

Вологдин Э.И.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОАКУСТИКИ

Учебное пособие

**и методические указания к выполнению лабораторных работ по
электроакустике**

**Санкт – Петербург
2012 год**

Содержание

Введение.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 1А.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 2А.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 3А.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 5А.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 6А.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 7А.....	3
Глава 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗВУКЕ.....	3
1.1. Характеристики звуковых колебаний.....	3
1.2. Колебательная скорость и акустическое сопротивление.....	4
1.3. Характеристики мощности звуковых колебаний.....	6
1.4. Интерференция и дифракция звуковых волн.....	6
Глава 2. ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКА.....	8
2.1. Колебательные движения поршня в отверстии жесткого экрана.....	8
2.2. Колебательные движения поршня в длинной трубе.....	10
2.3. Пульсирующий шар-сфера.....	10
2.4. Присоединенная масса воздуха.....	11
2.5. Сравнительная оценка излучателей звука.....	12
Глава 3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ.....	13
3.1. Принцип действия.....	13
3.2. Конструкция.....	13
3.3. Эквивалентная схема головки громкоговорителя.....	14
3.4. Электромеханические параметры головок громкоговорителей.....	15
3.5. Добротность.....	18
3.6. Z - характеристики.....	19
3.7. Акустическое оформление громкоговорителей.....	20
3.8. Амплитудно-частотная характеристика громкоговорителя.....	24
3.9. Среднее звуковое давление.....	25
3.10. Нелинейные искажения громкоговорителей.....	26
3.11. Коррекция частотных характеристик.....	27
Глава 4. ДИНАМИЧЕСКИЕ МИКРОФОНЫ.....	28
4.1. Принцип работы.....	28
4.2. Конструкция.....	29
4.3. Основные характеристики микрофона.....	29
4.4. Метод взаимности.....	30
4.5. Измерение чувствительности микрофона методом взаимности.....	30

Введение

Настоящее учебное пособие не является учебником по электроакустике. В нем изложены только те вопросы теории, практики и методические указания, которые необходимы для выполнения и защиты лабораторных работ по данной дисциплине.

Всего программой предусмотрено выполнение 6 лабораторных работ:

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 1А

"Определение чувствительности микрофона методом взаимности"

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 2А

«Определение электромеханических параметров электродинамических головок громкоговорителей»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 3А

«Исследование влияния акустического оформления динамической головки громкоговорителя на ее входное сопротивление»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 5А

« Исследование частотных корректоров пульта 8УП2х100-102М »

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 6А

«Определение основных характеристик электродинамической головки громкоговорителя»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 7А

«Определение электрических параметров электродинамических головок громкоговорителей»

Глава 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗВУКЕ

1.1. Характеристики звуковых колебаний

Звук – это объективное физическое явление, вызываемое мгновенными локальными колебаниями атмосферного давления. Такие колебания возникают под действием атмосферных явлений (например, раскаты грома) или колеблющихся физических тел, таких как: голосовые связки, струна, мембрана и др... Слух человека воспринимает **звуковые колебания** только в частотном диапазоне 20.....20000 Гц. Неслышимый звук ниже частоты 20 Гц называется **инфразвуком**, а выше 20 кГц – **ультразвуком**. В вакууме воздух отсутствует, поэтому колебания физических тел звука не вызывают.

Звуковое поле – это пространство, в котором происходит распространение звуковых колебаний. Звуковые колебания в воздушной среде являются продольными колебаниями вдоль линии распространения звука. Они представляют собой периодические *сгущения и разрежение среды*, в виде зон с повышенным и пониженным давлением, которые называются **звуковыми волнами**.

Скорость распространения звуковой волны в воздухе определяется равенством

$$C_s = \sqrt{\gamma \cdot P_{atm} / \rho},$$

где показатель адиабаты $\gamma=1,4^*$, плотность воздушной среды $\rho = 1,29 \dots 1,2$ [кг/м³]. При нормальном атмосферном давлении $P_{atm}=101325$ Па и температуре $17^\circ C$ скорость звука в воздухе равна 340 м/с. Из приведенной формулы следует, что с понижением **атмосферного давления скорость звука быстро уменьшается и в вакууме она равна нулю.**)*Вспомним, что показатель адиабаты равен отношению теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоемкости газа при постоянном объеме.

Периодические сгущения и разрежения воздушной среды, вызванные звуковыми колебаниями, называют **звуковой волной**, а направление распространения звуковых волн – **звуковым лучом**. Звуковая волна характеризуется фронтом и длиной волны. **Фронт волны** – это поверхность, соединяющая смежные точки звукового поля с одинаковой фазой. Он может быть плоским или сферическим в зависимости от источника колебаний. Расстояние между соседними фронтами, находящимися в одинаковой фазе, называется **длиной звуковой волны λ** (рис.1.1). Она определяется следующим равенством

$$\lambda = C_s / F ,$$

где F - частота. В слышимом диапазоне звуковых частот длина волны меняется от 17 м до 1,7 см. Эти цифры надо хорошо помнить, потому что размеры электроакустических преобразователей всегда сопоставляются с длиной волны звука. Запомните хотя бы, что для 100 Гц длина волны 3,4 м, тогда для 1000 Гц – 34,0 см и для 10000 Гц – 3,4 см.

При прохождении звуковой волны давление в каждой точке среды в моменты сгущения молекул воздуха становится больше атмосферного P_{atm} , а в моменты разрежения – меньше. Это суммарное давление $P_c(t)$ является непрерывной функцией времени. Разность между ним и атмосферным статическим давлением P_{atm} в одной и той же точке среды определяет мгновенное значение звукового давления

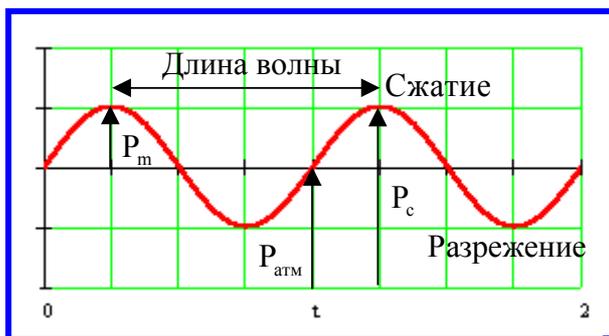


Рис.1.1. Звуковые колебания в функции времени на заданном расстоянии от излучателя

$$P(t) = P_{atm} + P_c(t)$$

В случае синусоидальных звуковых колебаний можно говорить об амплитудном P_m и эффективном значении давления P , которые отличаются в 1,41 раза. Звуковое давление измеряется в Паскалях (Па) и в слышимом звуковом диапазоне оно может быть от $2 \cdot 10^{-5}$ до **100 Па**. Обратите внимание, что это, по крайней мере, в **1000 раз** меньше нормального атмосферного давления.

1.2. Колебательная скорость и акустическое сопротивление

Разность давлений в различных точках среды является причиной колебательного движения молекул воздуха при возникновении звука. Мгновенное значение **колебательной скорости** этих молекул $V(t)$ с одной стороны определяется скоростью смещения молекул воздуха

$$V(t) = dX(t) / dt ,$$

где $X(t)$ описывает закон смещения молекул воздуха. С другой стороны она определяется звуковым давлением и **удельным акустическим сопротивлением среды Z_a**

$$V(t) = P(t) / Z_a .$$

Для синусоидальных звуковых колебаний можно использовать понятия амплитудного V_m и эффективного значений V колебательной скорости. Запомним, что

даже для очень громких звуков **амплитуда колебательной скорости не превышает 10 м/с.**

Если смещение меняется по синусоидальному закону

$$X(t) = X_m \cdot \sin \omega t ,$$

тогда

$$V(t) = X_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t ,$$

где X_m – амплитуда смещения мембраны и молекул воздуха, ω – угловая частота ($2\pi F$). Из последней формулы следует, амплитуды колебательной скорости и смещения связаны важным равенством

$$V_m = X_m \omega$$

Это значит, что при фиксированном значении амплитуды смещения X_m колебательная скорость растет линейно с частотой. При постоянном значении V_m с понижением частоты амплитуда колебаний диффузора увеличивается с уменьшением частоты.

Так как колебательная скорость равна производной смещения по времени, это значит, что она равна нулю, когда величина смещения достигает амплитудного значения, а значение скорости максимально, когда смещение равно нулю.

Акустическое сопротивление часто называют удельным, так как физически оно характеризует сопротивление, которое оказывает среда единице поверхности излучателя. Акустическое сопротивление зависит от свойств воздушной среды частоты колебаний формы фронта волны. В общем случае оно имеет комплексный характер

$$Z_a = R_a + jX_a$$

и тогда между мгновенными значениями колебательной скорости и звукового давления возникает фазовый сдвиг φ .

Активная составляющая акустического сопротивления определяет излучаемую мощность звуковых колебаний. Для технических расчетов принято считать $R_a = 418 \text{ кГ/м}^2\text{с}$.

Реактивная составляющая сопротивления воздушной среды X_a определяет запас энергии в поле и длительность процесса затухания колебаний. Это инерционное (реактивное) сопротивление связано с кажущимся увеличением массы поршня. Реактивная составляющая акустического сопротивления определяется массой молекул воздуха движущихся вместе с поршнем и поэтому называется **соколеблющейся или присоединенной массой**. Эта масса понижает частоту **механического резонанса** громкоговорителя в соответствии с равенством

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{(m_d + m_c) \cdot C_m}}$$

где ω_m – круговая частота механического резонанса, m_d – масса поршня, m_c – масса соколеблющегося воздуха, C_m – гибкость подвеса. В вакууме воздуха нет, поэтому $m_c = 0$ и частота механического резонанса повышается. Этот факт используется в лабораторной работе 2А для измерения соколеблющейся массы воздуха по изменению частоты механического резонанса в вакууме.

Если акустическое сопротивление умножить на всю поверхность излучателя S , то получим полное сопротивление реакции среды, называемое **сопротивлением излучения** $R_{изл}$.

$$R_{изл} = R_a \cdot S$$

оно используется для расчета излучаемой акустической мощности и КПД головки громкоговорителя.

1.3. Характеристики мощности звуковых колебаний

Для характеристики мощности звуковых колебаний используют понятие **интенсивности** или **силы звука** I . Под этими терминами понимается среднее значение потока звуковой энергии через единицу площади, перпендикулярной направлению распространения звуковой волны. В общем случае независимо от характера фронта звуковой волны интенсивность звука рассчитывается по формулам:

$$I = W / S = PV,$$

или

$$I = P^2 \cos \varphi / |Z_a|,$$

где W – мощность звуковых колебаний, S – площадь фронта волны, P и V – эффективные значения. Интенсивность измеряется в Вт/м².

1.4. Интерференция и дифракция звуковых волн

Обычно в любую точку звукового поля приходит одновременно множество звуковых волн. Это прямые волны от различных источников звука, а также множество отраженных волн. В произвольной точке они накладываются друг на друга и происходит суммирование колебаний. Наложение нескольких колебаний друг на друга называется **интерференцией**.

