

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического приборостроения

П. Н. Петров

АКУСТИКА

ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2003

УДК 681.885(075)

ББК 32.87

ПЗ0

Петров П. Н.

ПЗ0 Акустика. Электроакустические преобразователи: Учеб. пособие/
СПбГУАП. СПб., 2003. 80 с.: ил.

Учебное пособие по разделу "Электроакустика" курса "Акустика" содержит сведения по теории электроакустических преобразователей; по основным параметрам и характеристикам громкоговорителей, акустических систем, телефонов и микрофонов.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности "Аудиовизуальная техника" дневного отделения факультета радиотехники, электроники и связи.

Рецензенты:

кафедра проектирования электронных систем Санкт-Петербургского
государственного университета телекоммуникаций им. М. А. Бонч-Бруевича;
кандидат технических наук профессор *О. С. Асратов*

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

© СПбГУАП, 2003
© П. Н. Петров, 2003

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс "Акустика" является одним из основных в блоке специальных дисциплин государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по специальности 201400 "Аудиовизуальная техника" направления "Радиотехника".

Акустика – раздел физики, изучающий особенности распространения и преобразования механических (в частности, звуковых) колебаний и волн в твердых телах, жидкостях и газах. Звучком называют механические колебания в диапазоне слышимости (16 Гц–20 кГц). Акустика подразделяется на теоретическую и техническую (прикладную).

Техническая акустика решает проблемы создания микрофонов и громкоговорителей, записи и воспроизведения звука, архитектурной акустики, шума и вибраций, подводной акустики. В курсе по данной специальности рассматривается распространение и преобразование звуковых колебаний и волн в воздухе.

Предметом технической акустики являются колебания механоакустических или более сложных механоэлектроакустических систем. Три типа систем: механические, электрические и акустические – трактуются с единых теоретических (например, радиотехнических) позиций. Такой подход называется "электроакустическим", и электроакустика является основой технической акустики.

Учебное пособие охватывает раздел "Электроакустические преобразователи" курса "Акустика". Рассматриваются вопросы электроакустики, связанные с теорией электроакустических преобразователей, классификацией, принципами построения, параметрами и характеристиками микрофонов, громкоговорителей, телефонов, акустических систем.

Учебное пособие может быть использовано студентами вузов, обучающимися по другим специальностям, входящим в направление "Телекоммуникации".

ВВЕДЕНИЕ

Область акустики, занимающаяся теорией, расчетом и конструированием устройств, преобразующих акустическую энергию в электрическую и наоборот, называется электроакустикой. Устройства, осуществляющие это преобразование, называются электроакустическими преобразователями (ЭП). По принципу действия они делятся на две большие группы.

К первой группе относятся обратимые устройства, которые в состоянии преобразовать акустическую энергию в электрическую и электрическую энергию в акустическую. Большинство преобразователей, применяемых в электроакустике, обратимы. Иногда только их и называют непосредственно преобразователями.

Ко второй группе относятся необратимые, или вентильные преобразователи. В этих устройствах одна форма энергии (например, акустическая) является управляющей, регулирующей значение другой.

В качестве примера можно привести угольный микрофон, действие которого основано на изменении сопротивления между зернами угольного порошка при изменении давления на его диафрагму. При постоянном приложенном напряжении протекающий ток меняется (модулируется) пропорционально изменению сопротивления. К вентильным преобразователям относятся ионофоны: с факельным разрядом, высокочастотным дуговым разрядом и коронным разрядом постоянного тока, — которые пока не получили широкого распространения.

При преобразовании одного вида энергии в другой могут быть использованы силы, возникающие либо в результате действия магнитного поля тока, либо при взаимодействии заряженных тел.

В случае преобразования электрической энергии в акустическую говорят о режиме излучения, а сами устройства иногда называют преобразователями-двигателями. При обратном преобразовании, т. е. режиме приема, устройства называются преобразователями-генераторами.

1. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1.1. Основные соотношения электроакустического преобразователя

Представим обратимый ЭП структурной схемой (рис. 1), на вход которого (блок 1) подводится электрическая энергия. Она частично превращается в энергию механических колебаний подвижной системы (блок 2), а затем в блоке 3 происходит частичное превращение механической энергии в энергию звукового поля. Определение последней составляет задачу расчета режима излучения преобразователя. В режиме приема происходит преобразование энергий, проходящее те же этапы в обратном направлении.

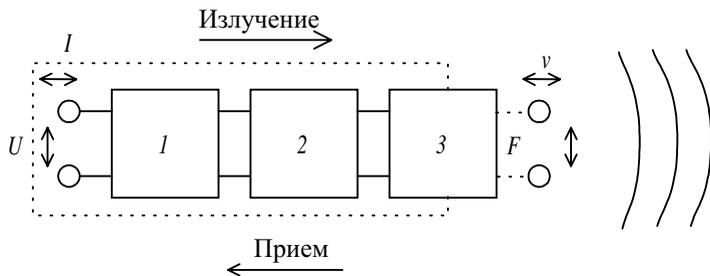


Рис. 1. Структурная схема обратимого ЭП:

1 – электрическая; 2 – механическая; 3 – акустическая части

В преобразовании энергии участвуют описывающие ее четыре параметра. Для электрического поля основными параметрами, характеризующими энергию, являются напряжение U и ток I , а для акустического – сила F и колебательная скорость v . Будем рассматривать преобразователь как своеобразный четырехполюсник с акустической и электрической сторонами (пунктир на рис. 1). Предполагается, что акустическая и электрическая энергии поступают в преобразователь, каждая со своей стороны.

Согласно общей теории обратимого линейного преобразователя, уравнения двустороннего электромеханического преобразования представляются следующими комплексными зависимостями между переменными величинами на входе и на выходе:

$$U = ZI \mp K_1 v; \quad F = z v + K_2 I. \quad (1.1)$$

Верхний знак относится к так называемым индуктивным, нижний – к емкостным преобразователям. В первых преобразователях движение вызывается электродинамическими силами взаимодействия токов и их магнитных полей, а токи создаются ЭДС, возбуждаемыми движениями магнитных полей или проводников. Во вторых преобразователях движение обусловлено электростатическими силами взаимодействия между заряженными телами, а разности потенциалов вызываются изменением относительного расположения заряженных тел.

Будем анализировать чисто периодические процессы с круговой частотой $\omega = 2\pi f$, что не ограничивает общности рассмотрения, так как все временные зависимости можно с помощью преобразования Фурье перевести в периодические процессы.

Обозначим $Z = Z_0$ в выражении (1.1) как собственное электрическое сопротивление преобразователя при полностью заторможенном акустическом блоке (мембране) ($v = 0$), т. е. в режиме короткого акустического замыкания. Величина $z = z_0$ – собственное механическое сопротивление преобразователя в отсутствии электрической нагрузки ($I = 0$), т. е. на холостом ходу. Величины $K_{1,2}$ – коэффициенты преобразования, которые и характеризуют устройство.

Для обратимого преобразователя

$$K_1 = \frac{U_0}{v}; \quad K_2 = \frac{F_0}{I}, \quad (1.2)$$

соответственно, при $I = 0$ и $v = 0$. У четырехполюсника, к которому применим принцип взаимности, коэффициенты K_1 и K_2 равны. Отсюда

$$\pm \frac{F_0}{I} = \frac{U_0}{v} = K. \quad (1.3)$$

Эта важная формула выражает теорему взаимности и описывается следующим образом. Если к электрической стороне преобразователя приложено напряжение, вызывающее на механической стороне скорость, а при действии на механическую сторону силы, вызываю-

щей на электрической стороне ток, то имеет место равенство модулей отношений напряжения к скорости и силы к току.

В общем случае рассмотрения преобразователей это не верно, равенство соблюдается только по абсолютным значениям, в связи с чем их и называют "симметрично-мощностными" четырехполосниками. Если K – величина чисто мнимая, то полностью применим принцип взаимности. Коэффициент K называют коэффициентом электромеханической связи.

Уравнения (1.1) относятся к так называемой эквивалентной схеме по напряжению, так как из нее можно определить напряжение U на клеммах четырехполосника. Преобразовав (1.1), получаем

$$I = \frac{U}{Z} \pm \frac{Kv}{Z} = UZ^{-1} \pm Nv;$$

$$F = K \frac{U}{Z} + (z \pm \frac{K^2}{Z})v = NU + (z \pm N^2Z)v, \quad (1.4)$$

где величина $N = K/Z$ называется коэффициентом электромеханической трансформации, Ас/м или Н/В, и определяется соотношением

$$N = \frac{I_0}{v} = \frac{F_0}{U} \quad (1.5)$$

при $U = 0$ и $z = 0$ соответственно. Уравнения (1.4) описывают так называемую эквивалентную схему по току. Какое из выражений, (1.1) или (1.5), целесообразней применять, зависит от конкретных обстоятельств.

1.2. Физические принципы преобразования

Рассмотрим физический смысл и принципиальное значение коэффициента электромеханической связи.

В ЭП используют два физических явления. Первое – это силовое воздействие на заряды в электрическом поле, второе – это силовое воздействие на электрический ток в магнитном поле. Отсюда возникли четыре основных направления в разработке ЭП.

Электродинамический преобразователь. Принцип действия таких преобразователей, наиболее часто встречающихся на практике, основывается на использовании закона индукции. Переменные магнитные поля индуцируют в электрических проводниках напряжение, кроме того, с магнитными полями связано возникновение электродинамических сил. На рис. 2 показана принципиальная схема электродинамического преобразователя.

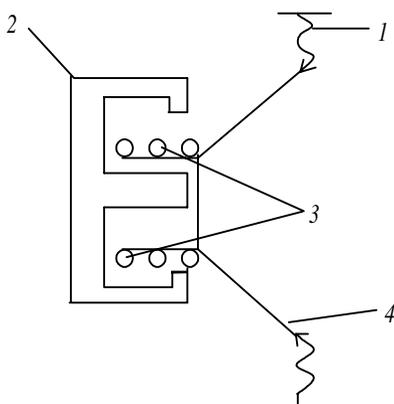


Рис. 2. Электродинамический преобразователь

Его работа заключается в следующем. Очень легкая катушка 3, через которую протекает ток, помещается в зазор между полюсами постоянного магнита 2. Одно целое с катушкой составляет жесткая мембрана 4, укрепленная на упругой подвеске 1. Магнитная индукция в зазоре постоянного магнита равна B_0 , и если через l выражается длина провода на катушке, то приложенная к катушке сила, согласно закону Био-Савара, равна

$$F_0 = B_0 I l. \quad (1.6)$$

Эта сила приводит в движение катушку и мембрану. На этом принципе основана работа электродинамического громкоговорителя (Гр).

С другой стороны, если находящийся в магнитном поле проводник будет приведен в движение со скоростью v , то в нем возникнет ЭДС

$$E_0 = B_0 l v. \quad (1.7)$$

На этом принципе основана работа электродинамического микрофона.

Из выражений (1.6) и (1.7) с учетом (1.3) можно определить коэффициент K для электродинамических преобразователей

$$K = B_0 l. \quad (1.8)$$

Электростатический преобразователь. Принцип действия электростатических преобразователей основан на использовании закона Кулона о взаимном притяжении двух зарядов.

Для конденсатора, один электрод которого выполнен в виде диафрагмы (рис. 3) и подключен к источнику постоянного напряжения U , при колебании диафрагмы с переменной скоростью v будет создаваться переменная ЭДС

$$E_0 = \frac{U_0 v}{j \omega d}, \quad (1.9)$$

где d – расстояние между обкладками конденсатора при $\omega = 0$; ω – частота колебаний. Это связано с тем, что при изменении d (за счет v) меняется емкость конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}, \quad (1.10)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная; S – площадь обкладок, а следовательно, и его заряд

$$q = CU_0, \quad (1.11)$$

что вызывает появление переменного тока. На этом принципе основано функционирование конденсаторного микрофона.

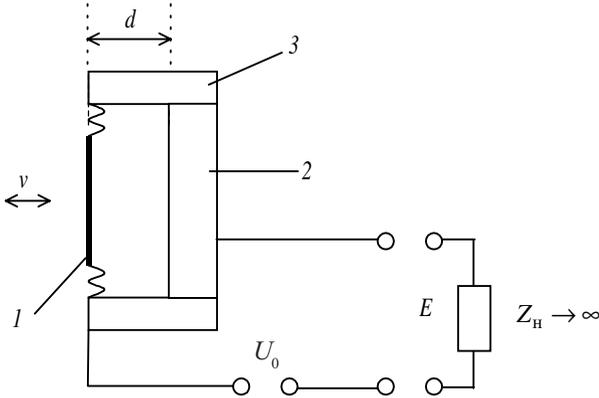


Рис. 3. Преобразователь электростатического типа:

1 – диафрагма; 2 – неподвижный электрод; 3 – изоляция

Работа конденсаторного Гр основана на том, что при протекании тока I , вызываемого приложенным к нему переменным напряжением $U \ll U_0$, действует переменная сила

$$F_0 = \frac{U_0}{j\omega d} I. \quad (1.12)$$

Учитывая выражения (1.3), (1.9) и (1.12), можно определить коэффициент электромеханической связи для электростатических преобразователей

$$K = \frac{F_0}{I} = \frac{E_0}{v} = \frac{U_0}{j\omega d}. \quad (1.13)$$

В этом случае коэффициент K зависит от частоты передаваемых колебаний, что следует учитывать при конструировании преобразователей.

Аналогичным образом функционирует электретный микрофон. Он подобен конденсаторному, но разность потенциалов на обкладках конденса-

тора обеспечивается не внешним источником, а электрическим зарядом мембраны или неподвижного электрода, материалы которых отличаются тем, что способны сохранять этот заряд длительное время.

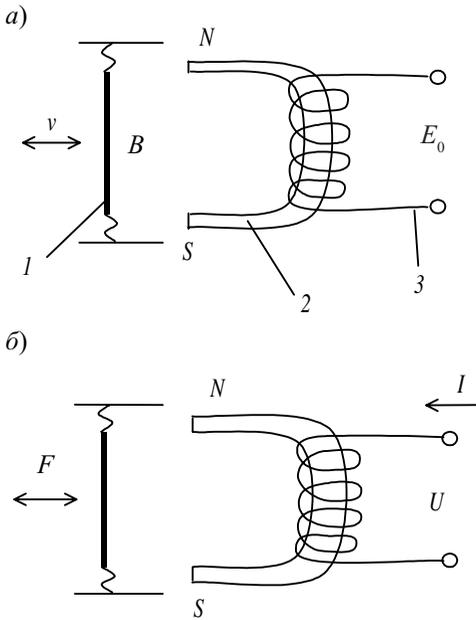


Рис. 4. Электромагнитный преобразователь при работе: *a* – на прием; *б* – на излучение

n – число витков в катушке; L_k – индуктивность катушки. Такие преобразователи применяют в наушниках телефонных аппаратов, микрофонах и звукозаписывающих системах механических систем записи звука.

С другой стороны, если к катушкам приложить переменное напряжение U , создающее в них ток I , то при условии $B < B_0$ на мембрану будет действовать переменная сила

$$F_0 = B_0 L_k I / n. \quad (1.15)$$

Ввиду двух последних выражений электромагнитный преобразователь электромагнитного типа имеет коэффициент электромагнитной связи

$$K = \frac{B_0 L_k}{n}. \quad (1.16)$$

Электромагнитный преобразователь. В преобразователе этого вида использовано изменение магнитного потока магнита при изменении магнитного сопротивления или изменение силы притяжения якоря при изменении потока. Если мембрану *1* из ферромагнитного материала приближать или удалять от постоянного магнита *2* со скоростью v (рис. 4), т. е. изменять величину магнитного потока B , протекающего через сердечники катушек *3*, то в них будет индуцироваться переменная ЭДС

$$E_0 = B_0 L_k v / n, \quad (1.14)$$

где B_0 – индукция в магнитной цепи (в отсутствие колебаний);

Пьезоэлектрический преобразователь. Преобразователи этого типа основаны на использовании пьезоэлектрического эффекта, согласно которому на поверхности кристаллов, имеющих две разновидности атомов, возникают заряды, если к ним приложить механические силы, и возникают силы при воздействии на них электрических зарядов. Такими материалами, например, являются кварц, сегнетовая соль, титанат бария. Механизм возникновения заряда на поверхности в результате деформации кристалла показан на рис. 5. При сжатии кристалла и деформации поверхности со скоростью v на ней появляется переменная ЭДС

$$E_0 = \frac{k_0 e^2 v}{j\omega h^2}, \quad (1.17)$$

где e , h – длина и толщина пластины соответственно; k_0 – коэффициент пьезоэффекта. Это прямой пьезоэффект, который используется в микрофонах.

