad (45)$$

$$M_{ms} = \frac{1}{4p^2 f_s^2 C_{ms}}; \quad (46)$$

$$Bl \gg \frac{\alpha M_{ms} 2pf_s R_e}{Q_t} \cdot \frac{\delta^{1/2}}{\delta}, \quad (47)$$

где  $S_d$  — эффективная площадь диффузора с номинальным диаметром головки  $D$ .

Вследствие некоторой свободы в выборе исходных данных ( $Q_t, f_3, V, R_e, D$ ) и невозможности на практике реализовать любое полученное решение (например, из-за слишком малого значения динамической массы  $M_{ms}$  или слишком большого значения  $Bl$ ) появляется необходимость вести расчет головки для целого набора исходных данных и затем выбрать подходящее решение. Поиск оптимального варианта низкочастотной головки упрощается, если взаимную зависимость параметров громкоговорителя и головки выразить в виде единой номограммы.

На рис. 16 семейства кривых частот среза  $f_3$ , равных  $Q_t$  и  $Bl$ , изображены в прямоугольной системе координат, по осям ординат и абсцисс которой в линейном масштабе отложены соответственно резонансная частота головки в свободном воздухе  $f_s$  и величина, пропорциональная механической массе подвижной системы:

$$M^* = M_{ms} \frac{V \alpha 0,2 \delta^4}{0,01 \delta D \delta},$$

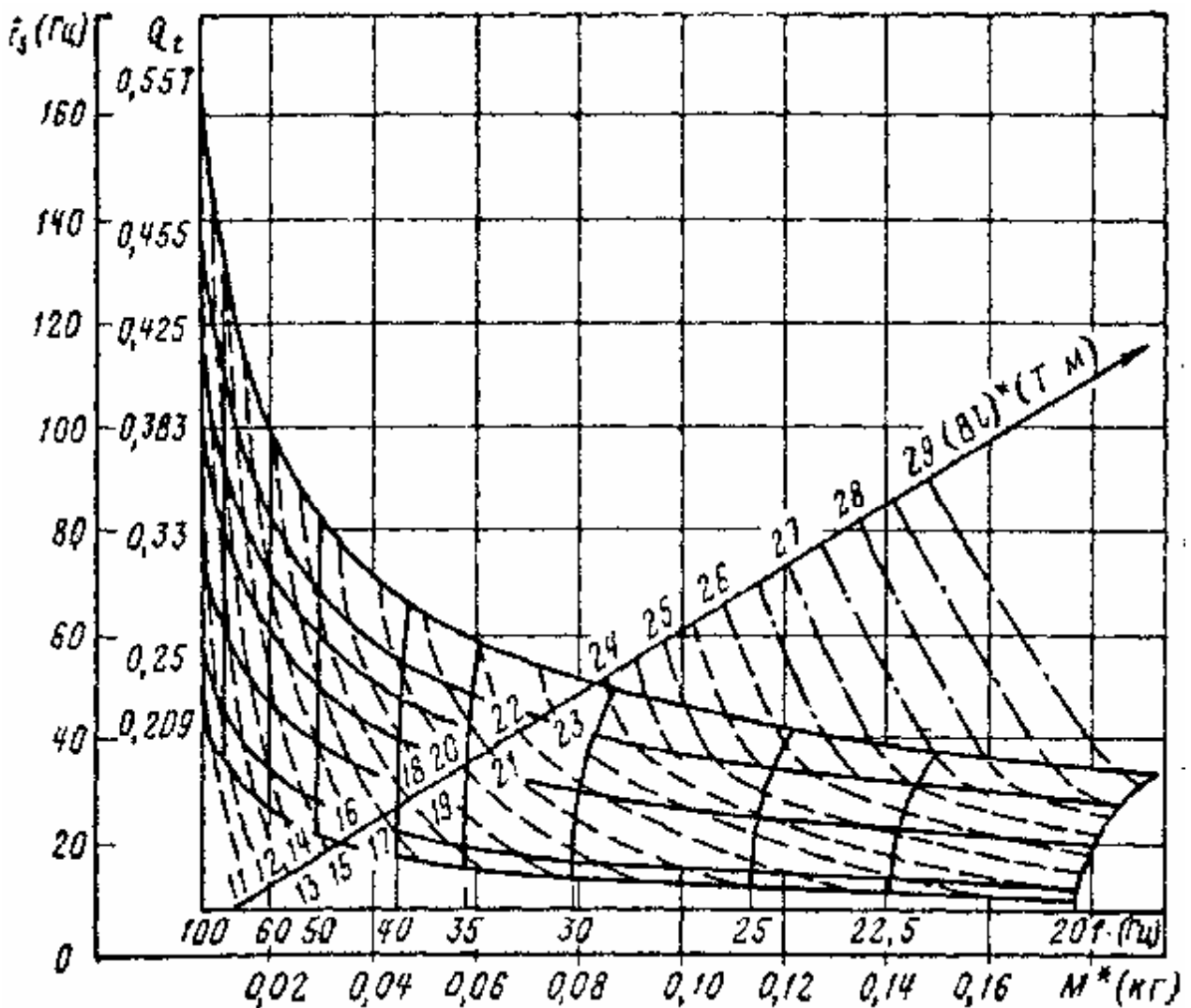


Рис. 16. Номограмма для расчета головок громкоговорителей.

где  $V$  — объем ящика-фазоинвертора,  $\text{м}^3$ ;  $D$  — номинальный диаметр головки,  $\text{м}$ ;  $M_{ms}$ , — масса,  $\text{кг}$ .

Равные частоты среза  $f_3$  обозначены на номограмме сплошными линиями, которые в области малых значений  $M^*$  почти параллельны оси ординат. Это означает, что нижняя граничная частота громкоговорителя определяется в основном массой подвижной системы, практически не зависит от гибкости и, следовательно, резонансной частоты головки в свободном воздухе. Численные значения частот среза отмечены на прямой, параллельной оси абсцисс, в масштабе, пропорциональном  $1/f_3^2$ . При малых значениях  $M^*$  частота среза громкоговорителя обращается в бесконечность и, наоборот, при  $M^* \rightarrow \infty$   $f_3 \rightarrow 0$ .

Равные  $Q_e$  также отмечены на номограмме сплошными линиями, которые в области больших значений  $M^*$  идут под небольшим углом к оси абсцисс и сливаются с последней при  $M^* \rightarrow \infty$ .

Значения  $Q_e$ , соответствующие каждой кривой, отмечены в левой части номограммы вдоль линии равной частоты среза со значением 100 Гц. Сложная зависимость произведения  $Bl$ ,  $\text{Г}\cdot\text{м}$ , от параметров головки и оформления выражается в виде кривых, равных

$$(Bl)^* = Bl \sqrt{\frac{12V}{R_e \times 0,01} \frac{\alpha 0,2 \ddot{o}^2}{\zeta \frac{D}{\delta}}},$$



где  $R_e$  — активное сопротивление звуковой катушки, Ом;  $V$  — в м<sup>3</sup>;  $D$  — в м. Эти кривые нанесены на графике пунктирными линиями, а численные значения, соответствующие каждой из них, вынесены на прямую, пересекающую номограмму. Заметим, что штрихпунктирные линии не являются кривыми равных  $(Bl)^*$ , а служат лишь для отыскания численных значений, лежащих внутри номограммы.