При наложении нескольких колебаний в некоторой точке звукового поля мгновенное значение результирующего колебания будет зависеть от амплитуд и фаз составляющих колебаний. Здесь действует принцип наложения, согласно которому каждое колебание распространяется так, как если бы оно не встречало на своем пути другое. В те моменты, когда колебания складываются в фазе, результирующее давление будет увеличено и наоборот. Поскольку в разных точках звукового поля условия интерференции различны, то и суммарные мгновенные значения звукового давления будут отличаться от точки к точке. Разница звуковых давлений в них и будет определять неравномерность звукового

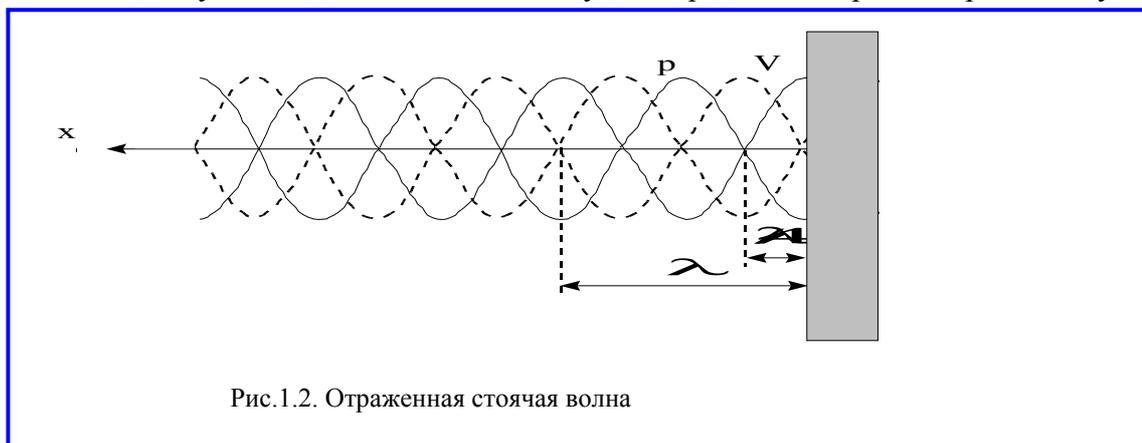


Рис. 1.2. Отраженная стоячая волна

поля.

Частным случаем интерференции является наложение прямой и отраженной от жесткой преграды волн, когда устанавливается **стоячая волна** (рис.1.2). При этом образуются **узлы и пучности** звукового давления и колебательной скорости. У **отражающей поверхности образуется узел колебательной скорости и пучность звукового давления**. Так как амплитуды падающей и отраженной волн здесь одинаковы, то за счет сложения двух волн амплитуда звукового давления будет равна удвоенной амплитуде бегущей волны.

Пучности звукового давления будут наблюдаться при расстояниях от преграды равных четному числу четвертей длины волны: $r = n\lambda / 2$, где n – любое число

натурального ряда. При расстояниях, равных нечетному числу четвертей длины волны будут наблюдаться узлы звукового давления $P_m = 0$. Пучности колебательной скорости совпадают с узлами звукового давления и наоборот.

Если на пути звуковой волны появляется препятствие, то звуковые волны огибают его. Способность звуковых волн огибать препятствие называют **дифракцией**. Дифракция имеет сложный характер и зависит от соотношения длины волны, размеров препятствия и его формы. Препятствие существенно искажает картину звукового поля.

Наиболее подробно исследованы дифракционные явления около тел шаровой формы. Рассмотрим случай, когда размеры тела шаровой формы значительно меньше длины волны, что обычно имеет место при излучении низких частот.

Из **рис.1.3.** видно, что форма звукового поля перед препятствием и позади него не искажается. Волны как бы не замечают препятствия, легко его огибая. Звуковое давление

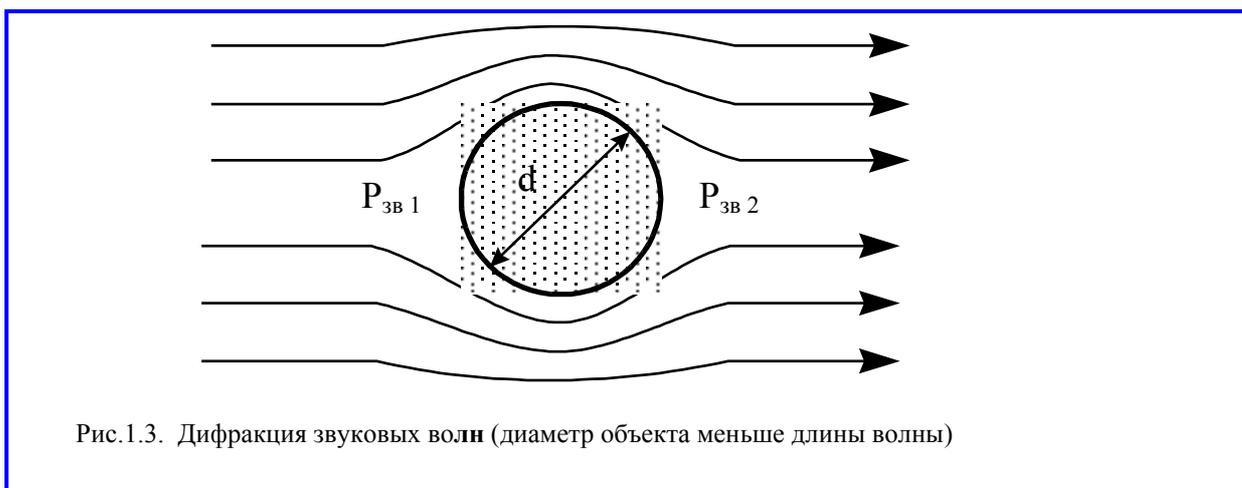


Рис.1.3. Дифракция звуковых волн (диаметр объекта меньше длины волны)

перед препятствием $P_{зв1}$ и позади него $P_{зв2}$ одинаковы по величине. В данном случае ($d \ll \lambda$) препятствие можно считать точечным.

Если размеры препятствия сравнимы или больше длины волны ($d \geq \lambda$) картина поля будет иная. Данный случай имеет место на средних и высоких частотах звукового диапазона.

Как видно из **рис.1.4.** теперь картина поля существенно искажена препятствием. Часть энергии, попадающая на переднюю часть препятствия, отражается, за счет чего звуковое давление увеличивается в K раз. Коэффициент K зависит от соотношения d/λ и формы препятствия, его величина $K = 1-2$. При $d \gg \lambda$ этот коэффициент может достигать

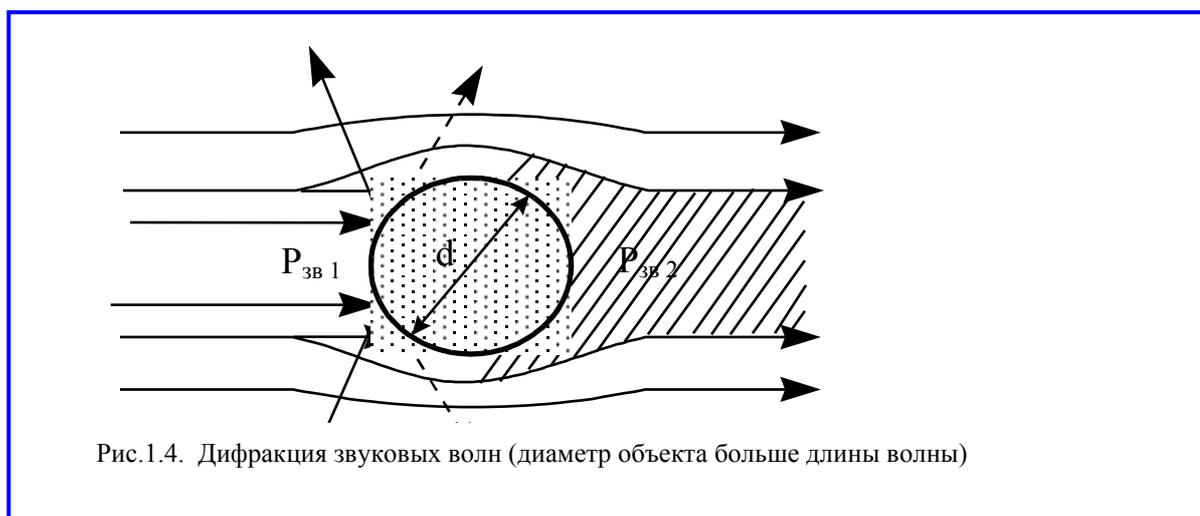


Рис.1.4. Дифракция звуковых волн (диаметр объекта больше длины волны)

максимальной величины $K = 2$. За препятствием образуется зона с пониженным звуковым

давление, так называемая **акустическая тень**. Звуковое давление P_1 перед препятствием будет существенно больше чем позади него P_2 .

Если в качестве препятствия поставить измерительный микрофон, то он измерит давление, отличающееся от давления в данной точке в условиях свободного поля. По этим причинам микрофоны стремятся делать как можно меньших размеров. Особенно это относится к измерительным микрофонам, которые должны быть ненаправленными и тем более не искажающими картину звукового поля.

Глава 2. ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКА

2.1. Колебательные движения поршня в отверстии жесткого экрана

В качестве первого примера рассмотрим возникновение звуковых колебаний в воздушной среде при колебаниях поршня в круглом отверстии **жесткого бесконечного экрана** (рис.2.1) Пусть поршень совершает колебания вдоль оси X . При движении вправо он приводит в **движение** прилегающие к его поверхности молекулы воздуха, уплотняя их. Давление воздуха с правой стороны становится больше атмосферного. Вследствие этого молекулы воздуха перемещаются вправо, отклоняясь от своего положения равновесия.

При достижении поршнем крайнего правого положения он начнет двигаться влево. При этом справа образуется разрежение молекул воздуха, давление становится меньше атмосферного и сюда устремятся молекулы из прилегающего слоя.

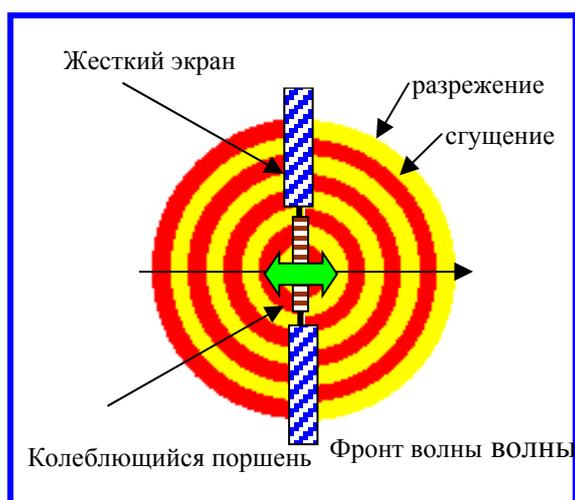


Рис.2.1. Полусферическая волна

В результате периодические колебания мембраны вызывают в воздушной среде возмущения в виде сгущений и разрежений молекул воздуха. Воздушная среда обладает свойством передавать фазы сжатия и разрежения со скоростью звука. При этом сами молекулы воздуха в каждой точке среды совершают только колебательные движения относительно своего равновесия и далеко не перемещаются, амплитуда их смещения равна амплитуде колебаний мембраны.

Аналогичные звуковые колебания возникают и в левой полуплоскости, только когда с правой стороны происходит сжатие, в это же время с левой

стороны происходит разрежение. Это значит, что **фронты волн справа и слева от экрана сдвинуты по фазе на 180°** . Если экран имеет бесконечные размеры, то взаимовлияние звуковых волн, излучаемых вправо и влево отсутствует - это идеальный низкочастотный излучатель.

При колебании поршня в отверстии жесткого бесконечного экрана форма фронта излучаемой волны зависит от отношения диаметра поршня d к излучаемой длине волны λ . Для бесконечно большого экрана - чем меньше это отношение, тем ближе фронт волны к **полусферическому** (рис.2.1). Такой вид излучателя можно приближенно рассматривать как пульсирующий полушар.

Если же диаметр поршня существенно больше длины волны звука, то излучается **плоская волна**. **Плоской называется звуковая волна**, фронт которой представляет

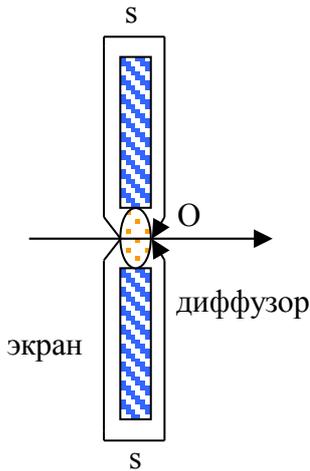
собой плоскость, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны. В этом случае звуковые лучи параллельны и звуковая энергия распространяется пучком.

Значительно больший практический интерес представляет колебания поршня в **экране конечных размеров**, что имеет непосредственное отношение к работе открытых АС. В этом случае из-за явления дифракции звуковые волны излучаемые двумя сторонами диафрагмы головки громкоговорителя огибают экран и начинают интерферировать (рис. 2.2.). Основным интерес представляет интерференция на оси громкоговорителя в правой полуплоскости.