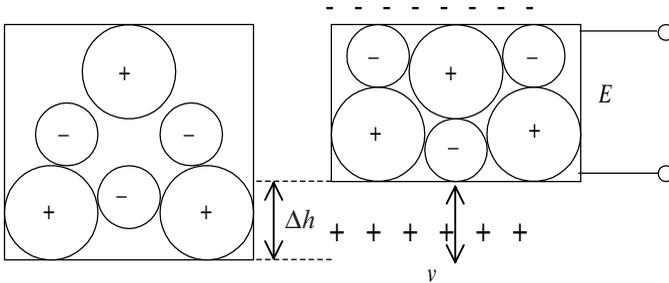


Рис. 5. Механизм возникновения заряда на поверхности пьезоэлектрика

Если этот же материал поместить в переменное электрическое поле, т. е. подключить на электроды U , вызывающее ток I , то пластины будут испытывать переменную силу

$$F_0 = \frac{k_0 e^2 I}{j\omega h^2}. \quad (1.18)$$

Этот обратный пьезоэффект используется в излучателях. Для этих преобразователей коэффициент электромеханической связи

$$K = \frac{k_0 e^2}{j\omega h^2}. \quad (1.19)$$

Мы определили физический смысл и практическое значение коэффициента электромеханической связи для всех типов преобразователей, определим теперь их другие характеристики.

1.3. Соотношение электромеханической взаимности

Уравнение (1.1) электромеханического преобразователя рассматривают как уравнение обобщенного четырехполюсника с разнородными сторонами – механической и электрической.

Не зависимо от типа преобразования и конкретного исполнения преобразователя-излучателя, если только он линейный, описывающие его входные (электрические) и выходные (механические) переменные величины связаны уравнениями

$$\begin{aligned} v &= a_{11}U + a_{12}I; \\ F &= a_{21}U + a_{22}I, \end{aligned} \tag{1.20}$$

где a_{ij} – линейные параметры четырехполюсника.

Соответствующую систему уравнений для преобразователя приемника (входная сторона – механическая) получим, решая систему (1.20) относительно U и I . С учетом известных свойств линейных параметров пассивного четырехполюсника определитель равен $a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12} = \pm 1$ (плюс относится к индуктивным, минус – к емкостным преобразователям).

Из соотношений (1.20), соблюдая правило знаков, находим

$$\begin{aligned} U &= a_{22}v + a_{12}F; \\ I &= a_{21}v + a_{11}F. \end{aligned} \tag{1.21}$$

Коэффициенты a_{ij} можно определить опытным путем при режимах короткого замыкания и холостого хода работы преобразователя излучателя и приемника. Из уравнений (1.20) и (1.21) в режиме холостого хода (т. е. $I = 0$ на входной стороне излучателя и $v = 0$ на входной стороне приемника) получаем

$$\frac{v}{U} \Big|_{I=0} = \frac{I}{F} \Big|_{v=0} = a_{11}. \tag{1.22}$$

При коротком замыкании излучателя ($U = 0$) и заторможенном входе приемника ($v = 0$) находим соотношение

$$\frac{v}{I} \Big|_{U=0} = \frac{U}{F} \Big|_{v=0} = a_{12}. \tag{1.23}$$

Когда электрическая сторона излучателя закорочена ($U = 0$), а входная сторона приемника свободна ($F = 0$), то

$$\frac{F}{I} \Big|_{U=0} = \frac{U}{v} \Big|_{F=0} = a_{22}. \quad (1.24)$$

И последнее: когда излучатель и приемник работают в режиме холостого хода ($I = 0$, $F = 0$), имеем

$$\frac{F}{U} \Big|_{I=0} = \frac{I}{v} \Big|_{F=0} = a_{21}. \quad (1.25)$$

Любое из равенств (1.22)–(1.25), а также (1.2) и (1.5) можно принять в качестве характеристики электромеханического преобразования. Эти равенства называются соотношением электромеханической взаимности. Из этих равенств вытекает, что коэффициент электромеханической взаимности можно представить как

$$K = \frac{U}{v} \Big|_{I=0} = \frac{F}{I} \Big|_{v=0} = \frac{1}{a_{11}}. \quad (1.26)$$

Уже известны Z_0 – собственное электрическое сопротивление излучателя и z_0 – собственное механическое сопротивление подвижной части преобразователя, которые можно выразить так:

$$\begin{aligned} Z_0 &= \frac{U}{I} \Big|_{v=0} = \frac{a_{12}}{a_{11}}; \\ z_0 &= \frac{F}{v} \Big|_{I=0} = \frac{a_{21}}{a_{11}}. \end{aligned} \quad (1.27)$$

Из уравнений (1.27) с учетом (1.26) можно записать

$$a_{12} = \frac{Z_0}{K}; \quad a_{21} = \frac{z_0}{K}. \quad (1.28)$$

Коэффициент a_{22} найдем из определителя пассивного четырехполюсника

$$a_{22} = \frac{(1 + a_{21}a_{12})}{a_{11}} = K \left(1 + \frac{z_0 Z_0}{K^2} \right). \quad (1.29)$$

Уравнения (1.20) и (1.21) могут быть представлены теперь в виде

$$v = K^{-1}U + Z_0 K^{-1}I; \quad (1.30)$$

$$F = z_0 K^{-1}U + (K + z_0 Z_0 K^{-1})I$$

для преобразователя приемника (генератора) и

$$\begin{aligned}
 U &= (K + z_0 Z_0 K^{-1})v + Z_0 K^{-1}F; \\
 I &= z_0 K^{-1}v + K^{-1}F.
 \end{aligned}
 \tag{1.31}$$

для преобразователя излучателя (двигателя).

1.4. Эквивалентные схемы преобразователей

Располагая уравнениями (1.30) и (1.31), можно решить любую задачу о поведении преобразователя при его работе в различных режимах. Так, для преобразователя-приемника (микрофона) входное сопротивление определяется делением уравнений (1.30) друг на друга

$$z = \frac{F}{v} = \frac{z_0 Z + K^2 + z_0 Z_0}{Z + Z_0} = z_0 + \frac{K^2}{Z + Z_0},
 \tag{1.32}$$

где $Z = \frac{U}{I}$ – полное электрическое сопротивление;

$$\frac{K^2}{Z + Z_0} = z_{\text{вн}}.
 \tag{1.33}$$

Таким образом, полное механическое сопротивление z преобразователя-приемника (генератора) в результате реакции электрической части возрастает на величину $z_{\text{вн}}$, называемую внесенным механическим сопротивлением.

Общая идеализированная эквивалентная схема этого преобразователя представлена на рис. 6, а. Часть схемы слева от K (преобразователя) изображает механическую часть схемы, справа – электрическую. На рис. 6, б изображена эквивалентная электрическая схема акустоэлектрического преобразователя.

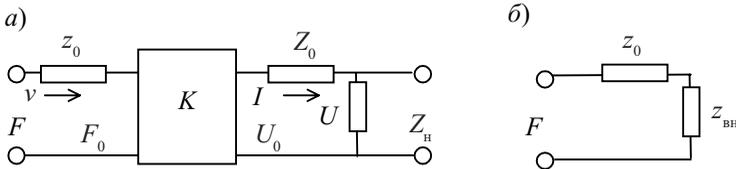


Рис. 6. Эквивалентные схемы преобразователя-генератора:
а – общая; б – электрическая

Для определения чувствительности микрофона, которая, по определению, равна

$$E = \frac{U}{p_{зв}}, \quad (1.34)$$

воспользуемся соотношением (см. рис. 6)

$$U = U_0 \frac{Z_H}{Z_0 + Z_H}. \quad (1.35)$$

Согласно (1.26), с учетом выражения (1.32)

$$U_0 = Kv = KF(z_0 + z_{вн})^{-1}. \quad (1.36)$$

Как известно, действующая на микрофон сила пропорциональна звуковому давлению в свободном звуковом поле

$$F = ap_{зв}, \quad (1.37)$$

где a – коэффициент пропорциональности, называемый акустической характеристикой. Подставляя приведенное выражение в (1.34), окончательно получаем

$$E = \frac{aK(z_0 + z_{вн})Z_H}{[z_0(z_0 + z_{вн}) + K^2](Z_0 + Z_H)}. \quad (1.38)$$

Приведенное выражение определяет чувствительность акустоэлектрического преобразователя – микрофона.

Аналогичным образом можно рассмотреть преобразователь-излучатель (Гр). Для этого случая идеализированная эквивалентная схема принимает вид, изображенный на рис. 7.

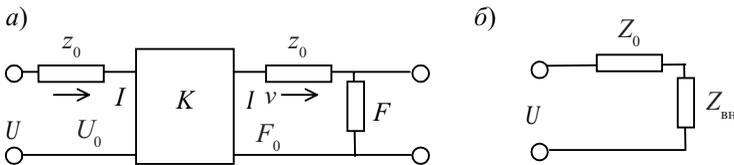


Рис. 7. Эквивалентные схемы преобразователя-двигателя:
а – общая; б – электрическая

Входное электрическое сопротивление излучателя получим, разделив друг на друга уравнения (1.31):

$$Z = \frac{U}{I} = Z_0 + \frac{K^2}{z_0 + z} = Z_0 + Z_{\text{вн}}, \quad (1.39)$$

где $Z_{\text{вн}}$ – внесенное электрическое сопротивление, являющееся результатом реакции механической части Гр. Внесение дополнительного сопротивления в электрическую цепь приводит к уменьшению напряжения и тока в электрической части преобразователя-излучателя, а следовательно, и к уменьшению мощности.

Переход от идеального преобразователя к его конкретной реализации, которой является Гр или микрофон, требует учета входящих в их состав электрических, механических и акустических элементов.

1.5. Метод электромеханических аналогий

В основе этого метода лежит сходство между уравнениями, описывающими колебательные явления разной физической природы – электрические и механические. Элементы заданной механической системы рассматриваются как аналоги элементов некоторой эквивалентной электрической схемы. Решение эквивалентной схемы производится по известным законам анализа электрических цепей. Этот метод позволяет подойти к расчету сложных электроакустических преобразователей, которыми являются громкоговорители и микрофоны, с точки зрения радиотехники.

Сравнивая дифференциальное уравнение напряжений в контуре (рис. 8, а)

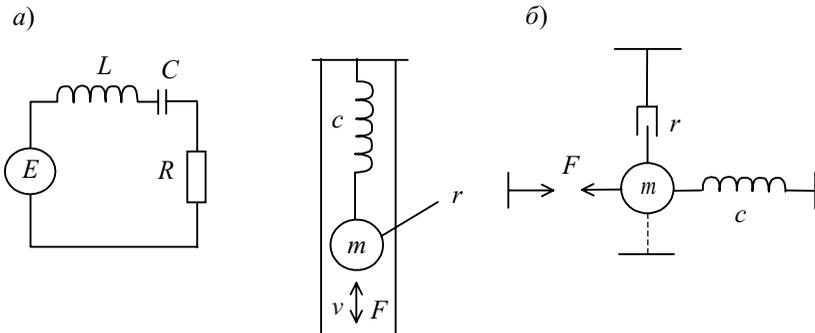


Рис. 8. Контур: а – электрический; б – механический

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{C} \int Idt = E \quad (1.40)$$

и уравнение движения простейшей механической системы: движение массы m со скоростью v , происходящей под воздействием возбуждающей силы F (рис. 8, б):

$$m \frac{dv}{dt} + rv + \frac{1}{c} \int vdt = F, \quad (1.41)$$

убеждаемся в их подобии, следовательно, в аналогичности их решений для тока и скорости.

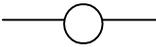
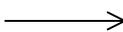
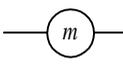
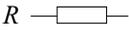
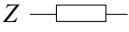
Система взаимных аналогов – механических и электрических – представлена в табл. 1. Указанные аналоги носят не только формальный характер, но и имеют физический смысл. Так, например, инерция массы препятствует мгновенному изменению скорости при изменении силы, а индуктивность препятствует мгновенному изменению тока при изменении напряжения (ЭДС).

Энергия заряженного конденсатора аналогична энергии сжатой пружины. Часть колебательной электрической энергии безвозвратно расходуется (превращается в тепловую энергию) на активном сопротивлении цепи, а в механической системе из-за трения часть механической энергии колебаний превращается в тепло.

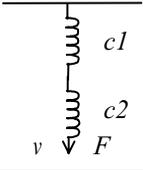
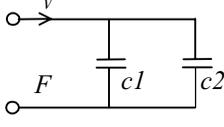
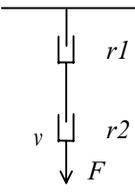
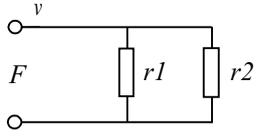
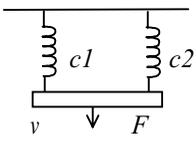
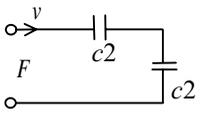
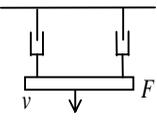
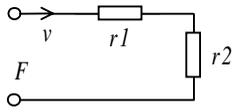
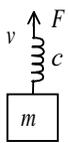
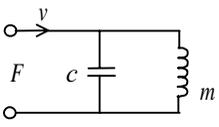
Существует определенная аналогия соединений механических и электрических элементов, приведенная в табл. 2. Аналогом последовательного соединения механических элементов, называемого цепочкой, является параллельное соединение электрических, а аналогом параллельного соединения механических элементов (узлов) является последовательное соединение электрических.

Для более сложных механических систем существуют общие правила (методики) составления эквивалентных электрических цепей, изложение которых выходит за рамки данной работы. В случаях сложных механических систем с произвольным числом степеней свободы схема аналогий имеет столько же замкнутых электрических контуров, сколько и степеней свободы; при этом элементы, содержащиеся в двух соседних замкнутых цепях, следует рассматривать как элементы связи.

Электромеханические аналоги

Величина		Обозначение величины	
электрическая	механическая	электрической	механической
Напряжение U , ЭДС E	Сила F	E, U 	F 
Ток I	Скорость v		
Заряд q	Смещение x		
Индуктивность L	Масса m	L 	
Емкость C	Гибкость c , упругость $D = \frac{1}{c}$	C 	c 
Активное сопротивление R	Трение r	R 	r 
Комплексное электрическое сопротивление $Z = \frac{U}{I}$	Комплексное механическое сопротивление $z = \frac{F}{v}$	Z 	z 
Энергия магнитного поля $W_M = L \frac{I^2}{2}$	Кинетическая энергия $T = m \frac{v^2}{2}$		
Энергия электрического поля $W_E = \frac{CU^2}{2}$	Потенциальная энергия $\Pi = \frac{cF^2}{2}$		

Электромеханические аналоги соединения элементов

Механические элементы	Электрические аналоги	Формулы
		$c = c_1 + c_2$
		$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
		$c = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2}$
		$r = r_1 + r_2$
		$z = \frac{F}{v} = \frac{m/c}{j\omega m + \frac{1}{j\omega c}}$

1.6. Электроакустические аналогии

Кроме механических колебательных систем в ЭП используются акустические колебательные системы, в которых отдельные элемен-

ты представляют собой газообразную среду определенного объема V . Они используются в виде полостей, каналов, резонаторов, которые в сочетании могут образовывать сложные устройства, по своему действию аналогичные различного рода электрическим (или механическим) системам.

Их можно рассматривать как устройства с сосредоточенными, а не распределенными параметрами, если их объемы малы по сравнению с длиной волны действующих колебаний. Следовательно, можно рассматривать эквивалентные им электрические схемы аналогично тому, как это делается в отношении механических колебательных систем.

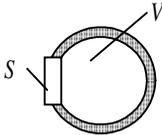
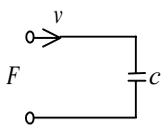
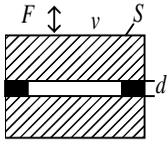
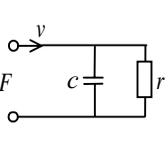
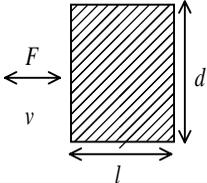
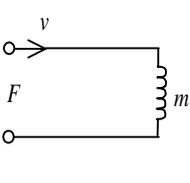
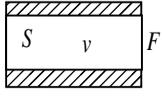
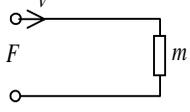
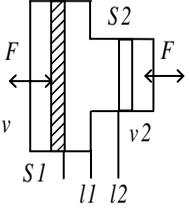
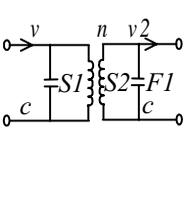
Для анализа акустических систем разработан метод электроакустических аналогий. По этому методу давление p считают аналогом напряжения, скорость колебаний v – аналогом плотности тока, а объемную скорость $v_a = vS$ (где S – поперечное сечение звукопровода) – аналогом тока.