Полученная номограмма охватывает практически всю область значений, которые могут принимать параметры низкочастотных головок и громкоговорителей. Диапазон изменений резонансной частоты головки в свободном воздухе составляет 13—165 Гц, нижней частоты среза громкоговорителя — 20 — 100 Гц. Область изменений  $Q_t$  головки в ящике-фазоинверторе перекрывает диапазон значений, типичных для частотных характеристик квази-Баттерворта третьего порядка, Баттерворта и Чебышева четвертого порядка.

Пользуясь номограммой, расчет параметров низкочастотной головки, обеспечивающей в ящике-фазоинверторе заданного объема получение гладкой частотной характеристики с известной частотой среза, упрощают и сводят к следующему. Если заданы  $f_s$ ,  $V$ ,  $D$ ,  $R_e$  и  $Q_t$ , определяют коэффициенты

$$\frac{V \times 0,2 \bar{\sigma}^4}{0,01 \bar{\epsilon} D \bar{\theta}} \quad \text{и} \quad \sqrt{\frac{12V \times 0,2 \bar{\sigma}^2}{R_e \times 0,01 \bar{\epsilon} D \bar{\theta}}}$$

а затем находят координаты точки пересечения  $f_3$  и  $Q_t$ , т. е. резонансную частоту головки в свободном воздухе  $f_s$  и величину  $M^*$ . По уже найденному коэффициенту и значению абсциссы определяют массу подвижной системы  $M_{ms}$ . Далее находят значение линии равных  $(Bl)^*$ , проходящей через указанную точку номограммы и  $Bl$  головки.

Номограмма позволяет также отыскать важное с практической точки зрения решение, при котором громкоговоритель обеспечивает заданную частоту среза и обладает минимальным  $Bl$ . В самом деле, из приведенных графиков следует, что одна и та же частота среза громкоговорителя может получаться для головок, обладающих различными  $(Bl)^*$ . Кривая равных  $f_3$  пересекается семейством кривых равных  $(Bl)^*$  с различными значениями, причем наименьшее  $(Bl)^*$  соответствует головке, имеющей минимальное значение собственной резонансной частоты в свободном воздухе. Таким образом, задавая минимальное, практически достижимое значение резонансной частоты головки  $f_s$ , на номограмме однозначно определяют точку, как место пересечения прямой с ординатой  $f_s$  и кривой равной частоты среза с оговоренным значением  $f_3$ . Кривая равных  $(Bl)^*$ , проходящая через найденную точку, даст численное значение

$$Bl \sqrt{\frac{12V \times 0,2 \bar{\sigma}^2}{R_e \times 0,01 \bar{\epsilon} D \bar{\theta}}}$$

координата точки на оси абсцисс определит значение  $M^*$ . Любое значение  $Bl$  можно далее получить, если, решая уравнение  $(Bl)^* = \text{const}$ , выбрать в качестве переменных величин объем оформления  $V$  или диаметр головки  $D$ . При прочих равных условиях ( $f_3 == \text{const}$ ,  $f_s == \text{const}$ ) минимальное значение  $Bl$  получается для головки, рассчитанной на работу в большем оформлении и имеющей меньший диаметр.

К выбору этих параметров следует, однако, относиться с некоторой осторожностью, ибо те же закономерности, которые ведут к уменьшению  $Bl$ , в еще большей степени требуют снижения массы подвижной системы головки, которая может выйти за пределы технически осуществимого. Проверку практической реализуемости искомого или найденного решения полезно также проводить оценкой к. п. д. громкоговорителя по формуле (39) или (41). Таким образом, номограмма, наглядно отображающая общую взаимосвязанность параметров громкоговорителя, головки и акустического оформления, позволяет выбрать необходимое решение (найти нужный набор параметров головки), которое априори обеспечит получение заданной гладкой частотной характеристики в ящике-фазоинверторе известных размеров.

В заключение необходимо сделать несколько замечаний относительно тех допущений, которые пришлось принять при построении последней номограммы. При определении оси численных значений ( $Bl$ )\* было принято, что основной вклад в демпфирование подвижной системы головки вносит торможение звуковой катушки в магнитном поле, т. е.  $Q_t \approx Q_e$ .

Это положение часто принимается при рассмотрении работы громкоговорителя и не вносит сколько-нибудь заметной ошибки в окончательный результат. Второе допущение относится к соотношению между эффективным и номинальным диаметром головки. Предполагается, что эффективный диаметр  $D_{эфф}$  головки равен 0,74 номинального. Если учесть, что размер диаметра входит в расчетные формулы во второй и четвертой степенях, расхождения в численных значениях  $Bl$  и  $M_{ms}$  при других соотношениях ( $D_{эфф} = mD$ ) могут быть значительными. Если коэффициент пропорциональности известен и отличается от 0,74, полученные из номограммы значения механической массы и  $Bl$  следует умножить соответственно на  $(m/0,74)^4$  и  $(m/0,74)^2$ .

## Закрытый ящик

Акустическое оформление в виде закрытого ящика можно рассматривать как предельный случай ящика-фазоинвертора с бесконечно малым отверстием. Эквивалентная акустическая схема низкочастотной головки в закрытом ящике может быть получена, если в схеме рис. 3 отбросить элементы, относящиеся к инвертору. Соответствующая частотная характеристика громкоговорителя совпадает с уравнением (17) при  $y_3 = y_4 = 0$ .

Среди множества типов частотных характеристик, которые могут быть получены для громкоговорителя в виде закрытого ящика, наибольший интерес представляют гладкие частотные характеристики Баттерворта второго порядка. Эти характеристики образуются при условии выполнения соотношений между параметрами головки и ящика, выраженных уравнением (27) при  $f_b/f_s = 0$ . Особенностью громкоговорителей с частотными характеристиками Баттерворта второго порядка является то обстоятельство, что частота среза  $f_3$  (29) совпадает с резонансной частотой головки в ящике  $f_c$ .

Графическое представление уравнений (27) и (29) образует номограмму для расчета громкоговорителей с акустическим оформлением в виде закрытого ящика. На рис. 17 в прямоугольной системе координат изображены зависимости отношений  $V_{as}/V$ ,  $f_3/f_s$ ,  $f_c/f_s$  в

функции от  $Q_t$ . Методика расчета акустического оформления громкоговорителя с известной частотой среза или с ящиком известных размеров полностью подобна методике для громкоговорителей в виде ящика-фазоинвертора. Номограмма построена для громкоговорителя без потерь в акустическом оформлении ( $Q_b = \infty$ ), однако практически с удовлетворительной точностью ею можно пользоваться при условии  $Q_b > 10$ .