Пусть в точке O фазовый сдвиг звуковой волны, излучаемой передней стороной диффузора равен 0. Фазовый сдвиг волн, излучаемых тыльной стороной также в точке O , определяется равенством

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot s}{\lambda} + \pi$$

где s - расстояние между центрами диффузора вокруг полуэкрана, в тоже время это и ширина экрана. По этой формуле не трудно рассчитать фазы для различных отношений s/λ :



$$\begin{aligned} s/\lambda = 1/16 & \quad \varphi = 1,125\pi \\ s/\lambda = 1/4 & \quad \varphi = 1,5\pi \\ s/\lambda = 1/2 & \quad \varphi = 2\pi \\ s/\lambda = 1 & \quad \varphi = \pi \end{aligned}$$

Рис.2.2. Дифракция звуковых волн на НЧ

Из этих расчетов следует, что пока $s/\lambda < 1/16$ (экран очень маленький) фазовые сдвиги интерферирующих волн практически противофазны, они компенсируют друг друга и имеет место так называемое акустическое короткое замыкание.

С дальнейшим увеличением размера экрана или увеличением частоты звукового сигнала суммарное звуковое давление в точке O растет и при $s/\lambda = 1/2$ звуковые колебания совпадают по фазе и давление удваивается.

При $s/\lambda = 1$ снова происходит полная компенсация звуковых волн и вторично проявляется эффект короткого акустического замыкания. С дальнейшим увеличением отношения s/λ дифракция начнет уменьшаться и эффект периодического нарастания и спада амплитуды суммарной звуковой волны постепенно исчезает.

Вторичный эффект короткого акустического замыкания и вся зависимость суммарной амплитуды звукового давления от размера экрана и частоты звуковых колебаний могут

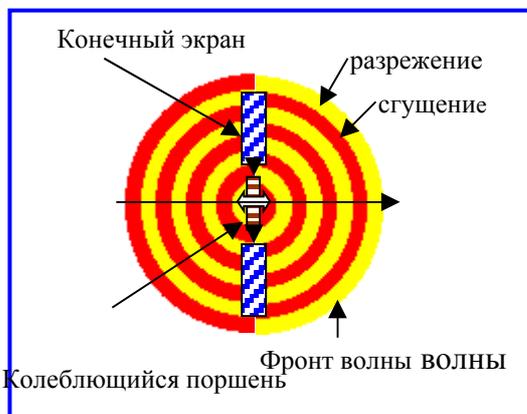


Рис.2.3. Полусферическая волна при экране конечных размеров

быть сильно уменьшены, если нарушить симметрию интерференционной картины. Для этого экран должен быть несимметричной формы и головка громкоговорителя должна размещаться в стороне от линий симметрии экрана. Этим достигается исключение совпадения по фазе или в противофазе сразу большого числа звуковых волн. Так всегда и делается при конструировании открытых АС.

При ограниченных размерах экрана излучается полусферическая волна только при условии, что длина волны звуковых колебаний значительно меньше размеров экрана и одновременно диаметр диафрагмы существенно

меньше длины волны (рис.3.3). В противном случае звуковое поле образуется разностным действием излучений лицевой и тыльной сторонами диффузора с учетом разности хода звуковых волн вокруг экрана. Если при этом длина излучаемых волн больше размера диафрагмы возникает эффект короткого акустического замыкания.

2.2. Колебательные движения поршня в длинной трубе

Другим классическим примером излучения плоских звуковых волн являются колебательные движения поршня в бесконечно длинной трубе. В такой трубе звук не должен отражаться от ее поверхности, а диаметр поршня должен быть намного больше длины излучаемого колебания.

В плоской волне амплитуда давления, колебательная скорость и интенсивность не убывают с расстоянием от источника звука. Не убывают и амплитуды смещения молекул



Рис.2.4. Плоская волна

среды. Физически это можно объяснить тем, что волна не расходится, площадь фронта волны с расстоянием не меняется и поэтому на любом расстоянии на единицу площади фронта волны приходится одно и то же количество энергии.

В плоской волне акустическое сопротивление носит чисто активный характер и определяется известным равенством

$$R_a = C_s \cdot \rho$$

При активном акустическом сопротивлении звуковое давление и колебательная скорость синфазны, т.е. фазовый сдвиг между давлением и колебательной скоростью равен нулю. Поэтому интенсивность звука определяется простейшим равенством

$$I = P^2 / C_s \rho ,$$

Так как в плоской волне отсутствует сдвиг по фазе между давлением и колебательной скоростью, то сопротивление излучения является также активной величиной. Используя это сопротивление, можно рассчитать значение излучаемой мощности $W_{изл}$ по формуле

$$W_{изл} = V^2 R_{изл} .$$

2.3. Пульсирующий шар-сфера

Волна называется сферической, если энергия от источника звука распространяется равномерно во всех направлениях и фронт волны имеет сферическую форму. Идеальным источником сферических волн является пульсирующий шар-сфера с радиусом R (рис.2.5).

Звуковые лучи в шаровой волне совпадают с радиусами сферы. Излучение громкоговорителей на средних и высоких частотах имеет фронт близкий к сферическому.

В сферической волне амплитуды звукового давления и колебательной скорости убывают с расстоянием r от излучателя по гиперболическому закону в соответствии с формулами:

$$P_m = P_{m1} / r ,$$

$$V_m = V_{m1} / r ,$$

где индексом «1» обозначаются амплитудные значения давления и скорости на расстоянии 1 м от центра сферы.

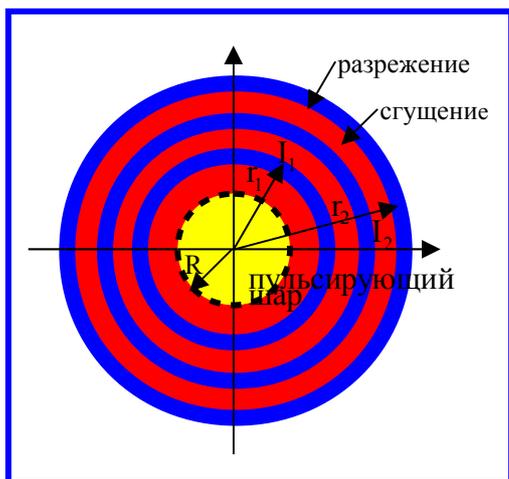


Рис.2.5. Сферическая волна

Интенсивность сферической волны можно определить через излучаемую мощность звуковых колебаний

$$I_1 = \frac{W_{изл}}{4\pi r_1^2} \quad I_2 = \frac{W_{изл}}{4\pi r_2^2}$$

Из этих равенств следует, что сила звука в сферической волне убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от излучателя.

Для расчета интенсивности звука сферической волны удобно пользоваться равенством

$$I = P_m^2 / 2C_s \rho'$$

где P_m является функцией расстояния r .

Поскольку фронт волны представляет собой сферу, то все точки, лежащие на поверхности такого фронта с радиусом r будут колебаться синфазно с одинаковыми амплитудами. Следовательно, амплитуда и фаза колебаний молекул в сферической волне будут зависеть только от расстояния до источника звука. Колебательная скорость отстает от звукового давления на угол φ .

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)$$

В сферической волне акустическое сопротивление имеет комплексный характер и его модуль определяется равенством

$$[Z_a] = \rho \cdot C_s \cdot \cos \varphi$$

2.4. Присоединенная масса воздуха

На рис.2.6. представлена зависимость между давлением и колебательной скоростью от расстояния от источника звука для сферических волн. Окружающее источник

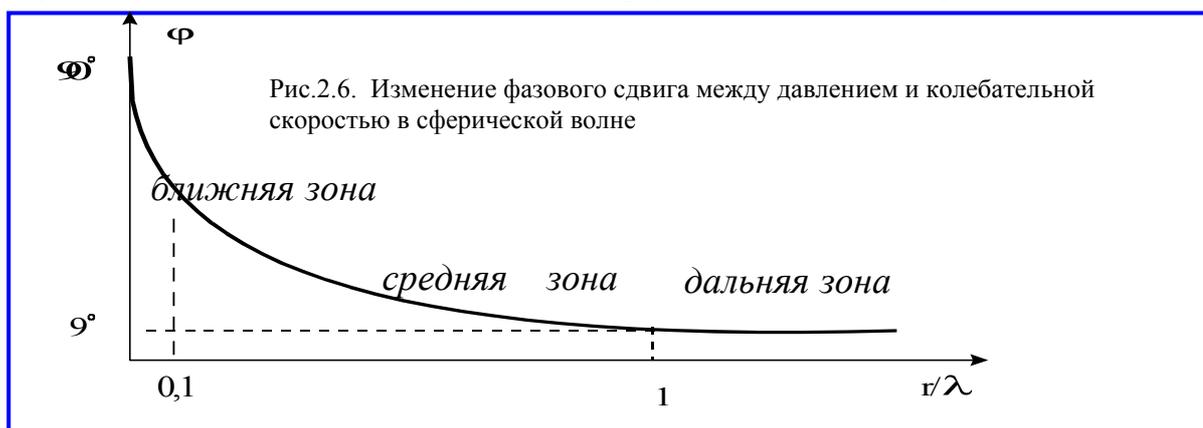


Рис.2.6. Изменение фазового сдвига между давлением и колебательной скоростью в сферической волне

сферической волны пространство можно условно разделить на три характерные зоны. Ближняя зона—пространство, непосредственно примыкающее к излучателю и заключенное в сфере с радиусом $r \ll 0,1\lambda$. В этой зоне фазовый сдвиг меняется от 90 до 50 градусов. Средняя зона от $0,1\lambda/r \geq r \leq \lambda/r$. В этой зоне фронт волны сферический, фазовый сдвиг уменьшается с расстоянием от 50 до 9 градусов и фронт волны постепенно переходит от сферического к плоскому. Дальняя зона – пространство, простирающееся за ее пределами, $r \geq \lambda$. В этой зоне фронт волны практически плоский.

В ближней зоне амплитуда звукового давления резко убывает с расстоянием и градиент давления велик. В дальней зоне амплитуда почти не убывает, как и в плоской волне. Это значит, что *всегда сферическая волна переходит в плоскую*.

В ближней зоне вся масса среды, заключенная в этой зоне, колеблется как единое целое синфазно с поршнем и как бы добавляется к его массе. Поэтому эту массу называют **присоединенной массой среды** (m_c). Поскольку ближняя зона имеет наибольшую протяженность на низких частотах, то и присоединенная масса среды максимальна на этих частотах.

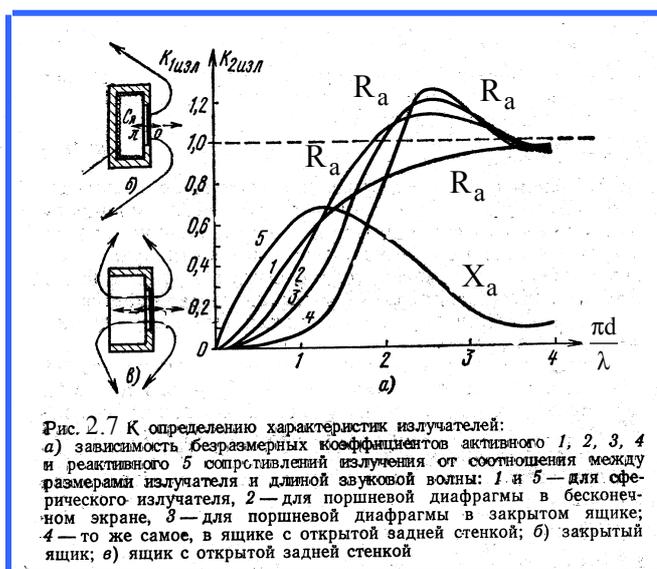
Например, на частоте 16 Гц длина волны равна 21 м, поэтому ближняя зона занимает область с радиусом $r \cong 2,1$ м. На частоте 1000 Гц $\lambda = 3,4$ см, поэтому сфера, в которой могла бы быть заключена ближняя зона, будет иметь радиус всего 0,34 см.. Это значит, что ближней зоны практически нет и, следовательно, присоединенная масса равна нулю. Эта масса должна учитываться при расчете резонансных частот акустических излучателей.