Для трубки длиной l акустическая масса $m_a = \frac{m}{S^2} = \frac{\rho l}{S^2}$ и активное акустическое сопротивление $r_a = \frac{r}{S^2}$. Для объема V акустическая гибкость $c_a = cS^2$. Методом этих аналогий удобно пользоваться при рассмотрении устройств, состоящих только из акустических элементов. Примеры электроакустических аналогий приведены в табл. 3.

Комбинации из акустических и механических систем можно рассматривать с помощью электроакустических аналогий. При этом все механические сопротивления заменяются на соответствующие им акустические, а силы и скорости – на давление и объемные скорости по формулам $z_a = \frac{z}{S_n^2}$, $p = \frac{F}{S_n}$, $v_a = vS_n$, где S_n – площадь диафрагмы или мембраны преобразователя.

При рассмотрении этих систем можно пользоваться для каждой системы своими аналогиями, но при этом в эквивалентной схеме между механическими и акустическими частями надо включать трансформатор. Число витков его с механической стороны численно равно площади диафрагмы, а с акустической – единице. Однако для рассмотрения этих

Электроакустические аналоги

Описание	Акустический элемент	Эквивалентная схема	Входное сопротивление
Замкнутый объем V с горлом площадью $S = \pi r^2$			$z_{\text{вх}} = 1 / j\omega c$ $c = V / \rho c^2 S^2$
Слой воздуха между двумя параллельными дисками площадью S ($d \ll \lambda_{\text{мин}}$)			$z_{\text{вх}} = 1 / j\omega c + r$ $c = 5d / \rho c^2 S$ $r \rightarrow 0 - \infty$
Труба с поперечным сечением $S = \pi r^2$ и длиной l в толстой стенке шириной d ($l \ll \lambda_{\text{мин}}, d \ll \lambda_{\text{мин}}$)			$z_{\text{вх}} = j\omega m$ $m = \pi \rho r^2 l_{\text{ЭКВ}}$ $l_{\text{ЭКВ}} = l + 1,7r$
Длинная узкая трубка			$z_{\text{вх}} = z_{\text{вол}} = \rho c S$
Акустомеханический трансформатор из двух трубок при учете сжимаемости воздуха			$n = S_2 / S_1$ $c_1 = \frac{l_1}{\rho c^2 S_1}$ $c_2 = \frac{l_2}{\rho c^2 S_2}$

систем удобнее пользоваться единой системой электромеханических аналогий.

Более подробно эти вопросы освещены в литературе [1–6].

2. ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ, АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕЛЕФОНЫ

2.1. Основные определения, классификация, область применения

Громкоговоритель (телефон) – ЭП (преобразователь-двигатель), превращающий электрические колебания в механические, которые передаются в окружающую среду в виде акустических волн. Часто термином "громкоговоритель" обозначают не только сам преобразователь (который называют головкой Гр), но и всю акустическую систему (АС). В акустическую систему могут входить несколько головок Гр, согласующие трансформаторы, разделительные фильтры, регуляторы громкости и тембра, другие электрические и акустические элементы, совместно оформленные тем или иным образом (см. подразд. 2.9).

Существующие в настоящее время виды и типы Гр подразделяются на профессиональные и бытовые (любительские). Первые используются для озвучения, звукоусиления и связи, вторые входят в состав многочисленных видов бытовой аппаратуры – радиоприемников, телевизоров, магнитофонов, проигрывателей.

Профессиональные Гр делятся на следующие группы: сценические, студийные, эстрадные, громкоговорители для устройств звукоусиления и звукофикации.

Любительские Гр делятся на классы: популярные, Hi-Fi, Hi-End. К первому классу относятся массовые Гр для магнитофонов, телевизоров, радиол. К классу Hi-Fi (High-Fidelity – высокоточные) относятся устройства высокого качества и потребительских свойств, отвечающие техническим параметрам, определяемым нормами МЭК 581-7 (стандарты Международного электротехнического комитета). Класс Hi-End (High-End) включает самые дорогие устройства, при изготовлении которых используются наиболее передо-

вые идеи, материалы, конструкции и технологии. Эти громкоговорители обладают наиболее высокими техническими параметрами, наилучшим дизайном и другими потребительскими свойствами.

Следует отметить, что Гр является последним и наиболее важным звеном любого электроакустического тракта, так как его свойства часто определяют качество работы тракта в целом.

В приведенную классификацию не вошли специализированные Гр, например рупорные, градиентные, автомобильные, составляющие отдельную группу.

Кроме области применения АС и Гр можно классифицировать по виду преобразования энергии, способу излучения, широкополосности, типу акустического оформления.

По виду преобразования энергии Гр и телефоны делятся в порядке убывания популярности) на электродинамические (более 90 % всех изделий), пьезоэлектрические, электростатические преобразователи. Редко используют ионные, магнестрикционные и электретные, почти исчезли из употребления электромагнитные Гр. Зато подавляющее число типов телефонов использует электромагнитные преобразователи энергии.

По способу излучения Гр классифицируются как диффузорные (непосредственного излучения) и рупорные. В последних головка Гр излучает звук в предрупорную камеру, находящуюся непосредственно перед рупором, который, по сути, является акустическим волноводом переменного сечения.

По полосе частот – широкополосные (как правило, низкого качества), низкочастотные от 20–50 до 600–1000 Гц (иногда их называют "вуферы", woofer), среднечастотные с полосой частот от 300 Гц до 5–8 кГц, высокочастотные от 1–5 до 16–30 кГц (твитер, tweeter). Отдельную группу Гр составляют сверхнизкочастотные (сабвуфер) и ультравысокочастотные.

По акустическому оформлению различают плоский экран, закрытый корпус, открытый корпус, корпус с фазоинвертором, корпус с пассивным диффузором, корпус с акустическим фильтром низких частот, корпус с акустическим лабиринтом.

Используют и другие классификации Гр, например по потребляемой электрической мощности (мощные, маломощные), по чувствительности и т. д.

2.2. Важнейшие параметры громкоговорителей и телефонов

Стандартом ГОСТ 16122-87 "Громкоговорители. Методы измерений электроакустических параметров", а также в рекомендациях МЭК 268-5 и 581-7 установлены определения характеристик Гр и терминов, к ним относящихся, наиболее важные из которых приведены ниже.

Электрические (входные) характеристики громкоговорителя

Номинальное электрическое сопротивление R_n – активное сопротивление, которым замещают Гр при измерении электрической мощности, потребляемой от источника (оговаривается в технической документации). Оно определяется минимальным модулем полного электрического сопротивления Гр в диапазоне частот выше частоты основного резонанса. Измеренное минимальное значение модуля полного электрического сопротивления $|Z|$ не должно быть меньше номинального более чем на 20 %. Обычно оно составляет 4 или 8 Ом.

Электрическая мощность – мощность, рассеиваемая на сопротивлении R_n при напряжении, равном напряжению на зажимах Гр:

$$P = \frac{U^2}{R_n}. \quad (2.1)$$

Номинальная мощность – заданная электрическая мощность, при которой нелинейные искажения звукового давления Гр не превышают требуемого значения. Обычно ее величину указывают в наименовании Гр, например, 0,5ГД-30 – номинальная мощность 0,5 Вт.

Паспортная электрическая мощность определяется тепловой и механической прочностью Гр и проверяется при подведении к нему в течение 100 часов специального сигнала (типа розового шума с пик-фактором, равным двум). Паспортная мощность указывается в паспорте на Гр и всегда больше номинальной. Для преобразователя 0,5ГД-30 паспортная мощность равна 1 Вт.

Частота основного резонанса – частота, при которой модуль полного электрического сопротивления $|Z|$ Гр имеет первый основной максимум (механический резонанс).

Добротность головки громкоговорителя – мера затухания свободных колебаний подвижной системы головки Гр, определяемая отношением реактивной составляющей механического сопротивления под-

вижной системы головки Гр на частоте основного резонанса к активной составляющей.

Электроакустические характеристики громкоговорителя

Номинальный диапазон частот – диапазон частот (оговаривается в технической документации на Гр), в котором заданы его электрические и электроакустические характеристики.

Эффективно-воспроизводимый диапазон частот – диапазон частот, в пределах которого уровень звукового давления, создаваемого Гр на рабочей оси, понижается на 10 дБ по отношению к уровню, усредненному в октавной полосе частот в области максимальной чувствительности. Пики и провалы частотной характеристики уже 1/8 октавы не учитываются.

Частотная характеристика звукового давления – зависимость звукового давления, развиваемого Гр в точке свободного поля, находящейся на определенном расстоянии от него, от частоты при постоянном напряжении на зажимах Гр.

Неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) звукового давления – отношение максимального звукового давления к минимальному в номинальном диапазоне частот, выраженное в децибелах. В рекомендациях МЭК 581-7, определяющих минимальные требования к аппаратуре Hi-Fi, указано, что неравномерность АЧХ звукового давления не должна превышать ± 4 дБ в полосе частот 100–8000 Гц.

Среднее звуковое давление – среднеквадратичное значение звукового давления, вычисленное по частотной характеристике в заданном диапазоне частот. Усреднение производится по значениям звукового давления на частотах $p_{звi}$, распределенных равномерно в логарифмическом масштабе с интервалом не более трети октавы:

$$p_{зв.ср} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{звi}^2}, \quad (2.2)$$

где n – число частот, входящих в заданный диапазон.

Среднее стандартное звуковое давление – среднее звуковое давление, развиваемое Гр в номинальном диапазоне частот на рабочей оси на расстоянии 1 м при подведении к нему напряжения, соответствующего электрической мощности, равной 0,1 Вт. Эта характеристика чис-

ленно равна характеристической чувствительности, умноженной на корень квадратный из 0,1 Вт.

Характеристическая чувствительность – среднее звуковое давление, развиваемое Гр в заданном диапазоне частот на рабочей оси, приведенное к расстоянию 1 м от рабочего центра и подводимой электрической мощности 1 Вт. Часто выражают в децибелах по отношению к стандартному порогу слышимости, равному $2 \cdot 10^{-5}$ Па. В большинстве моделей акустических систем эта характеристика составляет 86–90 дБ.

Характеристика (диаграмма) направленности – зависимость звукового давления от направления излучения звука на заданной частоте (или заданной полосе частот).

Коэффициент направленности $R(Q)$ – отношение звуковых давлений, измеренных под углом Q к рабочей оси и на рабочей оси при $Q = 0$:

$$R(Q) = \frac{p_{зв}(Q)}{p_{зв}(0)}. \quad (2.3)$$

Коэффициент осевой концентрации

$$\Omega = \frac{2}{\int_0^\pi R^2(Q) \sin Q dQ}. \quad (2.4)$$

Индекс осевой концентрации – десятикратный десятичный логарифм коэффициента осевой концентрации

$$\xi = 10 \lg \Omega. \quad (2.5)$$

Акустическая мощность рассчитывается по измеренному звуковому давлению

$$P_a(f) = \frac{4\pi r^2}{\rho c_{зв}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{зв_i}^2(f), \quad (2.6)$$

где $p_{зв_i}(f)$ – звуковое давление на частоте f , развиваемое Гр в i -й точке; n – число точек (микрофонов) регистрации звукового давления (распределяются равномерно по сфере симметрично относительно Гр); ρ – плотность воздуха; $c_{зв}$ – скорость звука; r – расстояние от Гр до микрофона.

Коэффициент полезного действия (КПД) – это отношение излучаемой акустической мощности к подводимой электрической при измерении на заданной частоте или в полосе частот.

Суммарный коэффициент гармоник характеризует нелинейные искажения:

$$K_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n p_{зВи}^2}{\sum_{i=1}^n p_{зВи}^2}} 100 \%, \quad (2.7)$$

где i – номер гармоники; n – число гармоник в заданном диапазоне частот.

Дребезг – спектральные компоненты излучаемого Гр сигнала, вызываемые его механическими дефектами и слышимые как помеха при его работе в номинальном диапазоне частот.

Призвук – спектральные компоненты излучаемого Гр сигнала, слышимые как помеха при подведении к нему гармонического сигнала.

Кроме вышперечисленных стандартизованных характеристик Гр существует еще множество дополнительных характеристик, определение которых можно найти в литературе [1, 6, 9, 10].

2.3. Основные соотношения при анализе работы преобразователя-излучателя

Как известно, любую механическую колебательную систему, в том числе Гр, можно свести к эквивалентной электрической схеме, в частном случае к электрическому колебательному контуру. На рис. 9 показан электрический аналог механической колебательной системы, изображенной на рис. 8, б.

На основании такой аналогии можно записать уравнение полного механического сопротивления (1.32) так:

$$z = \frac{F}{v} = r + j \left(m\omega - \frac{1}{\omega c} \right). \quad (2.8)$$

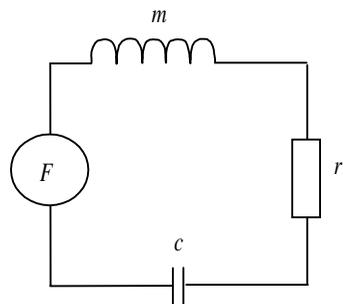


Рис. 9. Электрический аналог механической системы

Мнимая величина в выражении (2.8) характеризует наличие сдвига фаз между возбуждающей силой F и колебательной скоростью v .

Модуль полного механического сопротивления

$$|z| = \sqrt{r^2 + (\omega m - \frac{1}{\omega c})^2}. \quad (2.9)$$

По аналогии с электрическим колебательным контуром, на частотах ниже частоты резонанса, равной

$$f_M = \frac{1}{2\pi\sqrt{mc}}, \quad (2.10)$$

модуль z описывается выражением

$$|z| \approx \frac{1}{\omega c}, \quad (2.11)$$

на частоте в области резонанса

$$|z| \approx r, \quad (2.12)$$

а выше ее

$$|z| \approx \omega m. \quad (2.13)$$

По аналогии с электрическим колебательным контуром, для которого мощность, выделяемая на активном сопротивлении R , равна

$$P = \frac{1}{2} I^2 R, \quad (2.14)$$

в механической колебательной системе акустическая мощность, излучаемая преобразователем, определяется как

$$P_a = \frac{1}{2} v^2 r_s, \quad (2.15)$$

где r_s – активная составляющая сопротивления излучения.

Как известно [8, 9], активная составляющая сопротивления излучения r_s определяется волновым сопротивлением среды $\rho c_{зв}$, площадью излучающей поверхности $S_n = \pi r_d^2$ (диафрагмой), волновыми размерами источника, т. е.

$$r_s = \rho c_{зв} S_n \frac{k^2 r_d^2}{1 + k^2 r_d^2}, \quad (2.16)$$

где $k = 2\pi/\lambda$; r_d – радиус диафрагмы; $\rho = 1,29$ кг/м³ – плотность воздуха.

В области низких частот ($r_d \ll \lambda$) активная составляющая сопротивления излучения мала, происходит энергообмен между источником и полем в ближней зоне излучателя, при этом

$$r_s \approx \rho c_{зв} S_n (kr_d)^2 = \frac{\pi \rho S_n^2}{c_{зв}} f^2 = \frac{\rho S_n^2}{4\pi c_{зв}} \omega^2. \quad (2.17)$$

Область низких частот можно определить из выражения (2.16) как

$$f < f_{кр} = \frac{c_{зв}}{2\pi r_d}, \quad (2.18)$$

где критическая частота $f_{кр}$ получается при выполнении условия

$$kr_d = 1. \quad (2.19)$$

На высоких частотах ($r_d \gg \lambda$)

$$r_s \approx c_{зв} \rho S_n, \quad (2.20)$$

что соответствует локально плоской волне на поверхности источника, т. е. излучение звуковой энергии максимально. На этих частотах наблюдается заметная направленность излучения звуковой энергии, характеризующая коэффициентом направленности $R(Q)$.

Выражением

$$R_Q = \left(\frac{f}{f_{кр}} \right)^{\frac{5}{3}} \quad (2.21)$$

можно приближенно аппроксимировать зависимость коэффициента направленности от отношения частот $f/f_{кр}$ в практически используемом диапазоне частот.

2.4. Описание работы электродинамического громкоговорителя

Анализ работы проведем на наиболее распространенном типе – электродинамическом Гр. В практических конструкциях преобразователей электродинамической системы (рис. 10) проводник наматывается на круглый цилиндрический каркас, образуя звуковую катушку 1 , которая располагается в кольцевом зазоре магнитной системы. Магнитная система состоит из постоянного магнита 3 (кольцевого) и магнитопровода: нижний фланец 4 , верхний фланец 2 , полюсный наконечник 5 – и создает в воздушном кольцевом зазоре постоянный магнитный поток. Ток,

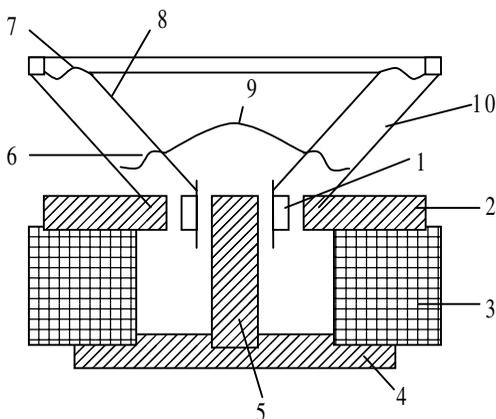


Рис. 10. Конструкция электродинамического преобразователя:

1 – звуковая катушка; 2 – верхний фланец; 3 – магнит; 4 – нижний фланец; 5 – полюсный наконечник; 6 – центрирующая шайба; 7 – воротник; 8 – диффузор; 9 – колпачок; 10 – корпус

элементы конструкции монтируются в корпусе 10. Такая конструкция называется головкой Гр.