Частичное заполнение (до 20% объема) закрытого ящика поглощающим материалом с целью подавления стоячих волн и улучшения неравномерности частотной характеристики на средних частотах мало влияет на  $Q_b$ . Помимо сглаживания частотной характеристики, подглушение оказывается полезным еще и в том отношении, что за счет изменения закона сжатия и разрежения воздуха при колебаниях в звукопоглощающем материале происходит увеличение эффективного объема ящика (уменьшение измеряемого отношения  $V_{as}/V$ ). Это дает возможность по сравнению с незаполненным ящиком получать частотную характеристику с более низкой частотой среза или одну и ту же частоту среза в меньшем по размерам оформлении. Чрезмерно плотное заполнение ящика поглощающим материалом приводит к обратному результату — уменьшению эффективного внутреннего объема за счет механического вытеснения воздуха и одновременно к росту потерь в ящике. Современные тенденции в построении громкоговорителей с закрытыми ящиками заключаются в использовании головок с низкой резонансной частотой и большой гибкостью подвижной системы. Для таких громкоговорителей отношение  $V_{as}/V \geq 3$ , а частота среза в 2 раза и более превышает собственную резонансную частоту головки в свободном воздухе.

Закрытый ящик и ящик-фазоинвертор являются в настоящее время самыми распространенными типами акустических оформлений громкоговорителей. Сравнительный анализ показывает, что каждый из них имеет свои преимущества и недостатки.

К преимуществам громкоговорителя с закрытым ящиком относят плавный спад частотной характеристики в сторону низких частот (12 дБ на октаву для закрытого ящика и 18 дБ на октаву для ящика-фазоинвертора). Более плавный спад частотной характеристики обеспечивает меньшие переходные искажения.

К преимуществам громкоговорителя, выполненного в виде ящика-фазоинвертора, можно отнести следующие.

При прочих равных условиях в области самых низких частот к. п. д. громкоговорителя оказывается на 3 дБ выше, чем для закрытого оформления. Этот выигрыш в эффективности может быть переведен в преимущество в частоте среза или объеме оформления. Так, при одинаковых к. п. д. и объемах оформлений громкоговоритель в виде

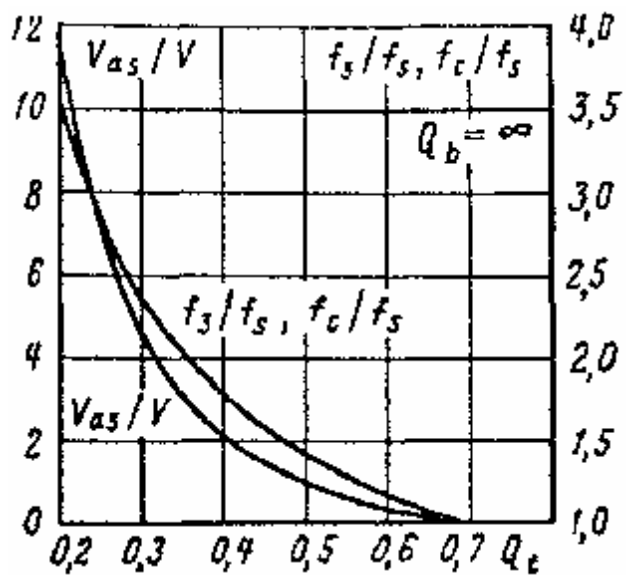


Рис. 17. Номограмма для расчета громкоговорителей в виде закрытого ящика.

ящика-фазоинвертора будет иметь более низкую частоту среза, а при равных к. п. д. и частотах среза — меньший объем оформления.

Из-за лучшего согласования головки громкоговорителя со средой амплитуда подвижной системы в области частоты резонанса громкоговорителя оказывается во много раз меньшей, чем у закрытого ящика. Это означает, что при равной излучаемой мощности громкоговоритель в виде ящика-фазоинвертора имеет меньшие нелинейные искажения.

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГОЛОВКИ И ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

### Определение $Q_a$ , $Q_e$ , $f_s$ , $V_{as}$ и $Q_b$

Переходя к вопросам измерения параметров низкочастотных головок и громкоговорителей, целесообразнее воспользоваться методом аналогий и представить громкоговоритель в виде эквивалентной электрической схемы. Эта схема может быть получена из эквивалентной акустической схемы (см. рис. 3) заменой последовательного соединения полных сопротивлений на параллельное и наоборот, а также заменой индуктивностей на емкости и емкостей на индуктивности. Значения соответствующих сопротивлений при этом должны удовлетворять соотношениям (6) и (7).

В образованной эквивалентной электрической схеме (рис. 18) ток и напряжение на  $R_e$  соответствуют току и напряжению на зажимах громкоговорителя, когда последний соединен с генератором напряжений. Частотная характеристика модуля полного электрического сопротивления громкоговорителя в виде ящика-фазоинвертора  $|Z|$  изображена на рис. 19. Частота, соответствующая минимуму характеристики между двумя пиками, совпадает с собственной резонансной частотой или частотой настройки акустического оформления. Отбрасывание элементов, относящихся к ящику-фазоинвертору, превращает схему рис. 18 в эквивалентную электрическую схему головки громкоговорителя в свободном воздухе (рис. 20). При этом соответствующая кривая  $|Z|$  подобна изображенной на рис. 21.

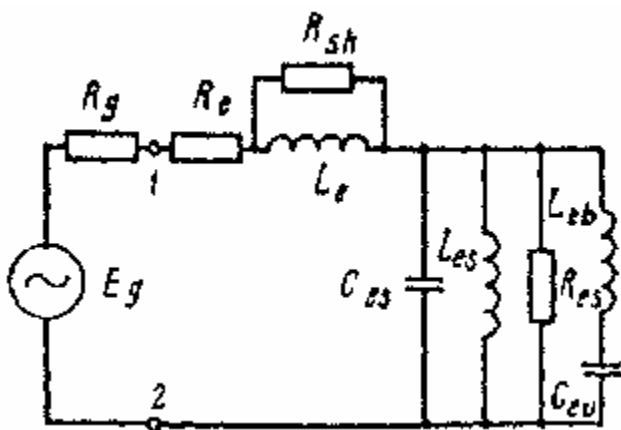


Рис. 18. Эквивалентная электрическая схема громкоговорителя.

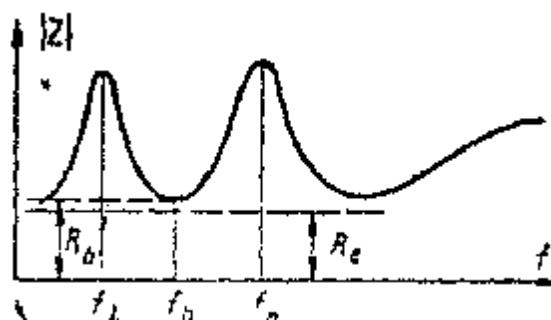


Рис. 19. Частотная характеристика модуля полного электрического сопротивления громкоговорителя  $|Z|$

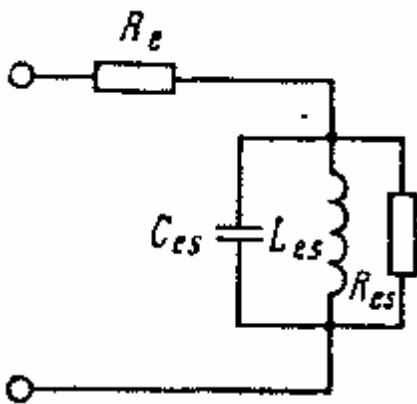


Рис. 20. Эквивалентная электрическая схема головки громкоговорителя.