2.5. Сравнительная оценка излучателей звука

Зависимости активной и реактивной составляющих акустического сопротивления от отношения d к λ для различных типов излучателей приведены на **рис.2.7**. Эти графики полностью определяют низкочастотную частотную область излучения сферических и плоских волн для экранов конечных и бесконечных размеров при различных значений коэффициента K_d

$$K_d = \frac{\pi d}{\lambda}$$

На **рис.2.7**. кривая 1 относится к активной составляющей акустического сопротивления сферического излучателя. Поэтому она выше всех остальных кривых и это



значит, что обеспечивается наиболее лучшее воспроизведение низких частот при выбранном значении $K_d < 1$. Кривая 2 относится к Z_a поршневого излучателя в бесконечном экране, который излучает полусферическую волну. В этом случае, пока $K_d < 1.5$ лучшее воспроизведение НЧ обеспечивает сферический излучатель. Для $K_d > 1.5$ преимуществом обладает поршневой излучатель. Для $K_d > 4$ никакой разницы между этими излучателями нет.

Для сравнения на этом же рисунке приведены графики для закрытой и открытой акустических систем. Пока $K_d < 1$ воспроизведение НЧ в закрытой

системе значительно хуже, чем для поршневого излучателя в бесконечном экране.

В открытой акустической системе, когда размеры экрана меньше длины звуковой волны, возникает дифракция волн в результате чего увеличивается реактивная составляющая акустического сопротивления, а активная уменьшается. При этом противофазные плоские звуковые волны огибают экран, возникает интерференция и НЧ звуковые колебания подавляют друг друга, что поясняется рис.2.7.

Из графиков действительно видно, что пока $K_d < 1$ головка громкоговорителя без акустического оформления практически не воспроизводит низкие частоты, но уже при $K_d > 3$ она воспроизводит звук не хуже, чем излучатели с бесконечным экраном. Для громкоговорителя с диаметром диффузора 10 см, это соответствует частотам выше 230 Гц. Для диффузора диаметром 50 см эта частота будет равна 45 Гц.

Ближнее поле поршневой диафрагмы отличается от поля сферической волны. На небольших расстояниях от излучателя в бесконечном экране имеет место интерференция звуковых волн, исходящих от разных участков диафрагмы. Если длина волны много больше размеров диафрагмы эти разности хода невелики и все волны складываются почти в одной фазе. Если же длина волны значительно меньше размеров диафрагмы, то из-за интерференции волн в ближней зоне звуковое давление меняется по очень сложному закону с максимумами и минимумами, может быть и равно нулю. В этом случае только на расстоянии, превышающем размеры диффузора в несколько раз, закон изменения звукового давления при удалении от излучателя становится монотонно убывающим. И именно в этой области нужно устанавливать измерительный микрофон.

Глава 3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

3.1. Принцип действия

Принцип работы электродинамического громкоговорителя основывается на законе Фарадея о поведении электрического проводника с током в постоянном магнитном поле. В соответствии с этим законом ток проводника вызывает магнитное поле, а при взаимодействии поля магнита и поля проводника возникает сила, которое приводит в движение проводник. Если через проводник в форме катушки пропускать переменный ток, то катушка начинает совершать колебательные движения. Диффузор, закрепленный на этой катушке, излучает звуковые колебания - это и есть электродинамический громкоговоритель. В общем случае громкоговоритель представляет собой четырехполюсник с электрическим входом и механическим выходом.

3.2. Конструкция

Магнитная цепь головки электродинамического громкоговорителя состоит из кольцевого постоянного магнита 7, изготовленного из сплавов с высокой магнитной индукцией (рис.3.1). Элементы 6, 8 и 9 формируют магнитную цепь, которая в воздушном кольцевом зазоре 10 формирует радиальное магнитное поле. Подвижная система состоит из звуковой катушки 1, находящейся в кольцевом воздушном зазоре и жестко скрепленной с коническим диффузором 2 и центрирующей шайбы 5. Все элементы закреплены на металлическом корпусе 4 с отверстиями для тылового излучения 11. Такая конструкция на низких частотах, меньших

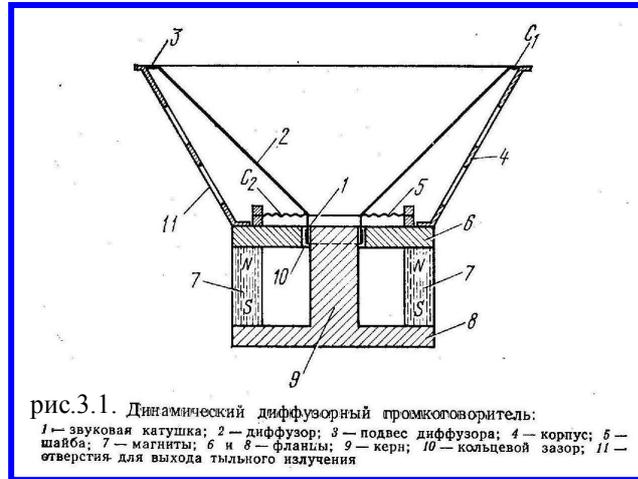
$$F_{zp} = 154/d$$

работает как поршневой излучатель. Если $d = 0,25$ м, то $F_{zp} = 616$ Гц.

Колебательные движения диффузора возникают при действии на него силы Γ , определяемой равенством

$$\Gamma = Bli,$$

которая прямо пропорциональна индукции в зазоре B , длине провода l и силе тока i . Чем больше сила, тем больше амплитуда колебаний.



3.3. Эквивалентная схема головки громкоговорителя

Рассмотренная механическая подвижная система на низких и средних частотах может рассматриваться как простая колебательная система, состоящая из массы подвижной системы m (соколеблющаяся масса воздуха m_c плюс масса диффузора m_d) и суммарной

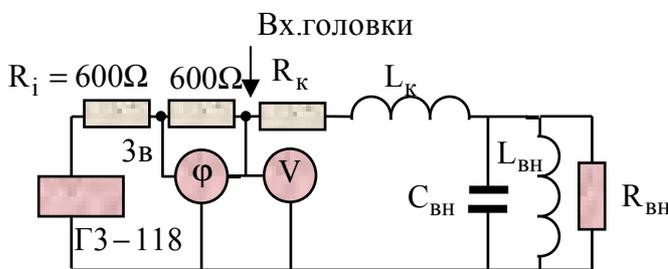


Рис.3.2. Схема измерений параметров эквивалентной схемы головки громкоговорителя на НЧ

гибкости C_m (гибкость подвеса, гибкость центрирующей шайбы и гибкость воздуха ящика, если он есть). В эту колебательную систему входят три активных сопротивления, определяющие потери (трение катушки о воздух в зазоре $R_{тр}$, механические потери в диффузоре, центрирующей шайбе и подвесе, а также сопротивление излучения $R_{изл}$).

Эквивалентная схема головки громкоговорителя для НЧ и измерительная схема приведены на рис.3.2. В этой схеме задается ток 5 мА, вольтметр В3-38 измеряет напряжение на входе головки, а цифровой фазометр Ф-16 измеряет фазовый сдвиг между током и напряжением.

При составлении эквивалентной схемы механические параметры заменялись электрическими аналогами в соответствии с равенствами

$$\frac{1}{R_{vn}} = \frac{R_{tr} + R_{izl}}{K_c^2}, \quad j\omega C_{vn} = j\omega \frac{m_{dc} + m}{K_c^2}, \quad \frac{1}{j\omega L_{vn}} = j\omega \frac{1}{C_m K_c^2},$$

где R_{vn} – вносимое активное сопротивление, C_{vn} – вносимая емкость, L_{vn} – вносимая индуктивность, $K_c = Bl$ – коэффициент электромагнитной связи.

В этих формулах следует обратить внимание, что для головок громкоговорителей масса вызывает емкостную реакцию, а гибкость – индуктивную.

Комплексное входное **электрическое сопротивление** головки громкоговорителя определяется суммой комплексных значений сопротивления катушки и вносимого сопротивления

$$Z_{\text{вх}} = Z_{\text{эл}} + Z_{\text{вн}},$$

где

$$Z_{\text{эл}} = R_k + j\omega L_k$$

R_k – активное сопротивление катушки, L_k – индуктивность катушки

$$Z_{\text{вн}} = \frac{K_c^2}{(R_{tr} + R_{izl}) + j\omega(m_{dc} + m)} + \frac{1}{j\omega C_m}$$

В этой формуле знаменатель определяет **полное механическое сопротивление** головки Z_m . Это значит, что по измеренному значению $Z_{\text{вх}}$ можно рассчитать активную и реактивную составляющие механического сопротивления.

3.4. Электромеханических параметры головок громкоговорителей

На основе приведенного равенства для входного сопротивления головки громкоговорителя в лабораторных работах 2А и 7А требуется определить все электрические и механические параметры головки громкоговорителя, когда известен только коэффициент электромеханической связи $K_c = 5$. Это вполне реально, если имеется возможность проводить измерения модуля и фазы входного сопротивления в воздухе и вакууме.

Резонансная частота колебательной системы **в воздухе** F_{ma} , определяемая m и C_m называется частотой **механического резонанса**, обычно она находится в диапазоне 80...120 Гц

$$F_{ma} = \frac{1}{2\pi\sqrt{m \cdot C_m}}.$$

Резонансная частота колебательной системы **в вакууме** F_{mv} определяется m_d и C_m . Так как при работе головки громкоговорителя в вакууме отсутствует соколеблющаяся масса воздуха, то резонанс получается выше на несколько герц.

$$F_{mv} = \frac{1}{2\pi\sqrt{m_d \cdot C_m}}.$$

И в воздухе и в вакууме частоты механического и электромеханического резонансов определяется по равенству фазового сдвига между током и напряжением на зажимах головки громкоговорителя.

Масса и гибкость создают **параллельный резонанс напряжений**, поэтому входное сопротивление головки на частоте резонанса носит чисто активный характер и имеет максимальное значение

$$R_{in\max} = R_k + R_{vn}$$

Эти формулы крайне важны практически. На частоте значительно ниже механического резонанса R_{vn} стремится к нулю, поэтому сопротивление катушки по постоянному току измеряется на частоте 20 Гц и

$$R_k = R_{in}.$$

Последовательное соединение индуктивности катушки L_k и гибкости подвеса диффузора C_m в эквивалентной схеме вызывает **последовательный резонанс** (резонанс токов), при котором входное сопротивление головки громкоговорителя минимально, а резонансная частота определяется равенством

$$F_{эм} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k \cdot C_m}}$$

Этот резонанс называется **электромеханическим**, и он находится в диапазоне 500..600 Гц. Выше этого резонанса, входное сопротивление головки определяется сопротивлением и индуктивностью катушки и монотонно растет с частотой. На частотах 8...10 кГц можно пренебречь активной составляющей катушки и тогда индуктивность

$$L_k = \frac{|Z_{in}(F)| \cdot \sin(\varphi(F))}{2 \cdot \pi \cdot F}$$

катушки головки громкоговорителя в Генри рассчитывается по этой формуле, где модуль входного сопротивления и фаза измеряются на частоте $F = 8...10$ кГц.

Идея определения массы подвижной системы, например, **в воздухе**, основывается на проведении двух измерений и составления на их основе системы двух уравнений с неизвестными значениями массы и гибкости, которая решается относительно массы. Сначала измеряется частота механического резонанса в воздухе F_{ma} по равенству нулю фазового сдвига.

Затем на частоте несколько выше резонансной $F_{ia} = 1,1F_{ma}$, где реактивная составляющая не равна нулю и находится на линейном участке ее зависимости от частоты, измеряется входное сопротивление головки Z_{in} и фазовый сдвиг φ_{ia} . По этим данным вычисляется реактивная составляющая X_{ia} , определяемая равенством

$$X_{ia} = Z_{in} \cdot \sin \varphi_{ia}$$

Заметим, что линейному участку АЧХ реактивной составляющей соответствует фазовый сдвиг не более минус 40...45 градусов.