Протекание переменного тока через обмотку катушки вызывает появление силы, которая приводит в движение подвижную систему Гр. Колебания диффузора передаются в окружающую среду, вызывая возмущение, которое распространяется от Гр в виде звуковой волны. Электрическая мощность, подводимая к Гр, в значительной степени теряется в обмотке звуковой катушки. Часть ее расходуется на преодоление силы трения в подвижной системе, лишь небольшая часть (~ 5 %) излучается в воздух в виде акустической мощности [см. формулу (2.15)]. Так как механическое сопротивление $z = F/v$, то с учетом выражения (2.15) можно записать

$$P_a = 0,5 \frac{F^2}{|z|^2} r_s. \quad (2.22)$$

Диапазон воспроизводимых частот данных Гр в значительной степени зависит от частоты механического резонанса подвижной системы. Резонансные частоты современных головок низкочастотных электродинамических Гр находятся в диапазоне 25–50 Гц.

Величина тока, потребляемого электродинамическим преобразователем:

$$I = \frac{U}{|Z|}, \quad (2.23)$$

где $|Z|$ – модуль полного электрического сопротивления преобразователя.

Учитывая это, силу, действующую на звуковую катушку, определяемую выражением (1.6), можно представить как

$$F_0 = \frac{B_0 l U}{|Z|}. \quad (2.24)$$

Акустическая мощность, излучаемая электродинамическим Гр, получается подстановкой выражения (2.24) в (2.22):

$$P_a = 0,5 \left(\frac{B_0 l U}{|Z| |z|} \right)^2 r_s. \quad (2.25)$$

Полное электрическое сопротивление электродинамических преобразователей зависит от индуктивности звуковой катушки L , активного сопротивления R и внесенного электрического сопротивления (1.39), которое в свою очередь определяется длиной провода катушки и индукцией в магнитной цепи [см. формулу (1.8)]. Таким образом, можно записать

$$Z = R + j2\pi f L + \frac{(B_0 l)^2}{z}. \quad (2.26)$$

Для области низких частот, лежащих ниже частоты механического резонанса f_m , с учетом (2.11), (2.17) и модуля

$$|Z| \approx R + \frac{(B_0 l)^2}{|z|}, \quad (2.27)$$

акустическая мощность (2.25) может быть определена как

$$P_a \approx C_1 f^4, \quad (2.28)$$

где C_1 – величина, не зависящая от частоты. Таким образом, излучаемая акустическая мощность в диапазоне от низших частот до f_m растет примерно пропорционально четвертой степени частоты или 12 дБ на октаву (рис. 11, уч. $a-b$).

На участках в области резонанса излучаемая мощность максимальна (рис. 11, уч. б–в).

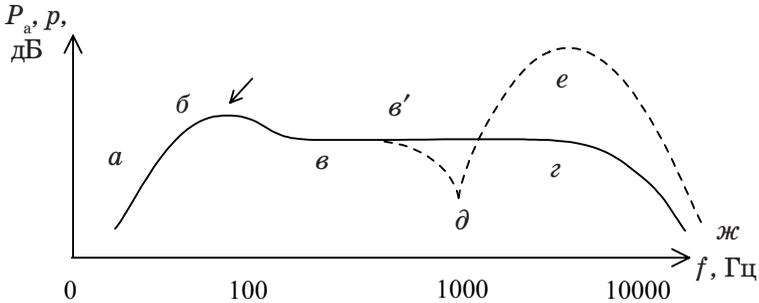


Рис. 11. Частотная характеристика излучения электродинамического преобразователя:
 — акустическая мощность P_a ; — — звуковое давление p

На средних частотах модуль $|z|$ определяется выражением (2.13), сопротивление излучения – выражением (2.17), а $|Z| \approx R$ и имеет минимальную величину. Подставив эти выражения в формулу (2.25) для акустической мощности излучения, получим

$$P_a \approx C_2, \quad (2.29)$$

где C_2 – величина, не зависящая от частоты. Теоретически в этой области частотная характеристика излучаемой мощности горизонтальна (рис. 11, уч. в–г).

На высоких частотах возрастает влияние индуктивной составляющей электрического сопротивления звуковой катушки в соответствии с выражением (2.26), активная составляющая сопротивления излучения постоянна [см. (2.20)], а $|z|$ определяется формулой (2.13). При этом акустическая мощность излучения

$$P_a \approx \frac{C_3}{f^2}, \quad (2.30)$$

где C_3 – величина, не зависящая от частоты, что равносильно снижению мощности излучения 6 дБ на октаву (рис. 11, уч. г–ж).

Рассматриваемая характеристика $P_a(f)$ не учитывает влияния интерференционных явлений и направленности излучения Гр. Более показательной является частотная характеристика звукового давления p , так как она определяет субъективное восприятие громкости звучания на различных частотах звукового диапазона.

В области низких частот характеристика направленности мало отличается от сферы, т. е. $R_Q \approx 1$ [см. формулу (2.27)], и зависимость звукового давления от частоты $p(f)$ примерно совпадает с зависимостью излучаемой акустической мощности от частоты $P_a(f)$ (рис. 11, уч. $a-e'$).

В области критической частоты (2.18) и выше диффузор теряет жесткость, и отдельные его части могут колебаться в противофазе. Это приводит к появлению резких пиков и провалов в $p(f)$, особенно когда в противофазе колеблются диффузор и его гибкий подвес, так как их площади соизмеримы (рис. 11, уч. $e'-d$).

На высоких частотах (выше критической частоты) диффузор уже нельзя рассматривать как идеальный поршневой излучатель, и теоретическое описание механизма излучения сильно усложняется. В первом приближении можно считать, что с ростом частоты действуют несколько факторов, способствующих и препятствующих излучению:

- 1) увеличение направленности излучения (2.21);
- 2) уменьшение активной массы диффузора и соколеблющегося воздуха, повышающее излучение;
- 3) увеличение $|Z|$ (2.26), понижающее излучение;
- 4) увеличение $|z|$ (2.13), понижающее излучение;
- 5) увеличение потерь на вихревые токи в магнитной системе Гр, понижающее излучение.

Вначале преобладают первые два фактора, повышающие излучение (рис. 11, уч. $d-e$ – пунктирная кривая), а затем три последующих, понижающие излучение (уч. $e-ж$), что приводит к резкому спаду частотной характеристики $p(f)$.

На рис. 11 показаны идеализированные частотные характеристики, так как реальные изобилуют множеством мелких пиков и провалов, обусловленных интерференционными явлениями, вызванными сложным характером колебаний диффузора.

Диапазон воспроизводимых частот у электродинамических преобразователей достаточно широкий и достигает 7–8 октав при неравномерности характеристики $p(f)$ 8–14 дБ.

2.5. Модуль полного входного электрического сопротивления электродинамического громкоговорителя

Характерной и имеющей важное значение для электродинамических Гр и телефонов является частотная зависимость их электрического сопротивления (2.26)

$$Z = Z_k + Z_{\text{вн}} = Z_k + \frac{B_0^2 l^2}{z}, \quad (2.31)$$

где $Z_k = R + j\omega L$ – собственное сопротивление звуковой катушки Гр, а $Z_{\text{вн}}$ – внесенное электрическое сопротивление. В общем случае $Z_{\text{вн}}$ является величиной комплексной и зависит как от длины провода катушки и индукции в магнитной цепи, так и от полной механической проводимости, учитывающей влияние активных и реактивных проводимостей механической части Гр и акустической среды. Можно записать, что в общем виде

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{R'} + j\omega C' + \frac{1}{j\omega L'}. \quad (2.32)$$

Здесь:

$R' = \frac{r_m + r_s}{(Bl)^2}$ – внесенное активное сопротивление, где r_m – активное механическое сопротивление Гр; r_s – активное акустическое сопротивление Гр [сопротивление излучения (2.16)];

$C' = m_m + m_s / (Bl)^2$ – внесенная емкость, где m_m – механическая масса подвижной части Гр; m_s – присоединенная (соколеблющаяся с диафрагмой) масса воздуха;

$L' = (Bl)^2 c_m$ – внесенная индуктивность, где c_m – механическая гибкость подвесов диафрагмы.

В этих выражениях учитывается тот факт, что акустической нагрузкой Гр является полное акустическое сопротивление излучения

$$z_a = r_s + j\omega x_s, \quad (2.33)$$

где r_s – активное сопротивление излучения, определяемое выражением (2.16); x_s – реактивное сопротивление, равное для односторонне излучающего поршня (модели, наиболее близкой излучающей поверхности Гр в бесконечном экране [9])

$$\omega x_s = \rho c_{\text{зв}} S_n \frac{kr_d}{1 + (kr_d)^2} = \omega m_s. \quad (2.34)$$

Реактивное сопротивление излучения представляют как инерционное сопротивление некоторой массы воздуха, так как множитель $\rho S_n r_d / ((1 + (kr_d)^2))$ имеет размерность массы и определяет величину так

называемой присоединенной массы m_s воздуха, частицы которого колеблются синфазно с диафрагмой Гр.

Таким образом, полное акустическое сопротивление излучения зависит от акустического сопротивления среды, а также от вида акустического оформления Гр.

Для анализа работы Гр, в частности, для исследования частотной зависимости электрических сопротивлений, необходимо учитывать входящие в их состав элементы: электрические, механические, акустические.

Эквивалентная схема Гр в бесконечном акустическом экране представлена на рис. 12, где показаны все основные элементы. Эту схему можно преобразовать в однородную схему, состоящую только из электрических, или механических, или акустических элементов. На практике часто используются эквивалентные электрические схемы Гр.

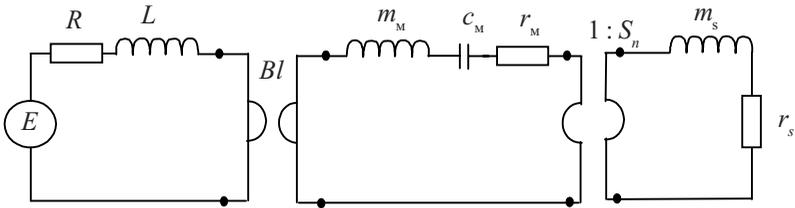


Рис. 12. Эквивалентная схема Гр в бесконечном акустическом экране

На упрощенной электрической схеме (рис. 13) элементы одинакового характера объединены в общие результирующие элементы, согласно выражениям (2.32)–(2.34). Из анализа этой схемы можно найти зависимость $|Z|$ от частоты.

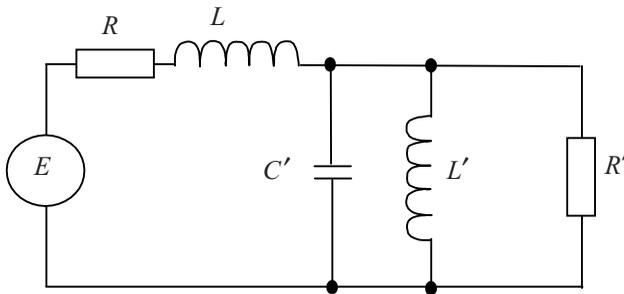


Рис. 13. Упрощенная эквивалентная схема Гр в бесконечном акустическом экране

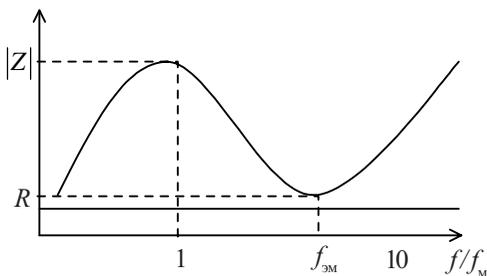


Рис. 14. Зависимость модуля полного электрического сопротивления Гр от частоты

Типичное изменение модуля полного входного электрического сопротивления Гр представлено на рис. 14. Здесь по оси ординат отложены модуль полного электрического сопротивления $|Z|$; R – сопротивление постоянному току; $R + R'$ – сопротивление на частоте механического резонанса f_M ; по оси абсцисс отношение f/f_M ; $f_{ЭМ}$ – частота электромеханического резонанса. При $\omega = 0$, т. е. при постоянном токе, $|Z|$ минимально и равно активному сопротивлению катушки. С возрастанием частоты растет и $|Z|$, достигая максимума на частоте механического резонанса f_M контура $L' C'$. Оно возрастает ввиду увеличения $Z_{вн} = (Bl)^2/z$ (механическое сопротивление сильно уменьшается). Этот максимум соответствует частоте основного резонанса подвижной системы Гр. Физически этот максимум объясняется тем, что на частоте резонанса подвижная система колеблется с максимальной амплитудой скорости и противоэлектродвижущая сила, индуцируемая при движении катушки в магнитном поле, достигает максимума [1].

При переходе через резонансную частоту f_M с ростом f/f_M реактивная компонента Z меняет характер с индуктивного на емкостное сопротивление. При этом $|Z|$ падает из-за того, что наступает электромеханический резонанс в последовательном контуре, состоящем из индуктивного сопротивления катушки L и емкостного сопротивления вносимого сопротивления C' . Минимальное значение $|Z|$ достигается на частоте $f_{ЭМ}$ – электромеханического резонанса. Далее к высоким частотам доминирующим становится индуктивное сопротивление катушки L Гр.

Номинальным сопротивлением Гр является сопротивление, отклонение от которого не превышает $+15, -20\%$. Измерения проводят в области частот, где $|Z|$ имеет минимальное значение, т. е. в области электромеханического резонанса.

Предусмотрен ряд допустимых номинальных сопротивлений: 2, 4, 8, 15, 25, 50, 100, 400, 800 Ом, – которые входят в перечень обязательных требований, предъявляемых к Гр и телефонам.

2.6. Не электродинамические громкоговорители

Объем выпуска не электродинамических Гр достигает примерно 10–15 % общего выпуска. В основном эти излучатели применяются в качестве высокочастотного звена в АС.

Различают нединамические типы (электростатические, электретенные, пьезопленочные, пьезокерамические, плазменные и др.) и динамические (магнепланарные, изодинамические, ленточные, излучатели Хейла) Гр [1–9].

Электростатический громкоговоритель является наиболее распространенным типом среди нединамических излучателей. Принцип действия его изложен в подразд. 1.2 и показан на рис. 15.

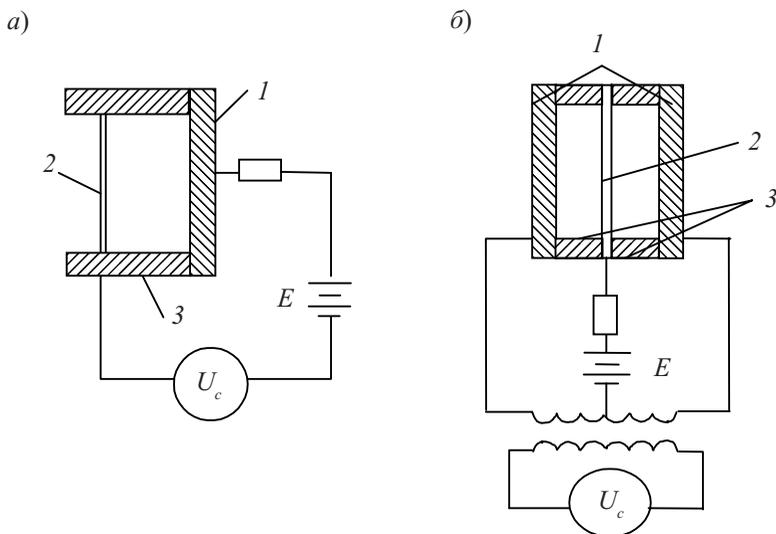


Рис. 15. Электростатический Гр: а – одноконтный; б – двухконтный (уравновешенный, пушпульный – push-pull): 1 – неподвижные электроды; 2 – излучающая мембрана; 3 – диэлектрик

Излучающим элементом является тонкая металлизированная пленка, как правило из лавсана толщиной 8–10 мкм, помещенная на небольшом расстоянии (0,3–0,5 мкм) от неподвижного электрода, выполненного в виде перфорированного электрода из металлизированного диэлектрика. Между мембраной и электродами приложено постоянное поляризующее напряжение (достигающее нескольких тысяч вольт), которое значительно выше максимального напряжения сигнала, что уменьшает

нелинейные искажения (менее 5 %). Переменное звуковое напряжение подается через обмотку повышающего трансформатора к неподвижным электродам.