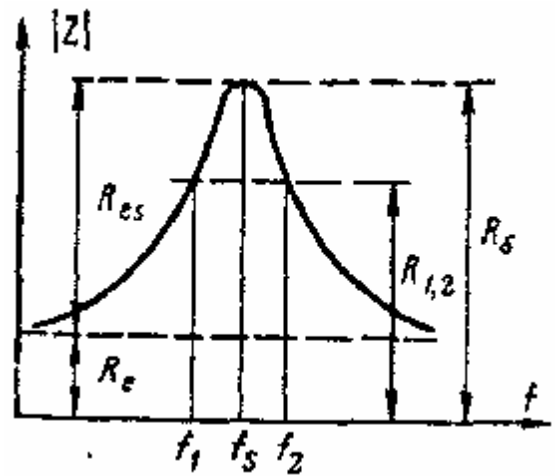


Рис. 21. Частотная характеристика модуля полного электрического сопротивления головки громкоговорителя  $|Z|$ .

Из анализа схемы рис. 20 следует, что на частоте резонанса головки значение  $Q$  определяется следующим образом:

$$Q'_a = 2\pi f_s C_{es} R_{es}; \quad (48)$$

$$Q'_e = 2\pi f_s C_{es} R_e. \quad (49)$$

Они могут быть найдены с помощью кривой модуля полного электрического сопротивления (рис. 21):

$$Q'_a = \frac{f'_s \left( \frac{R_s}{R_e} - \frac{R_{1,2}}{R_e} \right)^{1/2}}{f_2 - f_1 \left( \frac{R_{1,2}}{R_e} - 1 \right)}; \quad (50)$$

$$Q'_e = \frac{Q'_a}{\frac{R_s}{R_e} - 1}. \quad (51)$$

Величины  $f'_s$ ,  $Q'_a$ ,  $Q'_e$  взяты здесь со штрихами потому, что не учитывают изменений в присоединенной массе воздуха, возникающих при работе головки в акустическом оформлении. Чтобы уточнить параметры  $f'_s$ ,  $Q'_a$  и  $Q'_e$ , а также определить объем, эквивалентный акустической гибкости  $V_{as}$ , головку закрепляют в измерительном ящике (закрытом ящике или ящике-фазоинверторе).

В закрытом ящике форма кривой  $|Z|$  головки громкоговорителя подобна изображенной на рис. 21. Частота, соответствующая максимуму кривой, смещается вверх и становится равной частоте резонанса головки в объеме ящика  $f_c$ .

С помощью кривой  $|Z|$  на частоте  $f_c$  по аналогии с измерениями в свободном воздухе можно вновь определить  $Q_{ac}$  и  $Q_{ec}$ . Точные значения параметров  $f_s$ ,  $Q_a$  и  $Q_e$ , находятся по формулам:

$$f_s = f_s' \frac{Q_e'}{Q_{ec}'} \frac{f_c}{f_s'} \frac{Q_e'}{Q_{ec}'} \frac{1}{2}, \quad (52)$$

$$Q_a = Q_a' \frac{f_s'}{f_s}; \quad (53)$$

$$Q_e = Q_e' \frac{f_s'}{f_s}. \quad (54)$$

Отношение  $V_{as}/V$  определяется следующим образом:

$$V_{as}/V = (f_c/f_s)^2 - 1. \quad (55)$$

Зная  $V$  — внутренний свободный объем измерительного ящика, из последнего уравнения можно найти объем, эквивалентный акустической гибкости головки,  $V_{as}$ .

Метод определения параметров низкочастотной головки с помощью измерительного закрытого ящика удобен тогда, когда проектируется громкоговоритель с закрытым акустическим оформлением. В этом случае при измерении параметров головки наилучшим образом учитывается присоединенная масса воздуха, соколеблющегося с диффузором при данном типе акустического оформления.

К недостаткам метода следует отнести неточность определения параметров при низкой собственной резонансной частоте головки и сложность измерения потерь в ящике. При малых значениях  $f_s$ , весьма трудно сделать закрытый ящик без каких-либо утечек. «Щели» же приводят к изменению формы кривой  $|Z|$ , а именно к образованию вместо одного двух максимумов, один из которых находится в области частот ниже  $f_s$ . Таким образом, при малых значениях  $f_s$  первый максимум образуется на такой низкой частоте, что его можно не заметить, выполняя измерения, и принять оставшийся второй пик за единственный максимум кривой  $|Z|$ .

Метод определения параметров головки с помощью измерительного ящика-фазоинвертора столь же прост, как и описанный выше. Его преимущество заключается в высокой точности нахождения параметров для головок с любой резонансной частотой, а также в возможности оценить потери в акустическом оформлении ( $Q_b$ ).

Определение параметров с помощью этого метода включает в себя измерение  $|Z|$  головки в свободном воздухе и нахождение  $f_s$ ,  $Q_a$ ,  $Q_e$  по формулам (50), (51), а затем уточнение и определение параметров  $f_s$ ,  $Q_a$ ,  $Q_e$ ,  $V_{as}$  и  $Q_b$  с помощью измерения  $|Z|$  головки в ящике-фазоинверторе. По частотам  $f_l$ ,  $f_b$ ,  $f_h$  (см. рис. 19) находят:

$$f_s = \frac{f_l f_h}{f_b} \quad (56)$$

и

$$\frac{V_{as}}{V} = \frac{(f_h^2 - f_b^2)(f_b^2 - f_l^2)}{f_h^2 f_l^2}. \quad (57)$$

Уточненные значения  $Q_a$  и  $Q_e$  находятся по формулам (53) и (54).  $Q_b$  —  $Q$  громкоговорителя, обусловленное потерями в акустическом оформлении, может быть вычислено следующим образом:

$$Q_b = \frac{f_b V}{f_s V_{as} Q_e} \frac{\dot{e} (R_s - R_b) R_e}{\dot{e} (R_s - R_e) (R_b - R_e) \dot{u}} \quad (58)$$

где  $R_b$  — значение  $|Z|$  громкоговорителя в минимуме на частоте  $f_b$ .

Точность определения  $Q_b$  описанным способом тем выше, чем больше значение  $Q_b$  (важно, чтобы  $Q_b \gg 1$ ), чем меньше потери в подвижной системе головки и чем ближе друг к другу находятся резонансные частоты  $f_s$  и  $f_b$ .

### Схема измерений

Выше было показано, что форма частотной характеристики громкоговорителя существенно меняется при изменениях отдельных параметров головки. Следовательно, для того чтобы проектировать громкоговоритель с известной характеристикой, т. е. выполнять определенные соотношения между параметрами головки и акустического оформления, необходимо прежде всего надежно и точно измерить параметры низкочастотной головки. Описываемая ниже схема и методика измерений удовлетворяют этому требованию.