Теперь система уравнений имеет вид

$$F_{ma} = \frac{1}{2\pi\sqrt{m \cdot C_m}}$$

$$X_{ma} = 2\pi F_{ia} \cdot m - \frac{1}{2\pi F_{ia} \cdot C_m}$$

Решение этой системы относительно массы имеет вид

$$m = \frac{X_{ia}}{1,09F_{ia}} \text{ кг.}$$

Гибкость определяется равенством

$$C_m = \frac{1}{(2\pi F_{ma})^2 \cdot m}, \text{ Н/М}$$

При работе головки громкоговорителя **в вакууме** изменяются частота механического резонанса F_{mvu} и измерительная частота $F_{iv} = 1,1 F_{mv}$, так как отсутствует соколеблющаяся масса воздуха. Поэтому под массой будет пониматься только масса диафрагмы головки громкоговорителя m_d . Расчетная формула для нее имеет вид

$$m_d = \frac{X_{mv}}{1,09F_{iv}}, \text{ кг.}$$

Очевидно, что масса соколеблющегося воздуха определяется равенством

$$m_c = m - m_d.$$

Расчет механических параметров головки громкоговорителя начинается с определения активных и реактивных составляющих электрического входного сопротивления головки громкоговорителя. Для этого производим измерение входного сопротивления в воздухе, в вакууме и в режиме заторможенной катушки громкоговорителя.

Необходимость измерения параметров заторможенной катушки связана с тем, что ее активное и реактивное сопротивления часто оказывается соизмеримыми с активным и реактивным составляющими вносимого сопротивления. Для повышения точности их надо учитывать, хотя из-за этого расчетные формулы сильно усложняются

Порядок измерений, когда головка работает в воздухе:

1. Измеряем модуль $|Z|_a$ и фазу φ_a входного сопротивления свободной головки и по ним рассчитываем активную и реактивную составляющие входного сопротивления – R_a и X_a ;
2. Измеряем модуль $|Z|_{ok}$ и фазу φ_{ok} входного сопротивления заторможенной головки, у которой катушка залита парафином и не может двигаться, рассчитываем активную и реактивную составляющие – R_{ok} и X_{ok} ;

Порядок измерений, когда головка работает в вакууме:

1. измеряем модуль $|Z|_v$ и фазу φ_v входного сопротивления головки под вакуумным колпаком без воздуха и рассчитываем активную и реактивную составляющие – R_v и X_v .
2. На основе полученных данных рассчитываем активную и реактивную составляющие механического сопротивления
3. Сопротивления потерь в эквивалентной схеме рассчитываются с помощью активных составляющих механического сопротивления

Расчетные формулы при работе головки в воздухе.

Вспомогательный коэффициент

$$A_a = \frac{(R_a - R_{ok}) + (X_a - X_{ok})}{K_c^2}$$

Активная и реактивная составляющие механического сопротивления в воздухе

$$R_{ma} = \frac{(R_a - R_{ok})}{A_a}, \quad X_{ma} = \frac{(X_a - X_{ok})}{A_a}$$

Механическое сопротивление громкоговорителя в комплексной форме

$$Z_{ma} = R_{ma} - jX_{ma}$$

Вносимое сопротивление

$$R_{vn} = R_a - R_k$$

Суммарное сопротивление

$$R_{tr} + R_{izl} = R_{ma}$$

Расчетные формулы при работе головки в вакууме

Вспомогательный коэффициент

$$A_v = \frac{(R_v - R_{ok}) + (X_v - X_{ok})}{K_c^2}$$

Активная и реактивная составляющие механического сопротивления в вакууме

$$R_{mv} = \frac{(R_v - R_{ok})}{A_v}, \quad X_{mv} = \frac{(X_v - X_{ok})}{A_v}$$

Механическое сопротивление громкоговорителя в комплексной форме

$$Z_{mv} = R_{mv} - jX_{mv}$$

Сопротивление трения

$$R_{tr} = R_{mv}$$

Сопротивление излучения

$$R_{izl} = R_{ma} - R_{mv}$$

Коэффициент полезного действия головки

$$КПД = \frac{R_{vn}}{R_{vn} + R_k} \cdot \frac{R_{izl}}{R_{izl} + R_{tr}}$$

В качестве примера в таблице приведены результаты измерений и расчетов

Расчет входного механического сопротивления							
Кс=5	Частоты, Гц		Uг, мВ	Z оМ	φ град фаза	Сопротивление	
	Fma	Fia				электрическое	механическое
Воздух	140	154	Ua 120	Z a 24	φa=-43,7	Ra=17,3 Xa=-16,6	Rma=0,72 Xma=0,94 Zma=0,72+j0,94
Торможение	-	Fia 154	Uok= 22,5	Z ok 4,5	φok=+1,3	Rok=4,5 Xok=0,1	
Вакуум	Fmv 155	Fiv 170	Uv=1 144	Z v 26,8	φv=-44,7	Rv=20,5 Xv=-20,3	Rmv=0,6 Xmv=0,76 Zmv=0,6+j0,76
Расчет механических параметров							
m, Г	mс, Г	Lк мкГн	m, Г	КПД,%	Rвн,оМ	Cm,н/м	Rтр,оМ
0,128	1,5		5,6	13,3	13,6	2,3 10 ⁻⁴	0,6

3.5. Добротность

Добротность головки громкоговорителя определяет скорость затухания свободных механических колебаний. Она оказывает сильное влияние на равномерность частотной характеристики громкоговорителя в области низких частот. Величина добротности определяется активными потерями в механической колебательной системе головки громкоговорителя, чем они больше, добротность ниже. Напомним, в радиотехнике под добротностью контура понимается отношение частоты резонанса к полосе пропускания на уровне минус 3 дБ. Добротности таких контуров от 40 до 200.

В громкоговорителях потери значительно больше и добротность не превышает значений от 0,5 до 5. Другое отличие в том, что потери в головках могут быть чисто электрическими, за счет сопротивления катушки R_k , а могут вызываться активной составляющей механического сопротивления R_m . Поэтому используются два понятия - электрическая и механическая добротности. Добротностью головки называют величину

$$Q = \frac{\omega_m m}{R_m + K_{CK}^2 / R}$$

Механическая и электрическая добротности определяется равенствами

$$Q_{el} = \frac{\omega_m m}{K_C^2 / R_k}, \quad Q_m = \frac{\omega_m m}{R_m}.$$

Все эти добротности связаны соотношением

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{el}} + \frac{1}{Q_m}$$

Обычно Q_m довольно велико, а Q_{el} мало, поэтому резонансное сопротивление значительно больше R_k .

Существуют несколько методов измерения добротности. По рекомендациям МЭК сначала определяется частота механического резонанса F_m , замеряется U_{max} и рассчитывается значение $|Z_{in}|_{max}$. Затем слева и справа от резонансной частоты находятся частоты $F1$ и $F2$, напряжения которых определяются равенством

$$U_{1,2} = U_{max} \sqrt{\frac{R_k}{|Z_{in}|_{max}}}$$

В этом случае механическая и полная добротности определяется равенствами

$$Q_m = \frac{\sqrt{F1 \cdot F2}}{F2 - F1} \cdot \sqrt{\frac{|Z_{in}|_{max}}{R_k}}, \quad Q = \frac{\sqrt{F1 \cdot F2}}{F2 - F1} \cdot \sqrt{\frac{R_k}{|Z_{in}|_{max}}}$$

Понятия добротности справедливы для открытых и закрытых акустических систем. Для корпусов с фазоинверторами понятие добротности не имеет смысла.

3.6. Z - характеристики

Под этим термином понимается частотная характеристика модуля полного электрического сопротивления головки громкоговорителя. Пример этой характеристики приведен на **рис. 3.3**. Она снимается в режиме заданного тока. На самых низших частотах звукового диапазона модуль входного сопротивления практически не отличается от активного сопротивления катушки на постоянном токе R_k .

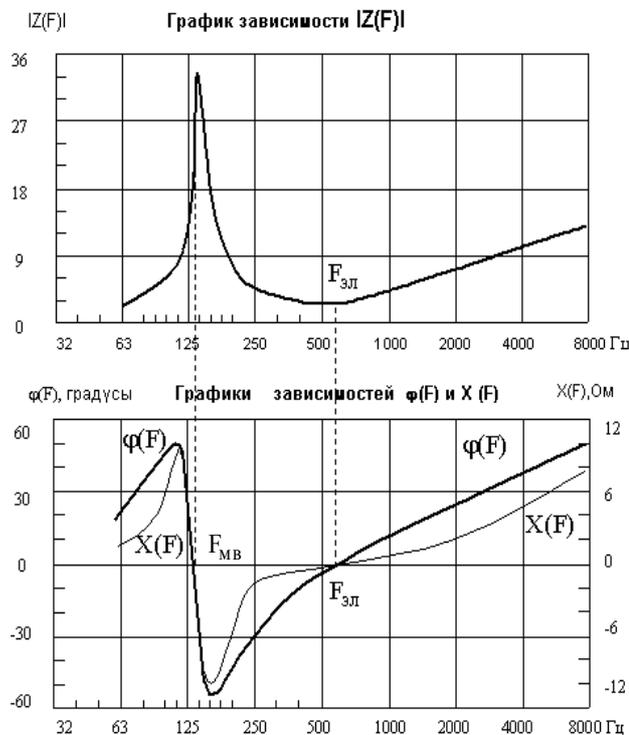


Рис.3.3. Z и фазовая характеристики головки громкоговорителя

На частоте механического резонанса входное сопротивление резко возрастает за счет вносимого сопротивления. Это напряжение тем больше, чем больше механическая добротность головки. Входное сопротивление минимально на частоте электромеханического резонанса, но на графике этот минимум практически не виден.

Дальнейший рост обусловлен индуктивностью катушки. Обычно эта индуктивность около 100 мкГн.

Крайне любопытна форма частотной характеристики реактивной составляющей входного сопротивления. В районе частоты механического резонанса она имеет вид практически прямой линии с громадной крутизной. Ее изменение от максимума до минимума происходит в диапазоне менее 1/3 октавы. Это значит, что для измерения массы диффузора измерения следует производить при отклонении от резонансной частоты всего на 1/6 октавы. За пределами этого диапазона реактивная составляющая быстро уменьшается до нуля.

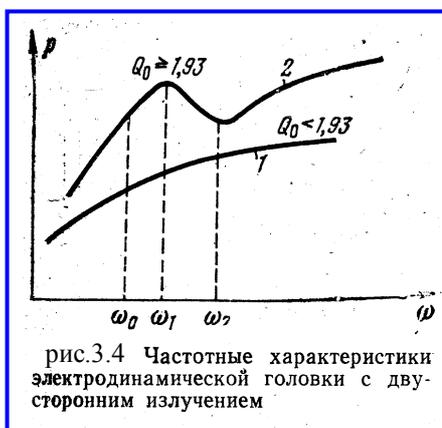
Фазовая характеристика дважды проходит через нулевые значения на резонансных частотах. Точки резонанса точно определяются по изменению знака фазы.