Однотактный Гр выполняют как высокочастотный, так как незначительны отклонения подвижного электрода. При этом механический резонанс Гр весьма высок и располагается на частоте около 10 кГц. Эти Гр пригодны для высокочастотного звукового диапазона и для излучения ультразвука. Пушпульный вариант конструкции громкоговорителя допускает большие отклонения подвижного электрода, и его применяют в средне- и низкочастотных преобразователях. Для воспроизведения низких частот (100 Гц) требуется пластина площадью $S_n = 0,5 \text{ м}^2$. Эти Гр применяют в высококачественных АС, контрольных студийных агрегатах, в телевизорах и т. д.

Электретные громкоговорители отличаются от электростатических отсутствием постоянного напряжения и использованием вместо него поляризованного диэлектрика (электрета). В качестве электрета используют различные полимерные материалы, способные сохранять заряд на поверхности после поляризации в коронном разряде. Однако трудности в обеспечении стабильности зарядов значительное время на больших площадях ограничивают возможности их применения в излучателях.

Пьезоэлектрические (пьезокерамические) излучатели описаны в подразд. 1.2 и изображены на рис. 16, а. В этих излучателях в качестве возбуждающего элемента используют биморфную структуру, полученную путем склеивания двух пластин из пьезокерамики, например цирконата титаната свинца (ЦТС-керамика), титаната бария и т. д. При подведении электрического сигнала к биморфному элементу в нем происходит деформация изгиба. К центральной точке элемента подсоединяют диафрагму, которая увеличивает КПД излучателя и улучшает частотную характеристику звукового давления Гр (рис. 16, б).

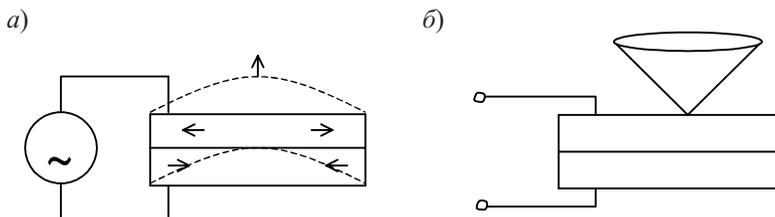


Рис. 16. Элементы пьезокерамического излучателя

Сильная зависимость характеристик пьезоэлектрического преобразователя от частоты объясняется тем, что пьезоэлемент имеет емкостное сопротивление, и протекающий через него ток увеличивается с увеличением частоты. Часто для выравнивания частотной характеристики последовательно с пьезоэлементом включают высокоомное сопротивление. Из-за небольших размеров пластин пьезокерамики (до 50 мм в диаметре) такие излучатели чаще всего используются в телефонах и рупорных громкоговорителях. Основное их достоинство – малое потребление энергии.

Пьезопленочные излучатели (рис. 17) основаны на использовании пьезоэффекта у поливинилиденфторидной пленки (ПВДФ).

При приложении к пленке переменного напряжения в направлении, перпендикулярном ее поверхности, она начинает пульсировать и излучать звук. Простота конструкции (отсутствие постоянных магнитов), а также высокочастотный (7–50 кГц) диапазон воспроизводимых частот являются основными преимуществами данного типа излучателей.

Плазменные излучатели (плазмотроны, ионофоны) используют для воспроизведения звука пульсации объема ионизированного воздуха в пространстве между электродами. Воспроизводимый диапазон частот 2–20 кГц при нелинейных искажениях 0,5 %. Основным достоинством является безынерционное воспроизведение звука, т. е. отсутствие переходных искажений.

Ленточные громкоговорители соединяют в себе достоинства динамических и электростатических излучателей. В качестве излучающего элемента используют легкую гофрированную ленточку из алюминиевой фольги (рис. 18). Воспроизводимый диапазон частот 10–120 кГц. Однако имеются существенные недостатки: наличие массивных магнитов, необходимость согласующих трансформаторов из-за малого сопротивления ленточки.

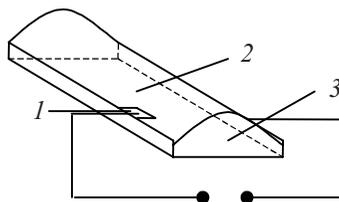


Рис. 17. Конструкция пьезопленочного Гр: 1 – контакты; 2 – пьезоэлектрическая мембрана; 3 – подложка

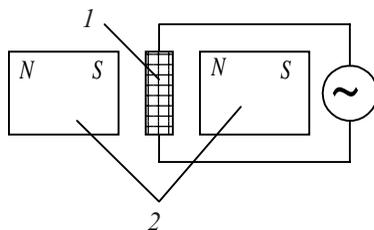


Рис. 18. Основные элементы конструкции ленточного излучателя: 1 – лента; 2 – магниты

Излучатели Хейла представляют собой гофрированную мембрану (из тефлона, нейлона) с нанесенным на нее металлическим проводником определенной конфигурации, который помещают в сильное магнитное поле. При подведении к проводнику электрического сигнала складки гофра с одной стороны мембраны сжимаются, с другой – разжимаются. Такие излучатели могут быть достаточно широкополосны.

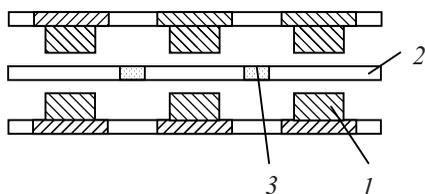


Рис. 19. Конструкция изодинамического излучателя: 1 – магниты; 2 – мембрана; 3 – проводник

Изодинамические излучатели (магнепланары) имеют в качестве излучающего элемента тонкую диэлектрическую мембрану, на которую методом напыления наносится проводник в форме прямоугольной спирали. Мембрана помещается в зазор между параллельными магнитами (рис. 19). Отечественный

Гр данного типа 10ГИ-1 имеет воспроизводимый диапазон частот 2–30 кГц.

Все вышеперечисленные типы Гр нашли применение в АС категории Ni-Fi. Использование того или иного излучателя зависит от конкретных требований к разрабатываемой аппаратуре и от условий ее эксплуатации.

2.7. Акустическое оформление громкоговорителей

Как уже подчеркивалось в подразд. 2.4, в области низких звуковых частот Гр рассматривается как система со средоточенными параметрами, а его диффузор еще колеблется как жесткий поршень, каждая точка которого движется синфазно с одинаковой колебательной скоростью. Как известно, на низких частотах снижается эффективность излучения Гр, что связано с дополнительным перетеканием воздуха с одной его стороны на противоположную, что приводит к выравниванию звуковых давлений, создаваемых движением излучателя. Это явление называют акустическим коротким замыканием.

Одним из способов повышения эффективности излучателя на низких частотах является размещение диафрагмы в стенке (экране), имеющей большие размеры и акустически разделяющей две стороны диафрагмы. Таким образом, плоский экран является одним из простейших акустических оформлений Гр, улучшающих воспроизведение на низких

частотах. На средние и особенно высокие частоты экран не оказывает существенного влияния. Конструктивно экран выполняют в виде доски или фанеры толщиной 10–20 мм. Предпочтительное отношение сторон экрана (ширина к высоте) в пределах от 2:1 до 3:1, и их величины должны быть сравнимы с максимально излучаемой длиной акустической волны.

В случае невозможности использования экрана эффективность излучателя на низких частотах улучшают за счет изменения его акустической нагрузки, которой является тот или иной тип корпуса Гр.

Рассмотрим нагрузку, какой для диффузора является корпус Гр, в различных диапазонах частот для простейшей модели корпуса, представляющей собой закрытую с одной стороны трубу длиной l (рис. 20). У открытого входа трубы расположен Гр с диффузором, имеющим площадь S_d и колеблющимся вокруг положения равновесия со скоростью v .

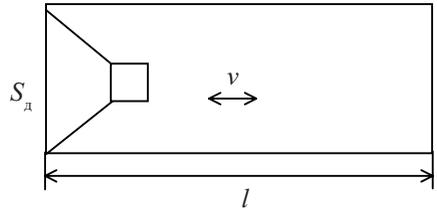


Рис. 20. Простейшая модель корпуса Гр

В данном случае полное акустическое сопротивление, нагружающее диффузор, равно [1]

$$z_a = -j \left(\frac{\rho c_{зв}}{S_d} \right) \operatorname{ctg} \left(\frac{\omega l}{c_{зв}} \right). \quad (2.35)$$

Из этого выражения следует, что z_a меняется с частотой как функция котангенса в пределах от бесконечно большого ($z_a = \infty$ при $\omega l / c_{зв} = \pi n$, $n = 0, 1, 2$) до нуля ($z_a = 0$ при $\omega l / c_{зв} = \pi(2n + 1)$, $n = 0, 1, 2$). В первом случае наблюдается заторможенный режим работы Гр, так как объемная скорость $V = v S_d = 0$, учитывая, что $z_a = p_{зв} S_d / V_v$, а во втором случае ничего не препятствует движению диффузора. Промежуточным частотам соответствуют промежуточные значения z_a .

Для низких звуковых частот, удовлетворяющих условию $l < \lambda/8$, функцию котангенса с точностью до 5 % можно представить в виде

$$z_a \approx j \frac{\rho c_{зв}}{S_d} \left(\frac{c_{зв}}{\omega l} - \frac{\omega l}{3c_{зв}} \right).$$

Учитывая, что $S_d l = V_0$ – объем трубы; $\rho V_0 = m_0$ – масса воздуха в трубе, полное акустическое сопротивление можно представить в виде

$$z_a \approx j \left(\frac{\omega m_0}{3S_d} - \frac{\rho c_{зв}^2}{\omega V_0} \right) = j\omega m_V + \frac{1}{j\omega C_V}. \quad (2.36)$$

В этой формуле $m_V = m_0/3S_d^2$ – акустическая масса воздуха, синфазно соколеблющаяся с диффузором Гр и составляющая его нагрузку; $C_V = V_0/\rho c_{зв}^2$ – акустическая гибкость воздуха в трубе объемом V_0 .

Часто, для самых низких частот, влияние корпуса Гр учитывают в виде только акустической гибкости C_V , так как реактивное сопротивление излучения, связанное с акустической массой m_V , мало. Такой подход к влиянию акустического оформления Гр иллюстрирует принцип анализа его характеристик как системы с сосредоточенными элементами. Акустическое оформление (корпус) может быть представлено на эквивалентной схеме в виде гибкости C_V , массы m_V и, в случае корпуса, заполненного звукопоглощающим материалом, акустическим сопротивлением потерь внутри корпуса r_V . При расчетах в формулу (2.35) подставляют самый большой линейный размер корпуса Гр. На средних и высоких частотах для ликвидации изменения акустического сопротивления корпуса внутрь его вводят звукопоглощающие материалы, а также придают корпусу соответствующую форму и пропорции, устраняющие резонансные явления. Используют различные виды акустического оформления Гр.

Закрытый корпус (рис. 21, а) обеспечивает полное разделение звуковых полей, образуемых передней и задней сторонами поверхности диффузора Гр, что является его неоспоримым достоинством. Но закрытые корпуса имеют и недостаток, заключающийся в том, что при колебаниях диффузор должен преодолевать дополнительную упругость воздуха в объеме ящика. Наличие этой дополнительной упругости приводит к тому, что повышается резонансная частота подвижной системы Гр. Кроме того, если материал, заполняющий корпус, вызывает понижение скорости звука внутри его, что отвечает мнимому увеличению корпуса, то увеличивается и гибкость воздуха в корпусе.

Результирующая гибкость C_a является последовательным соединением гибкости подвеса Гр $C_{п}$ и гибкости воздуха C_V в корпусе, т. е. она меньше собственной гибкости подвижной системы Гр.

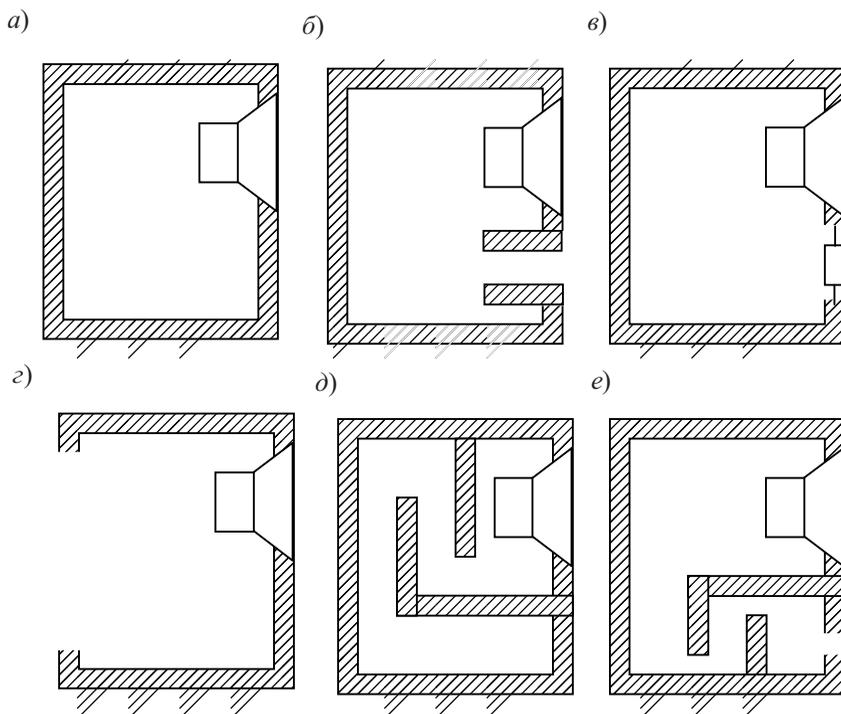


Рис. 21. Типы акустического оформления Гр

Если $C_{\text{п}} \gg C_V$, то $C_a \approx C_V$ и роль подвеса диффузора играет воздух в корпусе. В этом случае частота механического резонанса

$$f_M = \frac{1}{2\pi\sqrt{(m_V + m_n)C_V}}, \quad (2.37)$$

где m_n – масса подвижной системы Гр.

С увеличением C_V уменьшается f_M , и необходимо применять головки Гр с тяжелой подвижной системой, т. е. увеличивать m_n . Однако увеличение массы подвижной системы влечет за собой понижение чувствительности акустической системы в целом. Особенно небольшой является чувствительность у малогабаритных акустических систем, упругость объема воздуха внутри корпуса которых существенно больше, чем упругость закрепления подвижной части системы.

Объем корпуса рекомендуется брать возможно больше, однако не более величины, определяемой формулой

$$V_0 = \frac{\rho c_{зв}^2 S_d^2}{23,2 f_M^2 m_n} \approx 6,5 \cdot 10^3 \frac{S_d^2}{f_M^2 m_n},$$

где f_M – резонансная частота подвижной головки Гр без оформления. Из эстетических соображений размеры оформления в виде параллелепипеда часто выбирают так, чтобы размеры лицевой стороны и глубины относились друг к другу как $2 : \sqrt{2} : 1$.

Корпус с фазоинвертором, или бас-рефлекс (рис. 21, б) позволяет при умеренном объеме получить достаточно хорошее воспроизведение низких частот. Его конструкция отличается от закрытого оформления наличием щели или отверстия, в которое иногда вставляют трубку. Это конструктивное отличие позволяет использовать излучение тыловой поверхности диффузора в области частоты резонанса колебательной системы, образуемой массой воздуха в отверстии или трубе m_T и гибкостью воздуха в корпусе. Таким образом, отверстие является вторым, кроме диффузора, источником излучения звука. Упругость объема воздуха в оформлении резонирует на какой-то частоте с массой воздуха в отверстии. Эта частота называется резонансной частотой фазоинвертора

$$f_\Phi = \frac{1}{2\pi\sqrt{m_T C_V}}.$$

Таким образом, АС в целом становится состоящей как бы из двух резонансных систем – подвижной системы громкоговорителя и оформления с отверстием. Подвижная система Гр ведет себя как последовательный электрический резонансный контур, а фазоинвертор – как параллельный.

При правильном выборе резонансных частот f_M и f_Φ воспроизведение низких частот улучшается, так как на частотах выше f_Φ скорость колебаний частот в отверстии сдвинута по фазе от скорости колебаний задней стороны диффузора (в отверстии акустического обрамления сдвиг фаз равен 180° – короткое акустическое замыкание).

В области резонансной частоты настройки фазоинвертора сдвиг фаз минимален, в результате чего увеличивается суммарное звуковое давление. При дальнейшем увеличении частоты сказывается инерционность воздуха в канале фазоинвертора, он как бы "закупоривается", и конструкция действует как закрытый корпус.