Измерения начинаются с возможно более точного определения сопротивлений постоянному току звуковой катушки  $R_e$  и некоторого сопротивления калибровочного резистора  $R_k$ , которое может быть любым, но близким к  $R_e$ . Дальнейшие измерения проводятся по схеме (рис. 22), отличающейся от классической схемы измерения  $|Z|$  громкоговорителя наличием частотомера. Активное сопротивление резистора  $R$  выбирается достаточно большим, чтобы обеспечить постоянство тока при измерениях. Обычно  $R/R_e > 200$ . Напряжение, фиксируемое вольтметром, в этих условиях будет пропорционально  $|Z|$  громкоговорителя или головки.

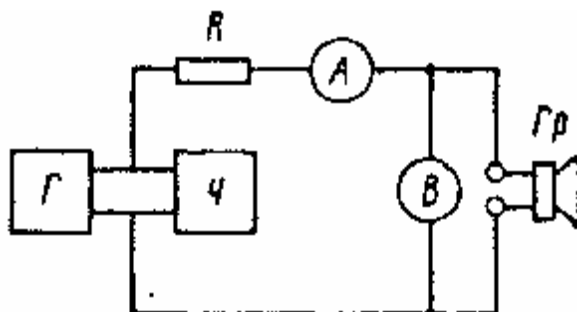
Вначале в схему вместо громкоговорителя включают калибровочный резистор  $R_k$ , устанавливая определенное значение тока  $I$  (сотни миллиампер) и измеряют напряжение  $U_k$  на  $R_k$ . Во всех последующих измерениях установленный ток не изменяют. Вычислениями находят напряжение, соответствующее сопротивлению постоянного тока звуковой катушки:

$$U_e = (U_k / R_k) R_e. \quad (59)$$

Отношение  $U_k/R_k$  определяет ток в цепи, причем оно может отличаться от значения  $I$ , контролируемого амперметром. Однако, по-

Рис. 22. Структурная схема установки для измерений параметров головок и громкоговорителей.

$\Gamma$  — генератор звуковой;  $\mathcal{C}$  — частотомер;  $R$  — активное сопротивление;  $A$  — амперметр;  $B$  — вольтметр;  $\Gamma p$  — громкоговоритель.



скольку в вычислениях используются только относительные величины, абсолютное значение тока в схеме не имеет значения, а единственным требованием к вольтметру является его линейность.

Далее к выходным зажимам схемы вместо калибровочного резистора включают низкочастотную головку без акустического оформления. Головку помещают по возможности далеко от ограждающих поверхностей, например подвешивают таким образом, чтобы ее акустическая ось занимала такое же положение, какое она принимает в громкоговорителе.

В подавляющем большинстве случаев положение оси должно быть горизонтальным.

Плавно меняя частоту генератора, по показаниям вольтметра убеждаются в том, что форма кривой  $|Z|$  соответствует изображенной на рис. 21, т. е. не имеет дополнительных экстремумов. Дополнительные максимумы и минимумы могут возникнуть при закреплении головки на гибкой штанге, имеющей собственный резонанс вблизи резонанса головки. В любом случае, прежде чем продолжать измерения, следует найти такое положение и способ крепления головки, при котором кривая  $|Z|$  имеет лишь один максимум. Генератор настраивают на резонансную частоту головки  $f_s$  — частоту, соответствующую максимуму напряжения, измеряемого вольтметром. Значение резонансной частоты  $f_s$  и максимального напряжения  $U_s$  считывается с показаний частотомера и вольтметра.

В головках с низкой резонансной частотой вершина кривой  $|Z|$ , как правило, размыта. Поэтому для повышения точности измерения повторяют несколько раз и затем определяют окончательно  $f_s$  и  $U_s$  как средние арифметические из соответствующих отсчетов.

Чтобы найти  $Q_a$  и  $Q_e$  головки, с помощью генератора и частотомера определяют частоты  $f_1$  и  $f_2$  (см. рис. 21) ниже и выше резонансной частоты  $f_s$ , при которых напряжение на зажимах головки принимает некоторое значение  $U_{1,2}$ , меньшее  $U_s$ . Например,  $U_{1,2} = 0,7 U_s$ . Если характеристика  $|Z|$  головки предварительно измерена, значение  $U_{1,2}$  выбирают таким образом, чтобы оно приходилось на область максимальных крутизн кривой  $|Z|$ . В этом случае измерения  $f_1$  и  $f_2$  окажутся выполненными наиболее точно. Измерения частот следует провести несколько раз и окончательные их значения найти как средние арифметические.

Поскольку кривая  $|Z|$  симметрична в логарифмическом масштабе частот, существует удобный метод проверки выполненных измерений. Квадрат резонансной частоты должен быть равен произведению частот  $f_1$  и  $f_2$ , или

$$f_s' = \sqrt{f_1 f_2}. \quad (60)$$

Если расхождение между измеренным непосредственно значением  $f_s$  и вычисленным по (60) окажется не более 1—1,5 Гц, можно переходить к следующим этапам измерений. В противном случае следует снять по точкам характеристику  $|Z|$ , найти  $U_{1,2}$ , действительно соответствующее максимальным крутизнам  $|Z|$ , и вновь повторить измерения  $f_1$  и  $f_2$ . Подставляя в (50) и (51) вместо сопро-



тивлении пропорциональные им измеренные напряжения, можно найти:

$$Q_a' = \frac{f_s' \frac{\xi U_s \ddot{\theta}^2}{U_e \ddot{\theta}} - \xi \frac{U_{1,2} \ddot{\theta}^2}{U_e \ddot{\theta}}}{f_2 - f_1 \frac{\xi U_{1,2} \ddot{\theta}^2}{U_e \ddot{\theta}} - 1} ; \quad (61)$$

$$Q_e' = \frac{Q_a'}{\frac{U_s}{U_e} - 1}. \quad (62)$$

Закончив измерение параметров головки в свободном воздухе, ее закрепляют в измерительном ящике (закрытом ящике или ящике-фазоинверторе) в таком положении, какое она имеет в обычном громкоговорителе. Поскольку методики измерений для обоих типов оформлений подобны, далее разбирается лишь метод определения параметров с помощью ящика-фазоинвертора. Хотя к размерам и частоте настройки измерительного ящика не предъявляется никаких особых требований, желательно, чтобы объем ящика-фазоинвертора не был слишком мал.

При малых размерах оформления частота второго по частоте максимума кривой  $|Z|$  может оказаться достаточно высокой и попасть в область частот, где сказывается индуктивность звуковой катушки. Чтобы исключить влияние этой индуктивности, схему измерений пришлось бы усложнить, введя в нее специальную бифилярную индуктивность.

Головка в ящике-фазоинверторе образует низкочастотный громкоговоритель, который включают в схему измерений. Убеждаются в том, что характеристика  $|Z|$  имеет классическую форму (соответствует рис. 19). Образуемые в некоторых случаях дополнительные максимумы и минимумы на кривой  $|Z|$  указывают на наличие щелей в месте крепления головки или воздушных пазух, возникающих при креплении головки к толстой передней панели без скосов, или когда отверстие в панели меньше диаметра головки.

При правильной форме кривой  $|Z|$  определяют возможно более точно три частоты, соответствующие ее экстремумам:  $f_l$ ,  $f_b$ ,  $f_h$  (см. рис. 19). Одновременно проводят измерение напряжения  $U_b$  в минимуме кривой на частоте  $f_b$ . Как и ранее, измерения проводят несколько раз и окончательные значения величин находят как соответствующие средние значения.