3.7. Акустическое оформление громкоговорителей

Акустическое оформление диффузорных громкоговорителей предназначено для улучшения воспроизведения низких частот при размещении их в корпусах относительно небольших размеров. Для этого разными методами устраняется или уменьшается влияние дифракции тылового излучения. В настоящее время наиболее широко используются следующие виды акустических оформлений:

1. Плоский экран
2. Корпус с открытой задней стенкой
3. Корпус с закрытой задней стенкой без демпфирования
4. Корпус с закрытой задней стенкой с демпфированием
5. Корпус с фазоинвертором

Акустическая система с плоским экраном. неравномерность на частотах выше резонансной сильно зависит от добротности головки. При $Q=1$ характеристика имеет

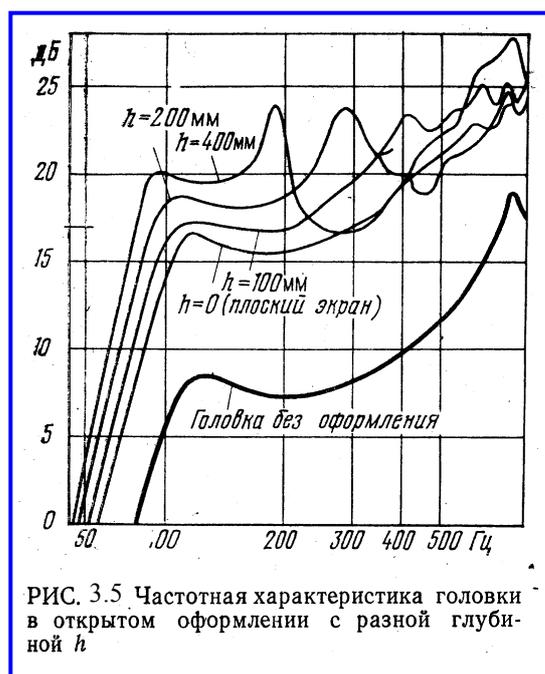


наиболее плоскую форму вплоть до граничной частоты поршневого режима излучения. Характер АЧХ при других значениях добротности показан на [рис.3.4](#). Наиболее часто рекомендуется $Q = 0,707$.

Заметим, какой бы большой экран мы не выбрали воспроизводиться будут частоты только выше частоты механического резонанса головки, а она ниже 40 Гц не бывает.

Корпус с открытой задней стенкой отличается от экрана тем, что имеются боковые стенки, благодаря которым увеличиваются эффективные размеры экрана, но этот эффект выражен не сильно. С увеличением глубины стенок открытый ящик превращается в трубу, из-за чего возникают стоячие волны, вызывающие появление многочисленных резонансов. На [рис.3.5](#) хорошо видно как улучшается воспроизведение низких частот от ситуации, когда головка вообще не имеет оформления, затем ставится плоский экран и к нему добавляются боковые стенки различной высоты. Особо сильно это оказывает

влияние на частоты ниже 63 Гц. Заметим, что особой разницы в частотных характеристиках нет, когда отсутствует задняя стенка или она есть, но с большим числом



отверстий, что и используется на практике.

Корпус с закрытой задней стенкой. В такой АС обеспечивается полное разделение звуковых полей, образуемых задней и передней сторонами диффузора громкоговорителя и тем самым исключается возможность дифракции и акустического короткого замыкания. Звуковое давление создает только передняя сторона диффузора, которая излучает **сферическую звуковую волну**.

Когда диффузор движется внутрь закрытого корпуса объем воздуха в корпусе V_a уменьшается, а давление P_a уменьшается. Связь между этими параметрами изучается в газовой термодинамике и описывается известным равенством

$$P_a V_a^\gamma = \text{const}$$

где γ - показатель адиабаты. Если при этом процессе отсутствует обмен тепла воздуха с окружающей средой, то процессы сжатия и расширения воздуха носят адиабатический характер и тогда показатель адиабаты равен 1,4.

Недостатком закрытых АС является то, что у них задняя сторона диффузора нагружена **упругостью** U_m объема воздуха в корпусе. Чем меньше этот объем, тем больше упругость воздуха, тем выше резонансная частота АС. Эта упругость определяется важным равенством

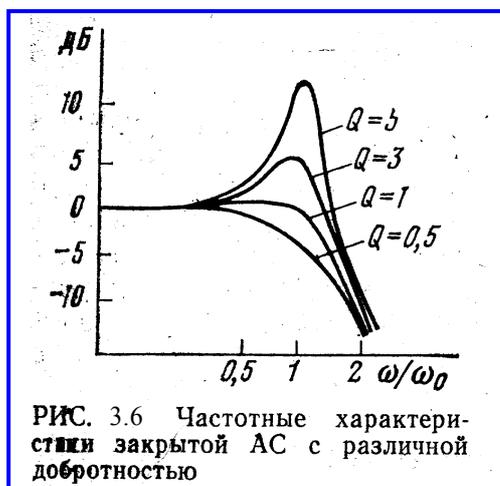
$$U_m = \gamma \rho S_d^2 / V_a$$

где S_d – эффективная площадь диффузора. Как видно, показатель адиабаты оказывает существенное влияние на упругость.

Таким образом, высокая упругость воздуха приводит к значительному повышению частоты механического резонанса и, как следствие к ухудшению воспроизведения низких

частот. Обратите внимание, что в данном случае – задняя стенка корпуса не улучшает, а ухудшает воспроизведение низких частот.

Поэтому во всех закрытых АС обязательно применяют головки с более тяжелой подвижной системой, чтобы снизить частоту резонанса в закрытом оформлении. В свою очередь, увеличение массы подвижной системы снижает чувствительность АС.



Особенно малой эффективностью обладают малогабаритные АС, у которых упругость объема воздуха внутри оформления существенно больше упругости закрепления подвижной системы. Такие АС называются системами с «компрессионным подвесом».

Неравномерность АЧХ закрытой АС в области НЧ зависит от добротности головки, что иллюстрируется рис.3.6. Обычно она находится в пределах 0,8...1. В противном случае получается «раздемпфирование». Это значит, что на фоне музыки будут еще колебания в такт с частотой механического резонанса - возникает гудение и нечистое воспроизведение низких тонов. Надо еще заметить, что в закрытом корпусе ухудшается неравномерность АЧХ из-за резонансных явлений акустического оформления.

Корпус с закрытой задней стенкой и с демпфированием. Внесение рыхлого заполнения в корпус закрытой АС превращает процесс сжатия и расширения воздуха из **адиабатического процесса в изотермический**. Последний отличается тем, что при сжатии происходит нагрев воздуха за счет потери энергии в демпфирующем материале. Однако, благодаря теплообмену с внешней средой через диффузор температура остается постоянной.

Изотермический процесс описывается тем же равенством, что и адиабатический, только показатель адиабаты в этом случае равен 1. Это значит, что упругость воздушной среды уменьшается в 1,4 раза, а резонансная частота снижается в $\sqrt{1,4}$ раза. Естественно, это приводит к улучшению воспроизведения НЧ. Из любопытства заметим, что при изотермическом процессе сжатия скорость распространения звука внутри корпуса будет заметно меньше, чем снаружи.

Заполнение корпуса громкоговорителя демпфирующим материалом уменьшает также излучение стенок корпуса и несколько подавляет паразитные акустические резонансы акустического оформления.

Корпус с фазоинвертором. Такая АС отличается от закрытой АС тем, что в передней панели корпуса имеется отверстие или отверстие с трубой внутрь корпуса, круглого или квадратного сечения (рис.3.7). Отверстие и объем корпуса представляют собой резонатор с параллельным соединением гибкости воздуха в корпусе и массы воздуха в отверстии вместе с колеблющейся массой воздуха. Частота этого резонанса подбирается равной частоте механического резонанса подвижной системы диффузора. Причем важно, чтобы добротность головки была невысокой (< 0,6). При этих условиях входное сопротивление

АС будет иметь провал на частоте механического резонанса головки (рис.3.8), а ниже и выше этой частоты возникают резонансные пики. Поскольку резонансная частота АС становится ниже, воспроизведение НЧ заметно улучшается и для этого не надо применять специальные головки.

На частоте резонанса f_2 инвертор поворачивает фазу на 180° , поэтому фазы звуковых колебаний воздуха в отверстии фазоинвертора и в передней плоскости диффузора громкоговорителя практически совпадают, поэтому суммарное звуковое давление увеличивается. На частоте механического резонанса инвертор поворачивает фазу только на 90° , поэтому тыльное излучение лишь немного увеличивает суммарное давление. На частоте f_1 никакой добавки давления нет. Таким образом, фазоинвертор повышает чувствительность преимущественно на частотах выше частоты механического резонанса. На средних частотах из-за инерционности воздуха отверстие фазоинвертора как бы «закупоривается» и конструкция работает как закрытая АС.

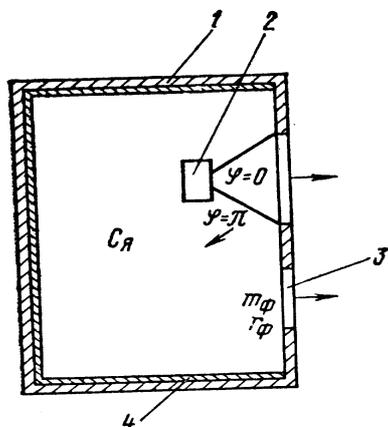


Рис. 3.7. Громкоговоритель с фазоинвертором:
1 — ящик; 2 — громкоговоритель;
3 — отверстие инвертора; 4 — внутренняя обивка поглощающим материалом

В лабораторной работе N 3А исследуются АЧХ входного сопротивления 4 типов АС (рис.3.9): открытая акустическая система (ОАО), закрытая акустическая система без наполнителя (ЗАО1), закрытая акустическая система с демпфирующим наполнителем (ЗАО2) и акустическая система с фазоинвертором (АОФ). Они все выполнены в одинаковых корпусах и в них используется головки одного типа с

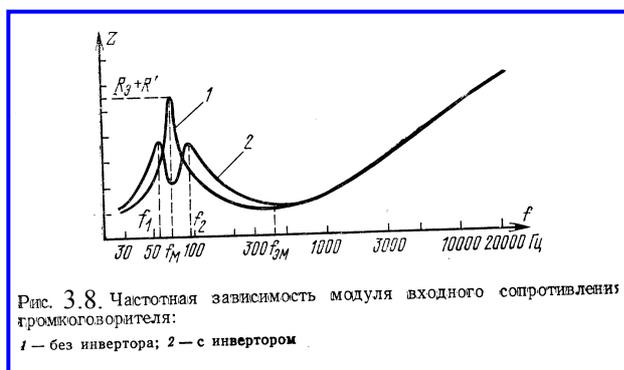


Рис. 3.8. Частотная зависимость модуля входного сопротивления громкоговорителя:
1 — без инвертора; 2 — с инвертором

сопротивлением 4 ома. В открытой АС частота механического резонанса равна 80 Гц и она ниже резонансной частоты отдельной головки. В закрытой АС без заполнения из-за

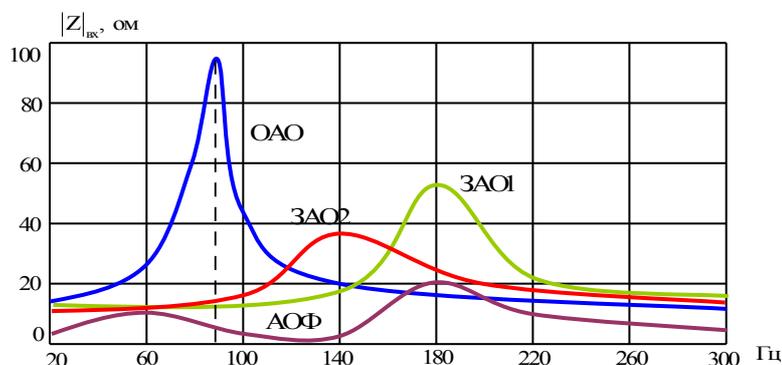


Рис.3.9. Z-характеристики громкоговорителей с различным акустическим оформлением

гибкости ящика резонансная вдвое выше и равна 180 Гц. В ЗАО2 благодаря наполнителя

процесс сжатия воздуха становится изотермическим, это эквивалентно увеличению объема корпуса и резонансная частота понижается до 140 Гц. Корпус с фазоинвертором в соответствии с теорией имеет две резонансные частоты. Первая из них равна 60 Гц и, следовательно, эта АС будет лучше воспроизводить низкие частоты. В настоящей лабораторной работе фазоинвертор настроен не точно - его два максимума АЧХ должны быть симметрично расположены относительно резонанса ОАО (рис.3.8).

По качеству воспроизведения НЧ в настоящей лабораторной работе второе место занимает открытая АС. Для того чтобы закрытые АС реализовали свои потенциальные возможности по воспроизведению НЧ, в них необходимо установить головки с большей массой подвижной системы и более низкой частотой механического резонанса. Из всего этого следует, что устранение дифракции не всегда приводит к лучшему воспроизведению НЧ. Это необходимое условие, но недостаточное.