Корпус с пассивным излучателем (диффузором) аналогичен корпусу с фазоинвертором, но здесь требуемую дополнительную акустическую массу реализуют, вставляя в отверстие пассивный диффузор (рис. 21, в). Он представляет собой громкоговоритель с утяжеленной подвижной системой без магнитной цепи и звуковой катушки. Образуется дополнительная колебательная система, состоящая из массы подвижной системы пассивного излучателя, гибкости его подвеса и воздуха в корпусе.

Открытый корпус является распространенным видом акустического оформления (рис. 21, г). Он представляет собой ящик, у которого задняя стенка или полностью отсутствует, или же имеет ряд сквозных отверстий. Акустическое действие открытого оформления подобно действию обычного экрана. Боковые стенки открытого оформления мало влияют на характеристики акустической системы. Наибольшее влияние оказывает передняя стенка, на которую устанавливается громкоговоритель. Ее размеры делают на 25–40 % меньше размеров необходимого экрана. Открытый корпус не должен быть глубоким, так как он может начать действовать как труба, резонирующая на ряде частот, тем более низких, чем больше длина трубы.

Помимо вышперечисленных, существуют и другие, но реже используемые виды акустического оформления.

Корпус с акустическим лабиринтом (рис. 21, д, е) использует излучение задней стороны поверхности диффузора Гр, как и фазоинвертор. Принципиальным отличием является то, что связь тыльной стороны диффузора с выходным каналом осуществляется акустическим волноводом, т. е. распределенной системой, а не с помощью сосредоточенных элементов. Длина внутреннего канала лабиринта подбирается таким образом, чтобы она была равна половине длины волны (сдвиг фазы на 180°) на нижней граничной частоте акустической системы. Благодаря этому излучения, формируемые диффузором и выходным отверстием лабиринта, совпадают по фазе. На средних и высоких частотах выходной канал не функционирует. Данное акустическое оформление достаточно эффективно, но является довольно громоздким и вследствие этого редко применяемым.

В последние годы появились новые типы систем, в которых для формирования характеристик в области низких частот используют методы электронной коррекции. Эти методы дают более широкие возможности синтеза желаемых низкочастотных характеристик системы, позволяют

уменьшить размеры корпусов акустического оформления, повысить уровень максимального звукового давления, снизить нелинейные искажения. Электронная коррекция реализуется электромеханической обратной связью, применением амплитудных корректоров низких частот, усилителей мощности со сложным комплексным характером выходного сопротивления, что позволяет электронным путем перестраивать механические параметры низкочастотного Гр, размещенного в корпусе [4, 8].

2.8. Рупорные системы

Рупорные громкоговорители состоят из двух основных частей: головки, предназначенной для возбуждения звуковых колебаний, и рупора. Применение рупора, нагружающего подвижную систему Гр, на порядок улучшает КПД последнего и таким образом дает возможность получить достаточную величину звукового давления при небольшой величине подводимой электрической мощности. Кроме того, он придает излучению требуемую направленность.

Площадь поперечного сечения рупора описывается зависимостью $S = S_0 [f(x)]$, где S_0 – площадь сечения входного отверстия (горла) рупора; $f(x)$ – функция, зависящая от координаты X , совпадающей с осью рупора. Применяются конические, гиперболические, параболические и степенные рупоры. Наиболее распространенной формой рупора, обеспечивающей наилучшее воспроизведение низких частот, является экспоненциальная, при которой

$$S = S_0 e^{\delta x}, \quad (2.38)$$

где δ – показатель расширения рупора. При этой форме поперечное сечение рупора увеличивается на одинаковую процентную величину через каждую единицу его осевой длины. Во многих рупорных Гр площадь излучающей поверхности подвижной системы (диафрагмы или диффузора) больше входного отверстия рупора. Это так называемые узкогорлые рупоры. Они требуют наличия предрупорной камеры (рис. 22). Отношение излу-

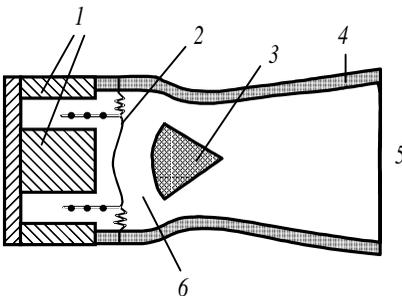


Рис. 22. Конструкция рупорного электроакустического Гр:

1 – магнитная система; 2 – диафрагма; 3 – вкладыш; 4 – рупор; 5 – устье рупора; 6 – предрупорная камера

чающей площади диафрагмы S_d к площади S_0 горловины рупора называется коэффициентом трансформации предрупорной камеры $n_T = S_d / S_0$.

Полное сопротивление излучения диафрагмы определяется в этом случае выражением

$$z_a = \rho c_{зв} S_0 n_T^2 \left[\sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f} \right)^2} + j \frac{f_{кр}}{2f} \right], \quad (2.39)$$

а его активная составляющая с учетом (2.33)

$$r_s = \rho c_{зв} S_0 n_T^2 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f} \right)^2}, \quad (2.40)$$

где $f_{кр}$ – критическая частота рупора:

$$f_{кр} = \frac{\delta c_{зв}}{4\pi}. \quad (2.41)$$

Из выражения (2.40) видно, что волновой процесс в экспоненциальном рупоре возможен лишь при $f = f_{кр}$.

Надлежащим образом, выбирая величину коэффициента трансформации n_T , можно добиться примерного равенства механического сопротивления подвижной системы излучателя (2.9) и сопротивления излучения $|z| \approx r_s$, т. е. оптимальных условий работы излучателя. Для частот $f > f_{кр}$ полное механическое сопротивление нагрузки диафрагмы z рупорного Гр с предрупорной камерой, как это следует из выражения

(2.39), оказывается в $\frac{S_d}{S_0}$ раз больше, чем Гр без рупорной камеры.

Для согласования выхода рупора с внешней средой линейные размеры оконечного отверстия (устья) должны быть сравнимы с длиной волны звука низшей воспроизводимой частоты. На практике рупор можно считать согласованным, если для его предельной частоты выполняется

условие $\frac{2\pi a}{\lambda} \geq 2$, т. е. радиус устья $a \geq \frac{c_{зв}}{\pi f_{кр}}$.

Отсюда для нижней граничной частоты, например 100 Гц, для которой длина волны составляет 3,4 м, диаметр устья должен быть около 110 см. Кроме того, рупорный Гр, хорошо воспроизводя низкие частоты (выше

$f_{кр}$), плохо воспроизводит высшие, в связи с чем его приходится дополнять специальным Гр на высшие частоты. Диапазон воспроизводимых частот для рупорных Гр электродинамических систем составляет 3–5 октав при неравномерности частотной характеристики звукового давления 14–18 дБ.

Применение рупорных Гр в помещениях очень ограничено хотя бы

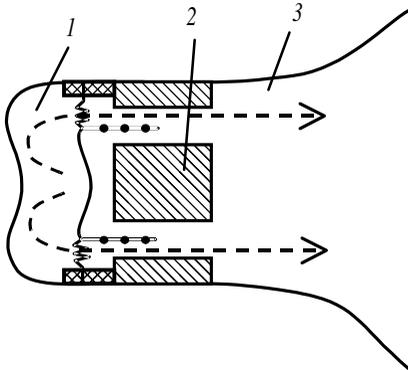


Рис. 23. Конструкция Гр со "свернутым" рупором: 1 – входное отверстие рупора; 2 – головка Гр; 3 – рупор

потому, что разместить их в обычных помещениях затруднительно. Их применение для озвучения на открытом воздухе вполне оправдано из-за высокого КПД и значительной мощности излучения.

Для уменьшения длины рупора в средне- и особенно низкочастотных Гр часто применяют так называемые "свернутые" рупоры (рис. 23). Предлагаются также конструкции, в которых стенками рупора являлись бы стенки помещения, например при размещении Гр в углу комнаты.

Для воспроизведения высоких частот рупорное оформление весьма оправдано из-за небольших размеров рупора, что довольно часто имеет место в разработках зарубежных фирм.

2.9. Акустические системы

Практически все современные высококачественные АС являются многополосными, состоящими из нескольких Гр (чаще всего трех), каждый из которых работает в своем диапазоне частот. Это связано с тем, что в силу ряда причин, изложенных выше, невозможно создать динамический Гр, обладающий хорошими характеристиками в широком диапазоне частот. Для распределения энергии звукового сигнала между Гр АС используют электрические разделительные фильтры, иногда называемые кроссоферами. Разделительные фильтры могут быть выполнены как из пассивных элементов, так и с применением активных. Во втором случае в каждой полосе активной системы должен работать свой усилитель мощности. Кроме Гр и разделительных фильтров в АС могут располагаться регуляторы формы частотной характеристики, так

называемые корректирующие цепи, и различные другие электронные устройства. АС, состоящие из отдельных головок Гр в своем акустическом оформлении и работающие в своей полосе частот, называют компонентными АС, из двух головок Гр (двухполосные) в единой конструкции – коаксиальными АС, более чем двухполосных – мультиаксиальными АС.

Еще до недавнего времени наиболее распространенными видами схем пассивных разделительных фильтров являлись схемы, изображенные на рис. 24. Схемы на рис. 24, а, б дают увеличение затухания за своей граничной частотой 9дБ/окт. Величины индуктивностей и емкостей, применяемые в ней, могут быть вычислены по формулам $L = 224R/f$, мГц и $C = 112 \cdot 10^3 / (f_{гр} R)$, мкФ, где R – сопротивление соответствующего Гр; $f_{гр}$ – частота разделения полос пропускания.

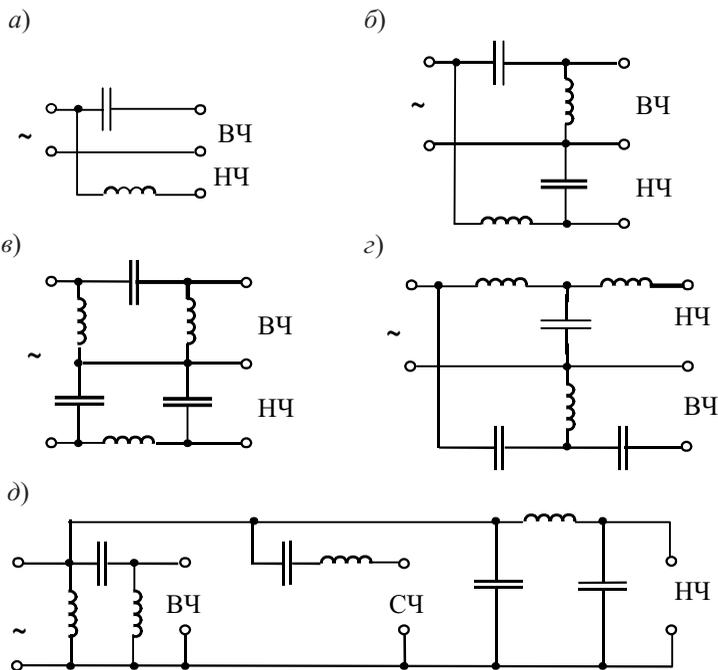


Рис. 24. Схемы простейших разделительных фильтров

Схемы фильтров на рис. 24, в, з позволяют более резко разделять полосы пропускания, они обеспечивают увеличение затухания за своей

границей до 18 дБ/окт. Величины емкостей и индуктивностей можно определить по формулам:

$$L_1 = 0,707 L; \quad L_2 = 1,41 L; \quad L_3 = 0,35 L; \quad L_4 = 1,05 L; \quad L_5 = 0,47 L;$$

$$C_1 = 1,41 C; \quad C_2 = 2,82 C; \quad C_3 = 0,7 C; \quad C_4 = 2,1 C; \quad C_5 = 0,94 C.$$

В высококачественных акустических системах (особенно при использовании в качестве низкочастотных головок Гр с частотой резонанса 25–30 Гц) применяют трехполосные разделительные фильтры (рис. 24, д). При этом имеются две частоты разделения: нижняя $f_{p.н} = 300 - 600$ кГц и верхняя $f_{p.в} = 5$ кГц.

В настоящее время используют более сложные схемы кроссофферов, удовлетворяющие различным критериям. В случае, если разделительные фильтры не обеспечивают получения необходимой формы частотной характеристики звукового давления, создаваемого АС, применяют коррекцию частотной характеристики электрического тракта. Такую коррекцию вводят на концах частотного диапазона.

Разделительные фильтры оказывают существенное влияние на такие характеристики многополосных АС, как АЧХ, ФЧХ, характеристики направленности, распределение мощности входного сигнала между излучателями, входное сопротивление АС, уровень нелинейных искажений.

Анализ влияния разделительных фильтров на формирование АЧХ, ФЧХ и других характеристик удобно проводить на модели двухполосной АС [1, 4].

Разделительный фильтр АС, состоящий из фильтров низкой частоты (НЧ) с передаточной функцией $K_{НЧ}(j\omega)$ и высокой частоты (ВЧ) с передаточной функцией $K_{ВЧ}(j\omega)$ разделяет входной сигнал комплексной амплитуды $S(j\omega)$ на две составляющие НЧ и ВЧ. Эти сигналы преобразуются в акустическое давление соответственно НЧ- и ВЧ-громкоговорителями с передаточными функциями $K_{1НЧ}(j\omega)$ и $K_{1ВЧ}(j\omega)$ (рис. 25).

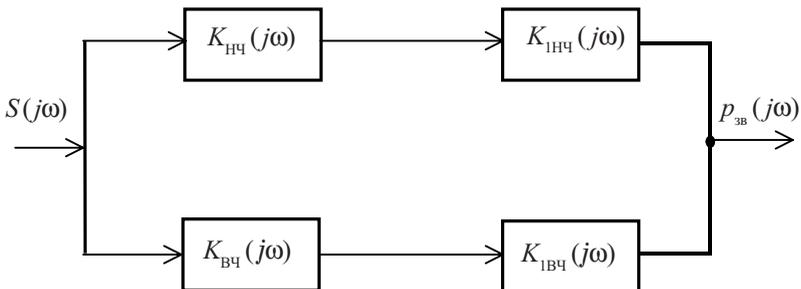


Рис. 25. Передача сигнала в двухполосной АС

Поскольку головки Гр в АС располагаются рядом, то результирующее звуковое давление является суммой давлений, развиваемых каждым из Гр:

$$p_{зв}(j\omega) = S(j\omega) [K_{НЧ}(j\omega)K_{1НЧ}(j\omega) + K_{ВЧ}(j\omega)K_{1ВЧ}(j\omega)]. \quad (2.42)$$

На практике обычно рассматривают методы анализа и расчета разделительных фильтров в АС на основе модели с идеальными Гр, т. е. с идеальными передаточными функциями: без неравномерностей АЧХ и без фазовых искажений:

$$K_{1НЧ}(j\omega) = K_{1ВЧ}(j\omega) = K_0.$$

Тогда результирующее звуковое давление

$$p_{зв}(j\omega) = S(j\omega) K_0 [K_{НЧ}(j\omega) + K_{ВЧ}(j\omega)] \quad (2.43)$$

и условием воспроизведения АС неискаженного звукового сигнала является независимость от частоты суммы передаточных функций разделительных фильтров.

Разделительные фильтры бывают нескольких типов.

1. *Фильтры с нулевой фазовой характеристикой* (фильтры постоянного напряжения), удовлетворяющие условию

$$K(j\omega) = K_{НЧ}(j\omega) + K_{ВЧ}(j\omega) = 1. \quad (2.44)$$

Суммарный сигнал такой АС не претерпевает ни амплитудных, ни фазовых искажений.

2. *Все пропускающие фильтры*, модуль передаточной функции которых равен единице:

$$K(j\omega) = 1 \exp\{j\varphi\}. \quad (2.45)$$

Эти фильтры также не вносят амплитудно-частотных искажений в сигнал, но вносят фазовые искажения. Они удовлетворяют условию постоянства разности фазовых характеристик

$$\arg K_{НЧ}(j\omega) - \arg K_{ВЧ}(j\omega) = \text{const.}$$

Кроме требования независимости от частоты третьего множителя в выражении (2.43), пассивные разделительные фильтры должны иметь входное сопротивление, обеспечивающее соответствующую постоянную нагрузку для усилителя мощности.

3. *Фильтры постоянного входного сопротивления* удовлетворяют этому требованию. Если такие фильтры имеют одинаковые активные сопротивления нагрузки, их входное сопротивление также имеет

активный характер и не зависит от частоты. Этим свойством обладают фильтры Баттерворта, имеющие передаточные функции, удовлетворяющие уравнению

$$|K_{НЧ}(j\omega)|^2 + |K_{ВЧ}(j\omega)|^2 = 1. \quad (2.46)$$

В справочниках приводятся виды передаточных функций фильтров Баттерворта различных порядков для низкочастотного и высокочастотного каналов АС [3, 5–7].