Собственную резонансную частоту головки с учетом присоединенной массы при креплении ее в ящике-фазоинверторе  $f_s$ , отношение  $V_{as}/V$  и уточненные значения  $Q_a$  и  $Q_e$  находят по формулам (53), (54), (56), (57), а общее  $Q$  — из уравнения (34). Если вместо соответствующих сопротивлений поставить пропорциональные им измеренные значения напряжений, то по формуле (58) можно найти  $Q_b$ , характеризующее потери в оформлении:

$$Q_b = \frac{f_b V (U_s - U_b) U_e}{f_s V_{as} Q_e (U_s - U_e) (U_b - U_e)} \quad (63)$$

### Пример измерения параметров низкочастотной головки

С помощью омметра находим сопротивление постоянному току головки  $R_e = 6,2$  Ом и сопротивление постоянному току калибровочного резистора  $R_k = 7,52$  Ом. Включаем  $R_k$  в измерительную установку (см. рис. 22) и находим, что при токе в цепи  $I = 0,03$  А напряжение на калибровочном резисторе  $U_k = 0,222$  В. Поскольку точное сопротивление калибровочного резистора известно, можно определить ток в цепи измерительной установки

$$I = \frac{U_k}{R_k} = \frac{0,222}{7,52} = 0,029 \text{ А.}$$

Полученное значение не соответствует показанию амперметра, и, следовательно, один из двух приборов (амперметр или вольтметр) неточен. Это обстоятельство, однако, не является важным, если характеристика используемого вольтметра линейна, а ток во время всех измерений сохраняется постоянным. Из уравнения (59) находим значение напряжения, соответствующее постоянному сопротивлению звуковой катушки головки:

$$U_e = \frac{U_k}{R_k} R_e = \frac{0,222}{7,52} \times 6,2 = 0,183 \text{ В.}$$

Подвешиваем далее низкочастотную головку в воздухе по возможности дальше от ограждающих поверхностей так, чтобы ее акустическая ось приняла горизонтальное положение. Включаем головку в схему вместо калибровочного резистора. Плавно меняя частоту генератора, находим значение собственной резонансной частоты головки  $f_s$  — значение частоты, при которой вольтметр показывает максимальное напряжение  $U_s$ . Регистрируем как значение частоты, так и напряжения (табл. 1). Повторяем измерения 5 раз и вычисля-

Таблица 1

Измеряемые величины	Число измерений					Средние значения
	1	2	3	4	5	
$f_s$ , Гц	32,5	33,1	31,8	33,6	32,4	32,7
$U_s$ , В	1,796	1,810	1,782	1,823	1,816	1,805

Таблица 2

Измеряемые частоты	Число измерений					Средние значения
	1	2	3	4	5	
$f_1$ , Гц	27,8	27,9	28,1	27,7	27,9	27,9
$f_2$ , Гц	38,7	38,6	38,9	38,3	38,6	38,6

ем средние арифметические значения  $f_s$  и  $U_s$ . Находим значение напряжения  $U_{1,2} = 0,7U_s$ ;  $U_{1,2} = 0,7 \cdot 1,805 = 1,264$  В.

Определяем частоты  $f_1$  и  $f_2$  ниже и выше резонанса, при которых напряжение на зажимах головки оказывается равным 1,264 В. Процедуру измерений повторяем 5 раз, результаты записываем в табл. 2 и вычисляем средние арифметические значения.

Сделаем проверку выполненных измерений. Вычислим по (60)

$$f_s' = \sqrt{f_1 f_2} = \sqrt{27,9 \times 38,6} = 32,8 \text{ Гц.}$$

Полученное значение достаточно точно совпадает с измененным ранее значением  $f_s = 32,7$  Гц. В соответствии с (61) и (62) определяем  $Q_a$  и  $Q_e$ :

$$Q_a' = \frac{f_s' \left( \frac{U_s}{U_e} \right)^2 - \left( \frac{U_{1,2}}{U_e} \right)^2}{f_2 - f_1 \left( \frac{U_{1,2}}{U_e} \right)^2 - 1} =$$

$$= \frac{32,7 \left( \frac{1,805}{0,183} \right)^2 - \left( \frac{1,264}{0,183} \right)^2}{38,6 - 27,9 \left( \frac{1,264}{0,183} \right)^2 - 1} = 3,15;$$

$$Q_e' = \frac{Q_a'}{\frac{U_s}{U_e} - 1} = \frac{3,15}{\frac{1,805}{0,183} - 1} = 0,36.$$

Помещаем измеряемую головку в ящик-фазоинвертор, внутренний свободный объем которого составляет  $V = 0,034$  м<sup>3</sup>. Чтобы получить значение свободного объема, из внутреннего объема ящика вычитаем объем, занимаемый брусками, фазоинверсной трубой и объем, вытесняемый тыльной частью головки.

Вновь включаем громкоговоритель в схему и, плавно меняя частоту генератора, по показаниям вольтметра проверяем соответствие формы кривой  $|Z|$ , изображенной на рис. 19.

Считываем частоты  $f_l$ ,  $f_b$  и  $f_h$ , соответствующие максимуму и минимуму показаний вольтметра. Отмечаем также значение напряжения  $U_b$  в минимуме на частоте  $f_b$  (табл. 3). Измерения проводим 5 раз и окончательные значения величин находим как средние арифметические.

Из уравнения (56) находим собственную резонансную частоту головки с учетом изменений в присоединенной массе воздуха при работе в ящике-фазоинверторе:

$$f_s = \frac{f_l f_h}{f_b} = \frac{19,8 \times 78,3}{50} = 31 \text{ Гц.}$$

Следовательно, за счет увеличения соколеблющейся массы собственная резонансная частота головки в акустическом оформлении

Измеряемые величины	Число измерений					Средние значения
	1	2	3	4	5	
$f_l$ , Гц	19,8	19,6	20,5	19,5	19,6	19,8
$f_b$ , Гц	50,2	49,9	49,8	50,5	49,6	50,0
$f_h$ , Гц	78,1	78,2	78,8	78,3	78,0	78,3
$U_b$ , В	0,204	0,206	0,212	0,210	0,208	0,208

по сравнению с резонансной частотой в свободном воздухе понизилась и составляет  $0,95f_s$ . Соотношение  $f_s$  и  $f'_s$  также можно рассматривать как проверочное. При правильно выполненных измерениях и расчетах две частоты должны отличаться друг от друга не более чем на 5—10%. Вычислим теперь отношение  $V_{as}/V$ . Из уравнения (57):

$$\frac{V_{as}}{V} = \frac{(f_h^2 - f_b^2)(f_b^2 - f_l^2)}{f_l^2 f_h^2} = \frac{(78,3^2 - 50^2)(50^2 - 19,8^2)}{19,8^2 \times 78,3^2} = 3,2.$$