3.8. Амплитудно-частотная характеристика громкоговорителя

АЧХ громкоговорителя обязательно измеряется в октавной шкале частот с равномерными отсчетами точек через 1/3 или 1/6 октавы. Основным параметром АЧХ является ее **неравномерность**. Она определяется как разность максимального и минимального уровней звукового давления в децибелах в **рабочем диапазоне частот**. При этом пики и провалы шириной менее 1/8 октавы во внимание не принимаются. Это связано с тем, что они обычно возникают из-за паразитных резонансов корпусов и возникновения стоячих волн, как в корпусе, так и на самом диффузоре. Особого влияния на слуховое восприятие они не оказывают. Величина допустимой неравномерности в рабочем диапазоне частот задается в ТУ и может быть от 5 до 25 дБ. Обычно задается неравномерность, а рабочий диапазон частот определяется по АЧХ.

Для широкополосных АС с диффузорными громкоговорителями в большинстве случаев нижний диапазон частот не ниже 70...80 Гц и в редких случаях достигает 50...60 Гц. Это возможно при добротности АС в пределах 2...1. Верхняя граничная частота ограничивается 6000...7000 Гц. В некоторых случаях удается повысить верхний диапазон до 11000...12000 Гц.

На практике измерение АЧХ производится двумя методами, которые исследуются в лабораторной работе N 6А: по точкам через 1/3 октавы (N0) и одновременно тремя

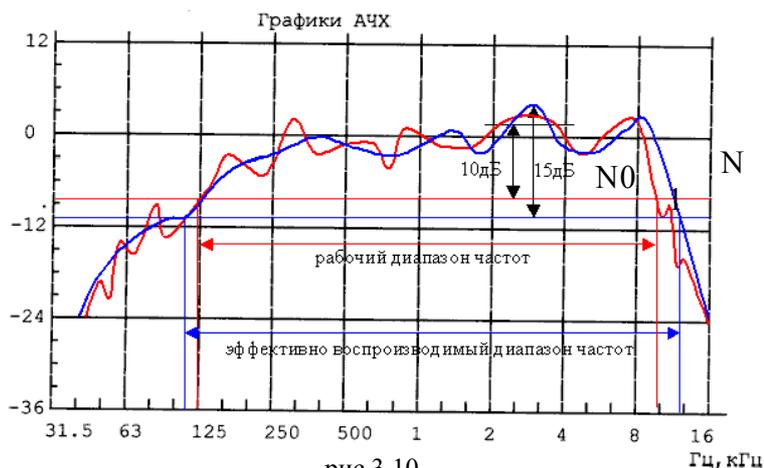


рис.3.10.

частотами через 1/3 октавы – октавное усреднение (N1). При измерении по точкам определяется **рабочий диапазон частот**, допустимая неравномерность в этом диапазоне устанавливается ТУ в пределах 10...25 дБ.

Во втором варианте сразу снимается усредненная АЧХ(N1), которая позволяет установить **эффективно воспроизводимый диапазон частот**. Этот диапазон определяется значительно сложнее. Сначала определяется область максимального

звукового давления и с помощью трех частот (через 1/3 октавы) усредняется максимальное среднее звуковое давление в пределах одной октавы и вниз откладывается допустимая величина неравномерности 10 дБ. Все это поясняется графиками на рисунке.

На практике для построения графиков АЧХ специалисты в области аудиотехники используют октавные шалы с разделением их на 1/3 или 1/6 октавы, что соответствует слуховому восприятию. Напомню, что в этом случае значения частот внутри октав получают путем умножения октавной цифры на соответствующие коэффициенты:

$$\sqrt[3]{2} = 1,26 \quad \sqrt[6]{2} = 1,12.$$

Для компьютеров это сложно, поэтому в последнее время студенты аудиотехники часто пользуются логарифмической частотной шкалой. По такой шкале трудно убрать провалы и пики шириной менее 1/8. Невозможно определить эффективно воспроизводимый диапазон частот. Одним словом делать этого не надо. Научите свой компьютер строить графики и проводить осреднение в октавной шкале.

3.9. Среднее звуковое давление

Сравнение даже однотипных громкоговорителей по АЧХ невозможно, так как звуковые давления на отдельных частотах могут отличаться достаточно сильно, а слух на это не реагирует. В качестве обязательной характеристики громкоговорителей используется понятие **среднего звукового давления** P_{cp} . При неравномерности АЧХ не более 12 дБ для определения среднего звукового давления определяются давления на всех частотах **третьоктавного ряда** P_i в любом выбранном диапазоне частот. Расчет давлений производится по формуле

$$P_i = \frac{U_i}{M \cdot K_{\mu}},$$

где U_i - напряжение на i частоте, M - чувствительность микрофона (мВ/Па), K_{μ} - коэффициент усиления микрофонного усилителя. Среднее звуковое давление рассчитывается с использованием равенства

$$P_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P_i.$$

Если неравномерность АЧХ более 12 дБ, то звуковое давление оценивается среднеквадратическим значением. Это универсальный метод, но при его использовании нужен вольтметр среднеквадратических значений

$$P_{сркв} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n P_i^2}.$$

Среднее звуковое давление измеряется на оси громкоговорителя. Расстояние от микрофона до громкоговорителя может быть произвольным и оно обозначается l , измерения могут осуществляться при любой подводимой мощности W .

Существуют четыре метода измерения среднего звукового давления:

1. Измеряется звуковое давление на каждой частоте
2. Записывается АЧХ на специальном бланке и вручную по приведенным формулам рассчитываются среднее давления.
3. На громкоговоритель подается розовый шум в выбранном диапазоне частот и измеряется среднеквадратическое значение напряжения на выходе микрофонного усилителя
4. На громкоговоритель подается сигнал дискретного спектра с частотами третьоктавного ряда в выбранном диапазоне частот и измеряется

среднеквадратическое значение напряжения на выходе микрофонного усилителя.

В лабораторной работе N 6А используется последний метод измерения среднего звукового давления. Измерения производятся в заглушенной камере в виде акустического бокса. Сопротивление головки исследуемого громкоговорителя $R_k = 4$ ома. Подводимая электрическая мощность определяется равенством

$$W = \frac{U_{вх}^2}{R_k}$$

Для сравнительной оценки громкоговорителей используется еще одно важное понятие - **среднее стандартное звуковое давление**. Стандартным называется давление, если измерения производятся при мощности $W_0=0,1$ Вт и расстоянии от микрофона до громкоговорителя $l_0 = 1$ м. Если измерения производятся при других условиях, то среднее стандартное звуковое давление рассчитывается по формуле

$$P_{срст} = P_{ср} \cdot \frac{l}{l_0} \cdot \sqrt{\frac{W_0}{W}}$$

В лабораторной работе все измерения производятся при входном напряжении $\sim 0,6$ В. Этому напряжению соответствует подводимая мощность около 0,1 Вт. Микрофон расположен в ближнем поле на расстоянии от громкоговорителя $l = 0,25$ м. Поэтому

$$P_{срст} = 0,25 \cdot P_{ср}$$

Обычно, $P_{срст} = 0,15 \dots 0,3$ Па.

3.10. Нелинейные искажения громкоговорителей

Нелинейные искажения в диффузорных громкоговорителях в основном возникают из-за нелинейности механической системы в центрирующей шайбе и подвесе диффузора, а также из-за неравномерного распределения индукции в зазоре. Первая причина обусловлена тем, что при больших амплитудах колебаний диффузора величина изгиба шайбы и подвеса диффузора нелинейно связана с силой, действующей на них. Вторая причина также проявляется при больших колебаниях диффузора, так как при этом звуковая катушка выходит за пределы равномерного магнитного поля в зазоре.

В соответствии с формулами

$$V(t) = P(t) / Z_a, \quad X_m = V_m / \omega$$

при равномерной АЧХ по звуковому давлению с понижением частоты колебательная

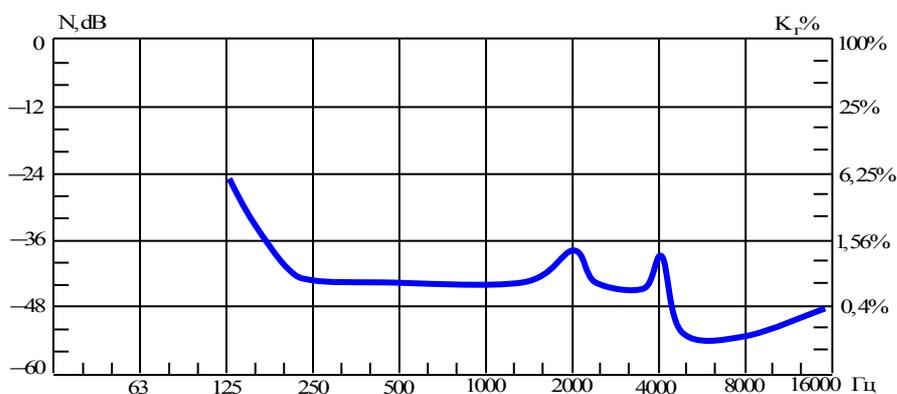


Рис.4.6. Частотная зависимость нелинейных искажений

скорость остается постоянной, а амплитуда колебаний катушки увеличивается вплоть до частоты механического резонанса. При этом увеличиваются и нелинейные искажения.

Эти искажения ниже частоты 250 Гц вообще нашими стандартами не нормируются. Естественно, нелинейные искажения очень сильно зависят от подводимой электрической мощности. Эта мощность указывается в ТУ. В лабораторной работе N 6 измерения производятся при очень малой мощности около 0,15 Вт, чтобы не создавать в лаборатории большой шум. Поэтому нелинейные искажения не большие (рис.4.6). Они максимальны на частоте близкой к механическому резонансу.

На частотах ниже резонансной мощность первой гармоники и особенно высших гармоник, излучения сильно падает – фактически излучаются только субгармонические искажения. На этом основании измерять нелинейные искажения следует только на частотах выше частоты механического резонанса в рабочей полосе частот.

В диффузорных громкоговорителях возможно появление субгармонических искажений, в результате которых создаются составляющие с частотами равными половине частоты колебаний диффузора. Для уменьшения этих искажений образующую диффузора делают криволинейной.

В соответствии с ГОСТ 16122-78 под коэффициентом гармоник громкоговорителей понимается отношение эффективного значения суммы напряжения всех **высших гармоник, субгармоник и шумов** к эффективному значению всего напряжения, включая 1 гармонику звукового сигнала.

3.11. Коррекция частотных характеристик

В лабораторной работе N5A исследуются возможности пульта звукорежиссера корректировать частотные характеристики звуковых трактов. В этом пульте последовательно включены три частотных корректора, которые самостоятельно могут включаться и выключаться. **При измерениях всегда должен быть включен только один корректор!** Не забывайте этого делать.

Первый корректор позволяет осуществлять **плавный спад частотной характеристики в области НЧ** с частотами среза 125, 80 и 63 Гц (рис.3.11). Крутизна спада составляет 12 дБ/октава. Этот корректор предназначен прежде всего для подавления

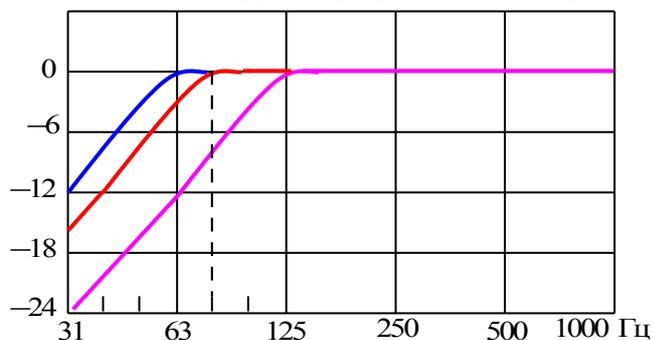


Рис.3.11. ФНЧ с частотами среза 63, 80 и 125 Гц

низкочастотных шумов и паразитных сетевых наводок с частотой 50 Гц.