Разделительные фильтры постоянного напряжения являются одновременно фазовыми всепропускающими фильтрами (но не наоборот). Всепропускающие кроссоферы могут быть тождественны фильтрам с постоянным сопротивлением (и наоборот). По совокупности своих свойств наиболее распространенными фильтрами, используемыми в современных АС, являются всепропускающие разделительные фильтры.

2.10. Пространственные характеристики акустических систем

Как известно, любой Гр (особенно на средних и высоких частотах) обладает пространственной направленностью излучения, характеризующейся диаграммой направленности (ДН) $R(Q, \varphi) = p_{зв}(Q, \varphi) / p_{зв}(0, 0)$ [см. (2.3), (2.21)]. В АС, содержащих несколько пространственно разнесенных головок Гр, для определения ДН можно использовать простую модель, в которой источником излучения является группа излучателей, состоящая из $N \times M$ точечных источников звука, расположенных на расстояниях d_x и d_y друг от друга (рис. 26, а). Эта модель справедлива на НЧ, при которых размеры головок Гр много меньше излу-

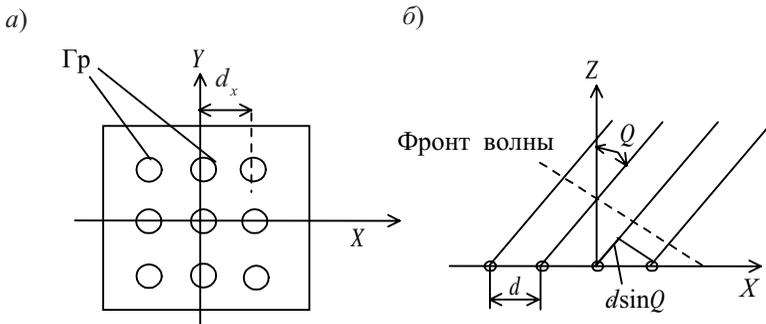


Рис. 26. К определению пространственных характеристик АС

мых длин волн, т. е. каждый Гр обладает сферической ДН. ДН группы Гр определяется формулой [1, 9]

$$R_{\Gamma}(Q, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{N}{2} k d_x \sin Q\right)}{\frac{N}{2} k d_x \sin Q} \times \frac{\sin\left(\frac{M}{2} k d_y \sin \varphi\right)}{\frac{M}{2} k d_y \sin \varphi}. \quad (2.47)$$

Для группы Гр, расположенных вдоль прямой линии X на расстоянии d друг от друга, ДН имеет вид (рис. 26, б)

$$R_{\Gamma}(Q) = \frac{\sin(0,5Nkd \sin Q)}{0,5Nkd \sin Q}. \quad (2.48)$$

Эта ДН имеет главный максимум в направлении акустической оси Z , а также боковые максимумы.

Все формулы, описывающие ДН звуковых АС, справедливы для дальнего звукового поля, т. е. для расстояний r от АС до точки наблюдения, удовлетворяющих условию $r \geq 2(Nd)^2/\lambda$. В дальнем поле направленность АС не зависит от расстояния.

На средних и особенно высоких частотах головки Гр уже нельзя считать точечными излучателями, они обладают собственными ДН $R_0(Q)$ (по одной координате). В этом случае ДН АС является произведением ДН

$$R(Q) = R_0(Q)R_{\Gamma}(Q). \quad (2.49)$$

Аналогично можно описать ДН двумерных источников излучения $R(Q, \varphi)$.

В АС головки Гр не только пространственно разделены, но и работают в различных диапазонах частот. При этом они должны обеспечивать следующие требования.

1. Постоянство излучаемой АС акустической мощности на разных частотах.
2. Минимум пульсаций амплитуды звукового давления на акустической оси в зависимости от частоты.
3. Хорошую АЧХ звукового давления в заданном диапазоне углов.

Первое и третье условия связаны с пространственным излучением звуковых волн АС.

Проанализируем звуковое давление, создаваемое АС, состоящей из двух (низкочастотного и высокочастотного) точечных Гр, расположен-

ных на расстоянии d друг от друга. В дальней зоне ($r \gg d$) суммарное звуковое давление

$$|p_{зв}(j\omega, r, Q)| = \left\{ \begin{array}{l} p_{НЧ}^2(\omega) + p_{ВЧ}^2(\omega) + \\ + 2p_{НЧ}p_{ВЧ}\cos[\Delta\phi(\omega) - kd\sin Q] \end{array} \right\}^{1/2}, \quad (2.50)$$

где $p_{НЧ}$ и $p_{ВЧ}$ – амплитуды звукового давления, образуемые соответственно низкочастотным и высокочастотным Гр, описываемые выражениями (см. подразд. 2.9)

$$\begin{aligned} p_{НЧ}(\omega) &= |S(j\omega)K_{НЧ}(j\omega)K_{1НЧ}(j\omega, r, Q)|; \\ p_{ВЧ}(\omega) &= |S(j\omega)K_{ВЧ}(j\omega)K_{1ВЧ}(j\omega, r, Q)|, \end{aligned}$$

где $\Delta\phi(\omega)$ – разность фаз сигналов Гр; $kd\sin Q$ – фазовый сдвиг, обусловленный пространственным разнесением Гр.

Результирующее звуковое давление максимально и равно

$$|p_{зв}(j\omega, r, Q)| = p_{НЧ}(\omega) + p_{ВЧ}(\omega)$$

при выполнении равенства

$$\cos\left[\Delta\phi(\omega) - \frac{\omega}{c_{зв}}\sin Q\right] = 1. \quad (2.51)$$

Расположению максимума звукового давления всегда на акустической оси АС ($Q = 0$) соответствует условие

$$\Delta\phi(\omega) = 0, \quad (2.52)$$

иначе расположение максимума излучения будет зависеть от частоты. Это условие обеспечивают разделительные фильтры, реализуемые как каскадное соединение идентичных фильтров Баттерворта. В то же время для уменьшения неравномерности АЧХ, возникающей вследствие интерференции излучений головок Гр, необходимо выполнение равенства [1, 4]

$$\cos[\Delta\phi(\omega)] = 0,$$

что противоречит условию (2.52). Таким образом, не существует идеальных разделительных фильтров, которые удовлетворяли бы всем трем основным требованиям для АС, так как одновременное выполнение требований независимости P_a от частоты и ориентация максимума излучения в направлении акустической оси АС невозможно. При разра-

ботке АС с учетом множества различных требований технические решения того или иного рода являются всегда компромиссными.

2.11. Основные виды искажений в акустических системах

При воспроизведении музыкальных и речевых сигналов через АС возникают различные типы искажений, которые могут быть разделены на линейные и нелинейные.

Нелинейные искажения характеризуются появлением в процессе электромеханических и механоакустических преобразований сигнала новых спектральных составляющих, искажающих временную структуру сигнала. Линейные искажения меняют амплитудные и фазовые соотношения между составляющими сигнала и за счет этого также искажают его временную структуру, т. е. искажают восприятие первоначального сигнала.

Линейные искажения допускают только изменение сигнала в масштабе и задержку во времени, при сохранении его формы. Если к исследованию АС подойти с общих принципов анализа линейных электрических цепей, т. е. рассматривать ее как линейную, инвариантную во времени систему, то условие неискаженной передачи сигнала во временной области будет

$$y(t) = K_1 [x(t - T)], \quad (2.53)$$

где K_1 – постоянная; $x(t)$ и $y(t)$ – соответственно входной и выходной сигналы. В частотной области эти условия выглядят следующим образом:

$$|K_{AC}(j\omega)| = K_0; \quad (2.54)$$

$$\varphi(\omega) = -\omega T, \quad (2.55)$$

где $|K_{AC}(j\omega)|$ – АЧХ (на практике под АЧХ обычно понимают $20 \lg |K_{AC}(j\omega)|$); $\varphi(\omega)$ – ФЧХ системы. Несоблюдение условий (2.54), (2.55) в реальных АС и обуславливает наличие линейных искажений: амплитудно-частотных и фазочастотных. Следует отметить, что эти условия должны выполняться по частотному диапазону в бесконечных пределах, что невыполнимо в полном объеме ни в одной АС. Поэтому рассматривают отклонения АЧХ и ФЧХ от идеальных внутри диапазона воспроизводимых частот.

Амплитудно-частотные искажения АС считаются основным критерием качества данной аппаратуры, так как они субъективно воспри-

нимаются как искажения тембра звучания, к которому очень чувствителен слух человека.

Обычно АЧХ АС представляется в виде графика зависимости уровня звукового давления от частоты в логарифмическом масштабе. Под уровнем звукового давления понимается отношение измеренного значения модуля звукового давления к значению $2 \cdot 10^{-5}$ Па, выраженное в децибелах. По данной АЧХ рассчитывается ряд параметров, позволяющих количественно оценить амплитудно-частотные искажения в АС (см. подразд. 2.2).

Исследования показали, что пороговая чувствительность к неравномерности АЧХ составляет в среднем 2 дБ, к обнаружению пиков значительно выше, чем к провалам, причем уровень этой чувствительности зависит также от ширины (добротности) пика-провала и местоположения его на частотной оси. Чувствительность слуха к спектральным нерегулярностям максимальна в области 500–3000 Гц. Остается спорным вопрос о расширении полосы воспроизводимых частот за пределы 20 Гц–20 кГц, субъективно не воспринимаемых слухом человека. В некоторых моделях АС категории Hi-Fi диапазон частот равен 20 Гц–40 кГц, хотя в среднем составляет 35 Гц–20 кГц.

Фазочастотные искажения – это степень отклонения реальной ФЧХ АС от прямой, проходящей через начало координат, т. е. несоблюдение условия (2.55). Практически до последнего времени ФЧХ системы интересовались мало, так как существовало мнение, что слух не реагирует на фазовую структуру сигнала. Кроме того, считалось, что АС относятся к минимально-фазовым системам, в которых АЧХ и ФЧХ однозначно связаны через преобразование Гильберта

$$\varphi_M(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln|K(j\omega')|}{\omega' - \omega} d\omega', \quad (2.56)$$

и, следовательно, измерение АЧХ достаточно для определения ФЧХ.

Однако измерение ФЧХ АС показало, что ФЧХ может быть представлена в виде

$$\varphi(\omega) = \varphi_M(\omega) + \varphi_H(\omega), \quad (2.57)$$

где $\varphi_M(\omega)$ – минимально-фазовая часть ФЧХ, определяемая формулой (2.56), а $\varphi_H(\omega)$ – неминимально-фазовая часть:

$$\varphi_H(\omega) = \varphi_a(\omega) + \varphi_0 - \omega T, \quad (2.58)$$

где $\varphi_a(\omega)$ – фазовый сдвиг, обусловленный неминимально-фазовыми свойствами системы (при этом $\varphi_a(0) = 0$); φ_0 – частотно-независимый фазовый сдвиг; ωT – фазовый сдвиг из-за задержки сигнала на время T при прохождении через АС.

Для оценки фазовых искажений в АС используют выражения фазовой задержки

$$\tau_{\phi}(\omega) = -\frac{\varphi(\omega)}{\omega}$$

и группового времени задержки (ГВЗ)

$$\tau_{\text{гр}}(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}. \quad (2.59)$$

Необходимым условием отсутствия фазовых искажений являются равенства $\tau_{\phi} = T$ и $\tau_{\text{гр}} = T$.

Используя выражения (2.57)–(2.59), можно записать

$$\tau_{\text{гр}}(\omega) = T - \frac{d\varphi_{\text{м}}(\omega)}{d\omega} - \frac{d\varphi_a(\omega)}{d\omega} = T - \Delta\tau_{\text{гр}}(\omega),$$

откуда условие отсутствия искажений такого типа равно

$$\Delta\tau_{\text{гр}}(\omega) = 0. \quad (2.60)$$

В реальных системах условие (2.60) соблюдается не строго, так как достаточно, чтобы в воспроизводимом диапазоне $\Delta\tau_{\text{гр}}(\omega) < \tau_c(\omega)$, где $\tau_c(\omega)$ – частотно-зависимый дифференциальный порог слышимости искажений ГВЗ. Кроме этого условия в АС необходимо выполнение равенства $\varphi(0) = \varphi_{\text{м}}(0) + \varphi_0 = 0$.

Основными причинами фазовых искажений являются сложный диспергирующий характер колебательных процессов в подвижных системах Гр, частотно-зависимые фазовые сдвиги в разделительных фильтрах, фазовые сдвиги из-за пространственного распределения Гр в корпусе АС.

Как показали экспериментальные исследования, наибольшая чувствительность к фазовому сдвигу в сложных сигналах обнаруживается в полосе частот 600 Гц–4 кГц и составляет 10–15°. Однако значение этих порогов зависит от разности частот и амплитуд, составляющих сигнала, условий прослушивания, интенсивности сигнала и т. д.

Переходные искажения, т. е. процесс нарастания и спада звукового давления в музыкальных и речевых сигналах, играют важную роль в идентификации музыкальных инструментов и распознавании речи. Определяют такие параметры переходного процесса, как декремент колебания $\Delta A = 1/\pi(\ln A_n / A_{n+1})$, где A_n / A_{n+1} – отношение амплитуд предыдущей полуволны к последующей, и время затухания (или установления), т. е. время Δt , в течение которого амплитуда сигнала падает до 0,1 начального значения.

В настоящее время нет установленных международными рекомендациями норм относительно величин переходных искажений АС. Существуют результаты субъективных экспертиз, позволяющие оценить субъективные дифференциальные пороги для времени Δt . Как известно, для сигналов типа прямоугольных импульсов с синусоидальным заполнением $\Delta t = 0,5$ мс в области частот 1–10 кГц и $\Delta t = 1$ мс ниже 1 кГц. При этом чувствительность слуха к нарастанию и спаду переходного процесса оказалась практически одинаковой.

Нелинейные искажения, приводящие к появлению новых спектральных составляющих в спектре сигнала, в АС имеют уровень значительно выше, чем во всех остальных звеньях звуковоспроизводящего тракта. Для оценки гармонических искажений предусмотрено применение суммарного характеристического коэффициента гармоник, определяемого выражением (2.7). В лучших моделях АС категории Hi-Fi достигнут уровень $K_r = 1\%$ до 1 кГц, $K_r = 0,5\%$ выше 1 кГц, уровни K_{r2} , K_{r3} для отдельных гармоник составляют 0,1–0,3 %.

Кроме гармоник высших порядков в спектре выходного сигнала могут присутствовать субгармоники $1/nf_0$, субъективно воспринимаемые как "призвуки".

В настоящее время считается установленным, что для всех видов нелинейных искажений в АС на реальных музыкальных программах субъективные пороги слышимости составляют 1–5 %. Заметность гармонических составляющих зависит от их порядка: гармонические искажения третьего порядка вдвое выше, чем второго; чувствительность слуха к искажениям пятого и других нечетных порядков в 6–10 раз выше, чем второго. Частотная область максимальной чувствительности слуха находится в пределах 1–2 кГц. Чувствительность слуха увеличивается при повторных прослушиваниях.

Искажения динамического диапазона передаваемых сигналов, как показали экспериментальные исследования по определению их слышимости, выявили сильную чувствительность слуха к его ограничению. Если определить динамический диапазон АС как отношение максимального пикового уровня звукового давления передаваемого сигнала к уровню шумов, то требуемые величины составляют 50–120 дБ в зависимости от вида программы. Пиковые уровни давлений современной и классической музыки составляют: рояль – 103 дБ, классический оркестр – 112 дБ, орган – 116 дБ, рок-музыка – 128 дБ. В современных цифровых звуковоспроизводящих трактах динамический диапазон составляет только 96 дБ, в аналоговых еще ниже.

Для характеристики АС к неискаженной передаче пиковых уровней употребляется параметр – максимальный уровень звукового давления – max SPL . Для подавляющего большинства аналоговых систем значения его лежат в пределах 102–105 дБ, а для цифровых АС составляют 110–125 дБ.

Кроме вышеперечисленных видов искажений в АС существуют и другие, например вызванные эффектом Доплера; возникающие при одновременном воспроизведении Γ_r высоких и низких частот; или искажения АЧХ, связанные с характеристикой направленности Γ_r .

2.12. Телефоны

Телефонами называются ЭП (двигатели), подводящие акустическую энергию непосредственно к уху [6–10]. Головной телефон состоит из ЭП 3, корпуса 2, эластичной раковины 1 (амбушура), прижимаемой к уху 4 (рис. 27). В телефонах применяют преобразователи: электромагнитные, электродинамические, электростатические, пьезоэлектрические, угольные.

Электромеханическая часть телефонов эквивалентна электромеханической части Γ_r .