Поскольку объем измерительного ящика нам известен  $V = 0,034 \text{ м}^3$ , можно определить объем воздуха, эквивалентный акустической гибкости головки,  $V_{as} = 3,2 \cdot 0,034 = 0,1088 \text{ м}^3$ . Уточненные значения  $Q_a$  и  $Q_e$  находим по формулам (53) и (54):

$$Q_a = \frac{Q'_a f'_s}{f_s} = \frac{3,15 \times 32,7}{31} = 3,32;$$

$$Q_e = \frac{Q'_e f'_s}{f_s} = \frac{0,36 \times 32,7}{31} = 0,38.$$

При работе от усилителя с нулевым выходным сопротивлением ( $R_g = 0$ )  $Q_t$  головки по (34) составит:

$$Q_t = \frac{Q_a Q_e}{Q_a + Q_e} = \frac{3,32 \times 0,38}{3,32 + 0,38} = 0,34.$$

Потери в ящике-фазоинверторе оцениваем, вычисляя  $Q_b$  по (63):

$$Q_b = \frac{f_b V}{f_s V_{as} Q_e} \frac{\hat{e}}{\hat{e}} \frac{(U_s - U_b) U_e}{(U_s - U_e)(U_b - U_e)} \frac{\hat{u}}{\hat{u}} =$$

$$= \frac{50 \times 0,034}{31 \times 0,1088 \times 0,38} \frac{\hat{e}}{\hat{e}} \frac{(1,805 - 0,208) \times 0,183}{(1,805 - 0,183)(0,208 - 0,183)} \frac{\hat{u}}{\hat{u}} = 9,6.$$

Наконец, используя найденные значения параметров головки, можно предварительно определить к. п. д. проектируемого громкого-

ворителя. Из (39) находим;

$$h \gg \frac{2\rho^2 f_s^3 V_{as}}{c^3 Q_t} 100\% \gg \frac{2 \times 3,14^2 \times 31^3 \times 0,1088}{340^3 \times 0,34} \times 100 \gg 0,5\%,$$

или  $\eta = -23$  дБ.

Потери в акустическом оформлении и в подвижной системе головки снижают к. п. д. громкоговорителя на 1,5—2 дБ. Таким образом, практически к. п. д. громкоговорителя составит —25 дБ, или 0,3%.

### Конструктивный расчет акустического оформления и настройка громкоговорителя

Измерив параметры головки  $f_s$ ,  $V_{as}$ ,  $Q_a$ ,  $Q_e$ ,  $Q_t$  и определив потери в акустическом оформлении  $Q_b$ , можно переходить к проектированию низкочастотного звена громкоговорителя. Проведем примерный расчет громкоговорителя для низкочастотной головки с номинальным диаметром 0,25 м — головки, параметры которой были рассчитаны. Исходным требованием к проектируемому низкочастотному громкоговорителю будем считать обеспечение гладкой частотной характеристики с заданной частотой среза, например с  $f_3 = 35$  Гц.

Поскольку ожидаемые потери в ящике оцениваются значением  $Q_b = 9,6$ , что близко к  $Q_b = 10$ , для расчета акустического оформления воспользуемся номограммой, приведенной на рис. 9. Найдем отношение  $f_3 f_s = 35/31 = 1,13$ , отметим на кривой  $f_3 f_s$  номограммы точку с ординатой 1,13 и проведем через нее прямую, перпендикулярную оси абсцисс. Координаты точек пересечения прямой с кривыми  $V_{as}/V$  и  $f_b f_s$  дадут требуемые значения величин:  $Q_t = 0,37$ ,  $V_{as}/V = 1,5$ ,  $f_b f_s = 1,07$ .

Подставив в последние отношения измеренные значения параметров головки ( $V_{as} = 0,1088$  м<sup>3</sup>,  $f_s = 31$  Гц), определим объем и частоту настройки ящика-фазоинвертора:  $V = 0,0725$  м<sup>3</sup>,  $f_b = 33,2$  Гц. Для обеспечения требуемого значения  $Q_t$  последовательно с головкой достаточно включить активное сопротивление (43). При работе от усилителя с нулевым выходным сопротивлением ( $R_g = 0$ ) для головки с  $Q_a = 3,32$  и  $Q_e = 0,38$  получим:

$$R' = R_e \frac{Q_t Q_a}{(Q_a - Q_t) Q_e} - \frac{R_e + R_g}{R_e} \frac{\dot{u}}{\ddot{u}} =$$

$$= 6,2 \times \frac{0,37 \times 3,32}{(3,32 - 0,37) \times 0,38} - 1 \frac{\dot{u}}{\ddot{u}} = 0,6 \text{ Ом.}$$

Дальнейший расчет низкочастотного громкоговорителя включает в себя определение конструктивных размеров ящика-фазоинвертора, обеспечивающих как необходимый внутренний свободный объем ящика  $V = 0,0725$  м<sup>3</sup>, так и частоту его настройки  $f_b = 33,2$  Гц. Предполагается обычно, что 10% объема ящика занимают брусья, инвертор и тыльная часть головки. Отсюда весь внутренний объем ящика должен составлять 0,08 м<sup>3</sup>. Выбрав соотношение сторон ящика равным 1 : 0,8 : 0,5, найдем его высоту, ширину и глубину (м): 0,596; 0,478; 0,298. При толщине передней панели  $15 \cdot 10^{-3}$  м и толщине

остальных стенок  $12 \cdot 10^{-3}$  м наружные размеры ящика-фазоинвертора будут  $0,623 \times 0,502 \times 0,322$  м.

Расчет фазоинвертора основан на определении акустической массы инвертора, которая вместе с гибкостью свободного объема ящика резонирует на частоте  $f_b$ .

Отношение длины трубы или полки  $L_v$  к площади выходного отверстия  $S_v$  может быть найдено по следующей формуле:

$$\frac{L_v}{S_v} = \frac{3097}{f_b^2 V}, \quad (64)$$

где  $f_b$  — в Гц;  $V$  — в м<sup>3</sup>;  $L_v/S_v$  — в м<sup>-1</sup>.

Подставляя в последнее уравнение численные значения свободного объема и частоты настройки, получаем:

$$\frac{L_v}{S_v} = \frac{3097}{33,2^2 \times 0,0725} = 38,8 \text{ м}^{-1}.$$

Следует отметить, что  $L_v$  — кажущаяся длина инвертора, включающая в себя как непосредственно длину трубы или полки, так и приращение за счет краевых эффектов.

Абсолютные значения  $S_v$  и  $L_v$  при сохранении нужного отношения выбираются из следующих соображений. Площадь фазоинверсного отверстия не может быть слишком малой, иначе за счет большой колебательной скорости в инверторе могут возникнуть нелинейные искажения и посторонние призвуки. Обычно площадь  $S_v$  составляет  $1/4$ — $1$  эффективной площади диффузора головки. По возможности  $S_v$  приближают к верхнему пределу. Однако, чем больше площадь инвертора, тем большей должна быть его длина, чтобы отношение  $L_v/S_v$  оставалось неизменным. Размещение же большой трубы в ящике связано с усложнением его конструкции и увеличением размеров.

При всех условиях свободный внутренний объем ящика не должен изменяться. Кроме того, слишком длинная труба в верхней части низкочастотного диапазона перестает работать как система с сосредоточенными параметрами, что может привести к увеличению неравномерности частотной характеристики громкоговорителя.