Второй корректор предназначен для **регулирования тембра** звучания в области низких и высоких частот с крутизной подъема и спада частотой характеристики 6 дБ/октава (рис.3.12). На краях звукового диапазона диапазон регулирования составляет от +12 дБ до минус 20 дБ.

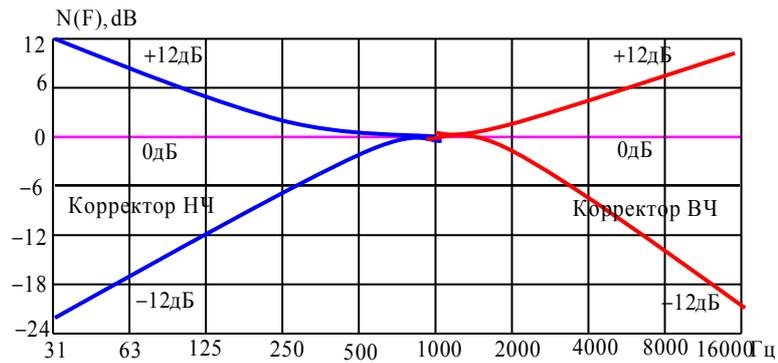


Рис.3.12. АЧХ регулятора тембра

Третий корректор создает эффект присутствия (рис.3.13). Этот эффект достигается подъемом или спадом АЧХ в узком диапазоне от 3 до 5 октав, где пороговая чувствительность слуха максимальна. Такой фильтр позволяет добиться впечатления, что звучащий инструмент (или поющий солист) находится в одной комнате со слушателем. Известно, что ощущение близости (присутствия) источника звука связано с преобладанием в спектре звукового сигнала частот от 3 до 5 кГц, соответствующих шипящим звукам (сIBILЯНТАМ). Поэтому включение «фильтра присутствия» изменяет кажущееся расстояние до источника звука. К примеру, наличие фильтра "присутствия" в канале усиления сигнала от электрогитары помогает сделать ее звучание более ярким и заметным на фоне остальных инструментов.

Эффект присутствия увеличивается при подъеме АЧХ на 5...10 дБ. Этот же эффект

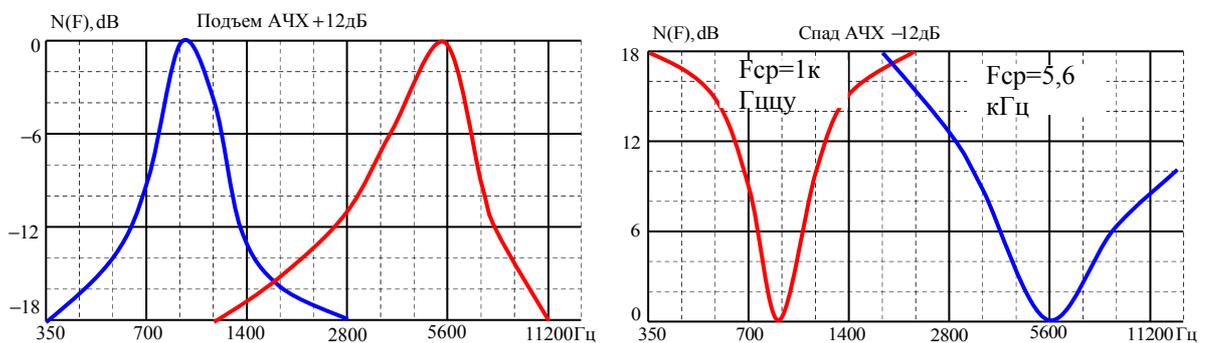


Рис. 3.13. Частотные характеристики фильтров присутствия.

уменьшается при завале АЧХ на минус 5...10 дБ. Коррекция АЧХ производится на средних частотах : 0,8; 1,4; 2,0 ; 2,8; 4,0 и 5,6 кГц с плавным спадом и подъемом и крутизной не более 10...15 дб/окт.

Глава 4. ДИНАМИЧЕСКИЕ МИКРОФОНЫ

4.1. Принцип работы

Принцип работы электродинамического микрофона основывается на законе Фарадея о поведении замкнутого электрического проводника в постоянном магнитном поле. В соответствии с этим законом при колебательное движение замкнутого проводника в виде катушки в постоянном магнитном поле приводит к возникновению переменного тока в этом проводнике. Если же проводник не замкнут, то на его зажимах возникает переменное напряжение. Если на катушке закреплена мембрана и на нее действует звуковой поток, то

это и есть динамический микрофон. В общем случае микрофон представляет собой четырехполосник с механическим входом и электрическим выходом.

Электродинамический микрофон и электродинамический громкоговоритель – это обратимые преобразователи. В первом случае под действием силы возникает ЭДС, а во втором - под действием тока возникает сила. Это значит, что громкоговоритель может работать как микрофон, а микрофон может использоваться как громкоговоритель. Отличия носят только конструктивный характер.

4.2. Конструкция

Электродинамические (динамические) микрофоны по конструкции и назначению могут существенно отличаться. В лабораторной работе исследуется катушечный электродинамический микрофон – приемник давления. Его упрощенная конструкция приведена на рис. 4.1. Магнитная система микрофона состоит из постоянного магнита цилиндрической формы 1 и магнитопровода, состоящего из нижнего круглого фланца 2, цилиндрического керна 3 и верхнего круглого фланца с центральным круглым отверстием. Между керном и верхним фланцем создается кольцеобразная магнитная щель, где магнитное поле имеет радиальное направление. Магнитная цепь изготавливается из материалов с очень высокой магнитной проницаемостью.

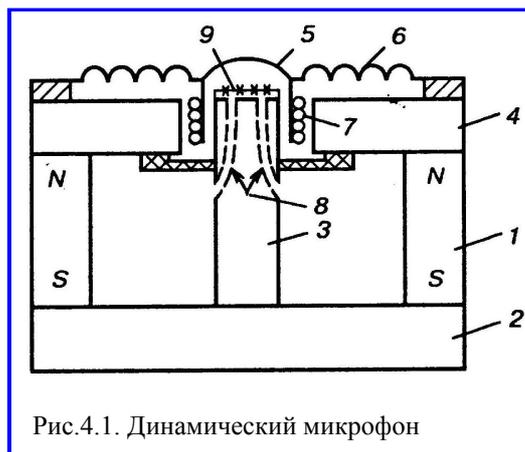


Рис.4.1. Динамический микрофон

Подвижная система включает в себя очень легкую диафрагму 5 куполообразной формы. Крепится она к фланцу при помощи гофрированного воротника 6. С диафрагмой жестко связана катушка, находящаяся в радиальном магнитном поле. При колебаниях диафрагмы под действием звукового поля витки катушки пересекают магнитное поле и на зажимах катушки возникает ЭДС. Воздушные каналы 8 в крене повышают чувствительность микрофона.

4.3. Основные характеристики микрофона

Катушечные динамические микрофоны обладают сравнительно большой неравномерностью частотной характеристики (до 15...20 дБ в рабочем диапазоне). Из-за очень малой массы подвижной системы частота механического резонанса очень высока, а нижняя граница обычно не ниже 300 Гц. Поэтому АЧХ имеет медленный подъем с низких частот до частоты резонанса. Усложнением конструкции микрофона можно расширить частотный диапазон до 50...10000 Гц.

Чувствительность микрофона тем выше, чем больше диаметр диафрагмы, больше число витков катушки и больше магнитная проницаемость магнитной системы. В то же время, чем больше диаметр диафрагмы, тем ниже верхняя граничная частота. Верхний предел определяется отношением диаметра диафрагмы к длине волны звука. Увеличение этого отношения является причиной спада АЧХ на высоких частотах. Микрофон перестает принимать звуковые колебания, когда длина волны становится равной диаметру диафрагмы. Для расширения частотного диапазона динамических микрофонов их мембрана делается как можно меньшего диаметра, при этом, естественно, существенно снижается чувствительность. Применяются эти микрофоны в основном для речи. Для записи музыкальных передач используются только широкополосные динамические микрофоны (50...15000 Гц).

4.4. Метод взаимности

Метод взаимности относится только к обратимым преобразователям, таким как генератор переменного тока или громкоговоритель. Если прикладывать силу и вращать ротор генератора, то на выходе статорной обмотке возникает ЭДС. Если к диффузору громкоговорителя приложить силу в виде звуковых колебаний, на выходе катушки также будет ЭДС.

Если статор генератора подключить к напряжению, то ротор начнет вращаться. Если на катушку громкоговорителя подать переменное напряжение, то диффузор придет в колебательное движение.

Сущность метода взаимности состоит в том, что чувствительности обратимого преобразователя связаны жесткой функциональной зависимостью. Для громкоговорителя и микрофона она имеет вид

$$E_{np} = \frac{\rho \cdot f}{2r} \cdot E_{изл}$$

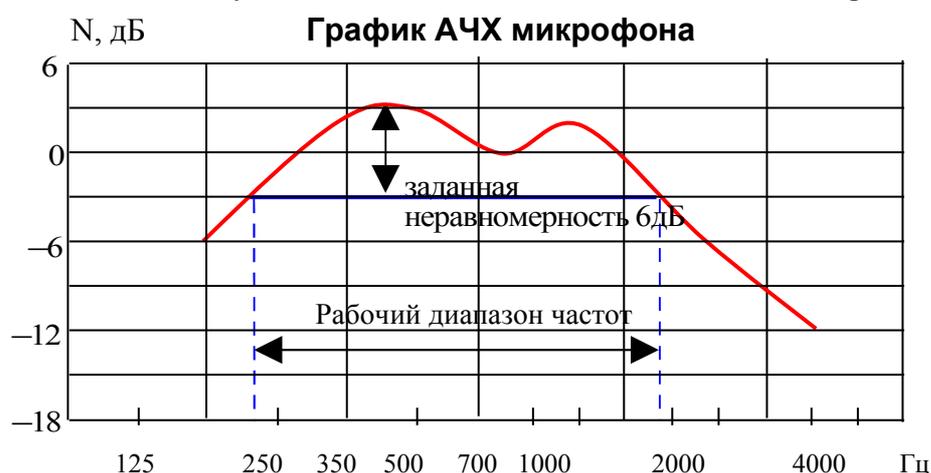
где E_{np} - чувствительность преобразователя в режиме приема звуковых колебаний, $E_{изл}$ - чувствительность преобразователя в режиме излучения звуковых колебаний, ρ - статическая плотность воздуха ($1,23 \text{ кг/м}^3$), расстояние между преобразователями, f - звуковая частота. Если известна одна чувствительность - вторая определяется однозначно.

4.5. Измерение чувствительности микрофона методом взаимности

Суть проблемы в том, что для измерения чувствительности и частотной характеристики микрофона нужно иметь идеальный громкоговоритель, который обеспечивает одно и то же звуковое давление на всех частотах. Увы, таких не бывает. Остается надеяться на метод взаимности.

Обозначим интересующую нас чувствительность микрофона на частоте f через E_x , в этой лабораторной работе он работает как приемник давления.

Для определения этой чувствительности надо использовать еще 2 громкоговорителя,



не обязательно одинаковые. Тогда можно будет составить систему из 3 уравнений, которые решить относительно E_x . Решение можно получить, составив схему из трех последовательных измерений

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &\Rightarrow M \Rightarrow U_1 \\ \Gamma_2 &\Rightarrow M \Rightarrow U_2 \\ \Gamma_2 &\Rightarrow \Gamma_1 \Rightarrow U_3 \end{aligned}$$

где Γ_1 - громкоговоритель 1, Γ_2 - громкоговоритель 2, M - микрофон. Во всех случаях в громкоговорителях входной ток один и тот же и равен i . Используя формулу для чувствительности обратимых преобразователей (громкоговорителей) из метода

взаимности, на основании трех последовательных измерений составим систему из трех уравнений. Решение этой системы определяет чувствительность микрофона на частоте F

$$E_x = \sqrt{\frac{2 \cdot r \cdot U_1 \cdot U_2}{\rho \cdot F \cdot U_3 \cdot i}} .$$