Для рассматриваемого примера выберем площадь фазоинверсного отверстия равной  $0,3$  эффективной площади диффузора. При соотношении эффективного и номинального диаметров  $D_{эфф} = 0,74D$  для головки с  $D = 0,25$  м площадь фазоинверсного отверстия составит:

$$S_v = 0,3 \times 3,14 \times \frac{0,74 \times 0,25^2}{2} = 7,85 \times 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Из условия  $L_v/S_v = 38,8 \text{ м}^{-1}$  получим  $L_v = 0,305$  м. Чтобы определить истинную длину инвертора, из найденного значения следует вычесть поправку на краевые эффекты: —

$$\Delta L = 1,7 \sqrt{\frac{S_v}{\pi}}. \quad (65)$$

Следовательно, длина инвертора, включая толщину передней стенки, составит:

$$L = 0,305 - 1,7 \sqrt{\frac{7,85 \times 10^{-3}}{3,14}} = 0,22 \text{ м}.$$

Конструктивно фазоинвертор может быть выполнен, например, в виде трубы круглого или прямоугольного сечения. Определив точные размеры инвертора, можно проверить правильность расчета размеров ящика. Полный внутренний объем ящика должен быть равен сумме необходимого свободного объема, объема, занимаемого головкой, инвертором и брусками каркаса.

К расположению низкочастотной головки и фазоинверсного отверстия на передней панели ящика не предъявляются какие-либо жесткие требования. Однако, чтобы уменьшить взаимное влияние головки и инвертора, их не помещают тесно друг к другу. Кроме того, для повышения эффективности низких частот фазоинверсное отверстие делают ниже отверстия под головку. При этом удастся разместить рядом низко- и среднечастотные головки, что важно для улучшения частотной характеристики в области частоты деления многополосного громкоговорителя. Наконец, для предотвращения возникновения стоячих волн в ящике низкочастотную головку рекомендуется располагать вне осей симметрии прямоугольной передней панели.

Громкоговоритель, как правило, представляет собой двух-, трехполосную (или более) систему и, следовательно, содержит кроме низкочастотной и другие типы головок. Если в конструкции ящика не предусмотрен отдельный изолированный отсек для низкочастотного звена, т. е. все головки оказываются выходящими в один общий внутренний объем, рекомендуется с помощью небольших подглушенных изнутри колпаков герметично закрыть тыльные части среднечастотных и высокочастотных головок. Таким способом удастся не только поднять  $Q_b$  ящика, но и уменьшить неравномерность частотных характеристик среднечастотных и высокочастотных звеньев.

Собрав полностью низкочастотное звено, его следует настроить, т. е. обеспечить действительное выполнение требуемых соотношений между  $Q_b$ ,  $Q_t$ ,  $V_{as}/V$  и  $f_b f_s$ . Для этого полученный громкоговоритель необходимо испытать по той же методике, по которой проводились испытания головки в измерительном ящике. На основании измеренных значений частот  $f_l$ ,  $f_b$ ,  $f_h$ , напряжения  $U_b$  и в результате ранее проведенных измерений головки в свободном воздухе могут быть вычислены основные параметры низкочастотного звена сконструированного громкоговорителя. Поскольку измерения головки проводились без дополнительно включенных резистора или разделительного фильтра, для получения сопоставимых результатов во время измерений громкоговорителя за его вход следует принять зажимы головки. Соответствие  $Q_t$  требуемому значению необходимо проверить расчетом.

За счет ошибок при нахождении внутреннего объема и при изготовлении ящика и трудностей учета присоединенных масс измеренные и вычисленные значения  $Q_b$ ,  $Q_t$ ,  $V_{as}/V$  и  $f_b f_s$  могут оказаться несколько отличными от ожидаемых.

Если это различие превышает 5%, необходимо провести дополнительную настройку низкочастотного звена. Прежде всего следует добиться того, чтобы потери в акустическом оформлении не превышали заданного значения. Низкое значение  $Q_b$  свидетельствует либо о большом поглощении внутри ящика (велико количество поглощающего материала), либо о незаделанных отверстиях, неплотном, негерметичном соединении стенок ящика, мест крепления головки и фазоинверсной трубы к передней панели. Параметры  $Q_t$  и  $f_b f_s$  рассчитываются весьма точно и, как правило, не требуют дополнитель-

ной настройки. При необходимости, однако,  $Q_t$  можно изменить с помощью дополнительного резистора или средств регулирования. Чтобы уменьшить или увеличить частоту настройки ящика и, следовательно, отношение  $f_b/f_s$ , достаточно соответственно увеличить или уменьшить длину фазоинверсной трубы или полки.

Наиболее трудно регулируемым параметром в готовом громкоговорителе является отношение  $V_{as}/V$ , поскольку внутренний свободный объем ящика задан, а  $V_{as}$  — величина постоянная. Однако, если полученное значение  $V_{as}/V$  меньше требуемого (объем велик), его можно изменить, заполнив часть ящика непоглощающим материалом, например пенопластом. Если же полученный свободный объем ящика оказался меньше требуемого, можно уменьшить на 10—15% отношение  $V_{as}/V$ , облицевав стенки ящика изнутри звукопоглотителем. Такой способ увеличения эффективного объема ящика неприемлем, если в нем уже находится достаточное количество поглощающего материала.

В тех случаях, когда  $V_{as}/V$  не поддается полной регулировке, целесообразно провести пересчет громкоговорителя под известный объем (см. пример 3, стр. 19). Полученный в результате такой перенастройки громкоговоритель будет обладать гладкой частотной характеристикой, но с несколько отличной от первоначально заданной частотой среза.



## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ . . . . .	3
АНАЛИЗ РАБОТЫ ГОЛОВКИ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯ В ЯЩИКЕ-ФАЗОИНВЕРТОРЕ . . . . .	4
Громкоговоритель. Основные определения и понятия . . . . .	4
Акустическая мощность и коэффициент полезного действия . . . . .	5
Эквивалентная схема громкоговорителя . . . . .	7
Управление формой частотной характеристики . . . . .	10
Некоторые типы частотных характеристик . . . . .	12
Абсолютное значение коэффициента полезного действия . . . . .	15
Три параметра низкочастотной головки громкоговорителя . . . . .	17
НОМОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ . . . . .	17
Расчет акустического оформления . . . . .	17
Способы регулирования $Q_t$ . . . . .	20
Потери в акустическом оформлении . . . . .	22
Расчет громкоговорителей с учетом потерь в акустическом оформлении . . . . .	24
Частотные характеристики громкоговорителей с неоптимальными соотношениями параметров . . . . .	28
Номограмма для расчета низкочастотных головок громкоговори- телей . . . . .	30
Закрытый ящик . . . . .	34
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОЧАСТОТ- НЫХ ГОЛОВОК И ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ . . . . .	36
Определение $Q_w$ , $Q_e$ , $f_s$ , $V_{as}$ и $Q_b$ . . . . .	36
Схема измерений . . . . .	39
Пример измерения параметров низкочастотной головки . . . . .	42
Конструктивный расчет акустического оформления и настройка громкоговорителя . . . . .	45