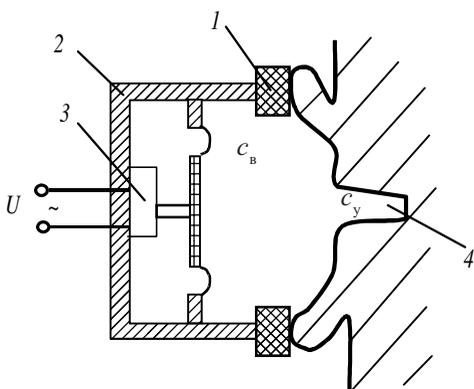


Рис. 27. Головной телефон

Электромагнитные телефоны, имеющие те же недостатки, что и Гр, довольно широко распространены из-за своей простоты и прочности. Кроме того, они применяются только для передачи речи, поэтому и требования к ним менее жесткие, чем для передачи художественных программ.

Телефоны, построенные на электродинамическом способе преобразования, распространены меньше электромагнитных. Их основное назначение – прослушивание стереофонических передач и контроль при киносъемках и звукозаписи. По конструкции они разделяются на диффузорные и капсульные. В первых основой конструкции является небольшой диффузорный Гр, заключенный в корпус; во вторых – небольшая магнитная система с подвижной системой и куполообразной диафрагмой. Качественные показатели электродинамических телефонов значительно лучше, чем у электромагнитных. Они имеют более равномерную частотную характеристику и меньше нелинейных искажений.

Применение электростатических (электретных), а также пьезоэлектрических телефонов, ставших перспективными благодаря появлению эффективных пьезоэлектрических пленок, ограничивается сложностью их конструкции и высокой ценой. Преимущества этих телефонов в том, что они возбуждаются по всей поверхности подвижного электрода, благодаря чему все его точки колеблются синфазно, т. е. поршнеобразно, что особенно важно при излучении ВЧ. Поэтому частотная характеристика этих телефонов является протяженной в сторону ВЧ по сравнению с характеристиками телефонов, построенных на других принципах.

Акустической нагрузкой диафрагмы телефона является полное входное акустическое сопротивление уха z_y , гибкость воздуха c_b , замкнутого в ушной раковине корпусом телефона, его масса m_b и r_s – активное акустическое сопротивление, обусловленное связью внутренней полости телефона с окружающей средой вследствие неплотного прилегания телефона к уху. Полное акустическое сопротивление уха в области НЧ имеет емкостный характер $z_y = 1/j\omega c_y$ [1]. В расчетах часто гибкости

c_y и c_b заменяют одной $c_\Sigma = c_y + c_b = V_k / (\rho c_{зв})^2$, отображающей влияние результирующего объема воздуха V_k . Значение V_k зависит от типа связи телефона с ухом. Головные телефоны по типу акустической связи с ухом делятся на наружные (см. рис. 27), с плотным амбушуром и на вкладываемые в ухо (рис. 28). Для всех видов головных телефонов типовое значение $V_k = 6 \text{ см}^3$.

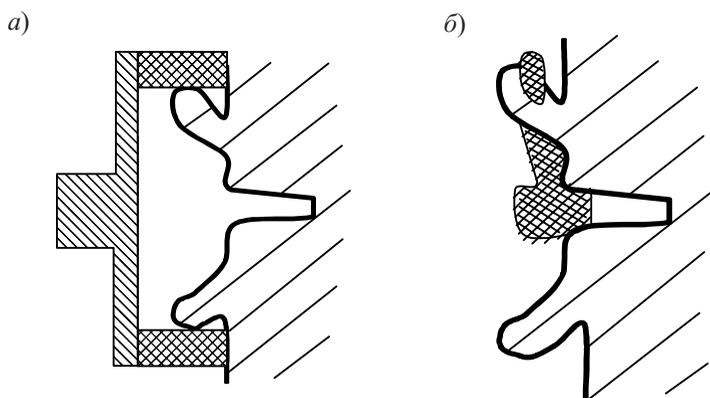


Рис. 28. Разновидности телефонов:
a – с плотным амбушуром; *б* – вкладываемые в ухо

Обычные телефоны могут работать в одноканальной (см. рис. 27), двухканальной, квадрафонической (рис. 29, *a*) и четырехканальной стереофонической системах (рис. 29, *б*) звукопередачи. Основным отличием квадрафонического телефона является то, что на каждое ухо воздействуют два преобразователя-громкоговорителя переднего и заднего каналов (например, правых). Если так же устроен телефон переднего и заднего левых каналов, то в парном телефоне можно обеспечить четырехканальную стереофоническую звукопередачу.

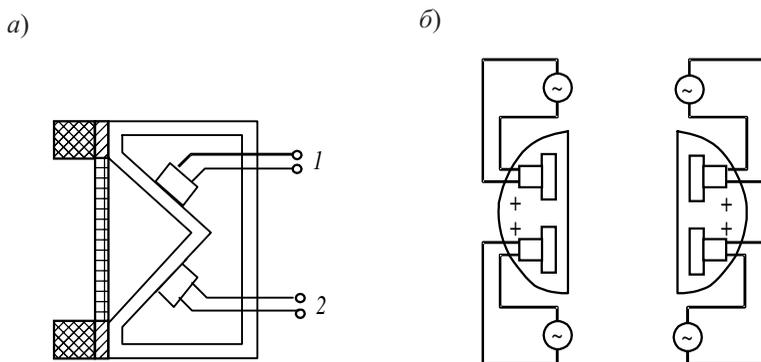


Рис. 29. Устройство телефонов: *a* – квадрафонического;
 1, 2 – Гр переднего и заднего каналов;
 б – четырехканального стереофонического

В зависимости от акустической связи с окружающей средой телефоны делятся на закрытые и открытые. Для закрытого звукоизолирующего телефона основной нагрузкой является акустическая гибкость воздуха объема, а создаваемое им в полости уха звуковое давление определяется деформацией замкнутого объема воздуха и пропорционально смещению диафрагмы. Такие телефоны применяются главным образом при непосредственной записи и воспроизведении звуковых сигналов в студиях. В телефоне открытого типа, имеющем связь с внешней средой, создаваемое диафрагмой звуковое давление пропорционально скорости ее колебаний. Такие телефоны называются скоростными и являются наиболее распространенными.

3. МИКРОФОНЫ

3.1. Основные определения, классификация и области применения

Микрофон – ЭП (преобразователь-генератор), служащий для преобразования акустических колебаний воздушной среды в электрические и являющийся первым и одним из наиболее важных звеньев любого электроакустического тракта. Поэтому его свойства, параметры и условия эксплуатации оказывают решающее воздействие на качество функционирования этого тракта.

Микрофоны классифицируют по разным признакам: назначению, способу преобразования колебаний, диапазону воспринимаемых частот, направленности, способности выделять полезный сигнал на фоне помех (шумов), способу воздействия звуковых колебаний на диафрагму, конструктивному исполнению, группам сложности [6–12].

В зависимости *от назначения* микрофоны делятся на бытовые (любительские) и профессиональные. Первые из них используются для домашней звукозаписи. Вторые применяют в аппаратуре связи, радиовещании, телевидении, для звукозаписи, для звукоусиления в помещении и на открытом воздухе, для акустических измерений.

В зависимости *от способа преобразования механических колебаний в электрические* микрофоны подразделяются, аналогично Гр, на обратимые: электромагнитные, электродинамические (катушечные и ленточные), конденсаторные (в том числе электретные), пьезоэлектрические – и необратимые (вентильные): угольные и транзисторные.

По диапазону воспринимаемых частот микрофоны делятся на узкополосные (речевые) и широкополосные; *по направленности* – на ненаправленные (круговые), двухсторонне направленные (восьмерочные), односторонне направленные (кардиоидные, супер- и гиперкардиоидные), остронаправленные.

По способности выделить полезный сигнал на фоне шумов (помех) – на микрофоны обычного исполнения и шумозащищенные. В каче-

стве последних, кроме обычных микрофонов в специальном исполнении, применяют электромеханические преобразователи – ларингофоны [6].

По способу воздействия звуковых колебаний на диафрагму микрофоны подразделяются на приемники давления, приемники градиента давления и комбинированные.

3.2. Важнейшие технические характеристики микрофонов

Стандартом 16123-88 "Микрофоны. Методы измерений электроакустических параметров" установлены определения характеристик микрофонов.

Напряжение холостого хода – напряжение на выходе микрофона при сопротивлении нагрузки, влиянием которой можно пренебречь.

Номинальное сопротивление нагрузки – сопротивление R_n , которое должно быть подключено к выходу микрофона при его работе (указано в технической документации на микрофон). За R_n обычно принимают модуль внутреннего сопротивления микрофона на частоте 1000 Гц.

Чувствительность – отношение напряжения холостого хода или напряжения на R_n к звуковому давлению, действующему на микрофон:

$$E = U / p_{зв}, \quad (3.1)$$

Как показано в подразд. 1.4, чувствительность микрофона может быть выражена через его внутренние параметры соотношением (1.38).

В зависимости от условий измерения различают чувствительность по свободному или диффузному звуковому полю.

Уровень чувствительности – чувствительность, выраженная в децибелах, относительно чувствительности, равной 1 В/Па.

Стандартный уровень чувствительности – выраженное в децибелах отношение напряжения, развиваемого на R_n при звуковом давлении $p_{зв} = 1$ Па, к напряжению, соответствующему мощности $P_0 = 1$ мВт:

$$N_{ст} = 20 \lg \left(\frac{U_n}{\sqrt{R_n P_0}} \right), \quad (3.2)$$

где U_n – напряжение на номинальной нагрузке.

Характеристика направленности – зависимость чувствительности микрофона $E(Q)$ в свободном поле, измеренной при приходе звука под углом Q , к осевой чувствительности $E_{ос}$

$$D(Q) = E(Q) / E_{oc} \quad (3.3)$$

Характеристика направленности измеряется либо на одной частоте f , либо в полосе частот со средней частотой f .

Коэффициент направленности в диффузионном поле

$$\Omega_d = E_{oc}^2 / E_{диф}^2 \quad (3.4)$$

и рассчитывается на ряде частот или в полосе частот.

Индексом направленности называется коэффициент направленности, дБ:

$$Q_d = 10 \lg \Omega_d \quad (3.5)$$

Перепад чувствительности "фронт-тыл" – отношение осевой чувствительности микрофона к чувствительности под углом 180° к его оси E_{180}

$$\Delta N = 20 \lg \left(E_{oc} / E_{180} \right) = N_{oc} - N_{180} \quad (3.6)$$

Коэффициент нелинейных искажений – отношение спектральных компонент напряжения на выходе микрофона, отсутствующих в спектре звукового давления, действующего на микрофон, и обусловленных его нелинейностью, к спектральным компонентам напряжения на выходе микрофона, присутствующих в спектре звукового давления.

Динамический диапазон микрофона – диапазон звуковых давлений, воспринимаемых микрофоном, нижний предел которого ограничен уровнем собственного шума микрофона, а верхний предел ограничен нелинейными искажениями, коэффициент которых превышает допустимую величину (оговаривается в технической документации на микрофон).

Неравномерность частотной характеристики чувствительности – выраженное в децибелах отношение максимальной чувствительности к минимальной в номинальном диапазоне частот микрофона.

Уровень собственных шумов – уровень звукового давления относительно давления $2 \cdot 10^{-5}$ Па, вызывающего на выходе микрофона напряжение U_m , равное напряжению, возникающему под действием внешних и внутренних шумов (помех) в случае отсутствия звукового поля:

$$N_{ш} = 20 \lg \left(5 \cdot 10^4 p_{зв.ш} \right), \quad (3.7)$$

где $p_{зв.ш} = U_{ш} / E_{oc}$.

С другими характеристиками и параметрами микрофонов можно ознакомиться в литературе [11, 12].

3.3. Принцип действия микрофонов

Рассмотрим сначала принципы функционирования *вентильных* микрофонов, так как исторически первым получил распространение угольный микрофон, который до сих пор используется в телефонии. Действие этого ЭП основывается на изменении сопротивления между зернами угольного порошка при изменении давления, оказываемого на них.

Принципиально угольный микрофон (рис. 30) работает следующим образом. При воздействии звукового давления на его диафрагму 1 она

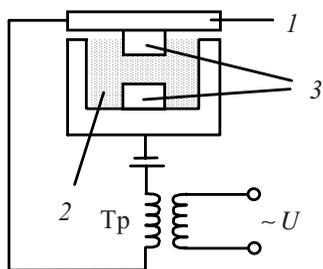


Рис. 30. Угольный микрофон

начинает колебаться, и в такте с ней изменяется сила сжатия зерен угольного порошка 2. С изменением силы сжатия угольного порошка изменяется сопротивление засыпки зерен между электродами 3. При постоянном, приложенном к ним, электрическом напряжении меняется и величина тока через микрофон, следовательно, и возникающее переменное напряжение на вторичной обмотке трансформатора Tr .

Основное преимущество угольного микрофона – высокая чувствительность, позволяющая использовать его без усилителей. Недостатки – большая нестабильность в работе и шум из-за того, что полезный электрический сигнал формируется при изменении контакта между отдельными зернами порошка. Кроме того, – большая неравномерность частотной характеристики и значительные нелинейные искажения, так как сопротивление микрофона в зависимости от звукового давления линейно изменяется лишь в первом приближении. Однако для передачи речи микрофон вполне пригоден.

Действие полупроводниковых (транзисторных) микрофонов основывается на том, что под воздействием звукового давления на диафрагму и скрепленное с ней острие, являющееся одновременно эмиттером транзистора, изменяется сопротивление эмиттерного перехода. Хотя такие микрофоны достаточно чувствительны, в работе они недостаточно стабильны и обладают узкой и неравномерной частотной характеристикой.

Принцип действия обратимых ЭП представлен в подразд. 1.2 и 2.6, поэтому при описании соответствующих микрофонов ограничимся рассмотрением их достоинств, недостатков и областью применения (табл. 4). Последовательность упоминания соответствующих микрофонов характеризует их распространенность.

Таблица 4

Микрофоны

Тип микрофона	Область применения	Достоинства	Недостатки
Электродинамический (капсульный)	Радиовещание, озвучение, звукоусиление, звукозапись	Стабилен, широкий частотный диапазон (ЧД), малое внутреннее сопротивление	Сравнительно большая неравномерность частотной характеристики чувствительности (ЧХЧ)
Электродинамический (ленточный)	Студийный, в музыкальных передачах при использовании инструментов, создающих высокие звуковые давления	Широкий ЧД, малая неравномерность ЧХЧ	Малая чувствительность, необходимость в повышающем трансформаторе. Капризен в работе
Конденсаторный (электростатический)	В трактах высокого качества, в измерительной технике	Термо- и влагостойкий. Очень хорошие электроакустические характеристики. Долговечен	Наличие внешнего постоянного источника. Необходимость в микрофонном усилителе, так как малое нагрузочное сопротивление
Электретный (электростатический)	В трактах высокого качества, в измерительной технике	Термо- и влагостойкий. Очень хорошие электроакустические характеристики. Долговечен. Отсутствие внешнего постоянного источника	Необходимость в микрофонном усилителе, так как малое нагрузочное сопротивление

Тип микрофона	Область применения	Достоинства	Недостатки
Электромагнитный	В трактах передачи речи, в ларингофонах	Стабилен в работе. Надежен	Узкий ЧД, большая неравномерность ЧХЧ, большие нелинейные искажения
Пьезоэлектрический	Малораспространены, но область применения расширяется благодаря появлению новых пленочных покрытий для диафрагм, обладающих пьезоэффектом	Высокочастотен, дешев в изготовлении. Высокая собственная емкость преобразователя	Наличие резонансов в диапазоне преобразования, необходимость демпфирования

Кроме описанной в подразд. 1.2, 2.6 схемы включения конденсаторного ЭП, так называемой низкочастотной, применяют высокочастотную схему. В этом случае микрофон работает в качестве конденсатора в электрическом колебательном контуре ВЧ, изменяя его резонансную частоту с периодом звуковых колебаний, воздействующих на микрофон. Преимущество этой системы, с одной стороны, в отсутствии необходимости поддерживать высокое поляризационное напряжение, с другой стороны, в простоте схемы усиления акустических сигналов с НЧ.

3.4. Приемники давления и градиента давления

Каждый микрофон принципиально состоит из двух систем: акустомеханической и механоэлектрической.

Свойства акустомеханической системы сильно зависят от того, воздействует ли звуковое давление на одну сторону диафрагмы (приемник давления) или на обе стороны (приемник градиента давления). В последнем случае при несимметричном воздействии, когда на вторую сторону диафрагмы воздействуют колебания, прошедшие какое-либо механическое или акустическое сопротивление или систему задержки времени, создается асимметричный приемник (микрофон) градиента давления.

При попадании акустических колебаний на микрофон давления (рис. 31) результирующая сила, действующая на диафрагму площадью S , равна $F = K_d p_{зв} S$, где K_d – коэффициент дифракции. Величина его равна единице на низких частотах, когда размер микрофона D мал по сравнению с длиной волны, и повышается до двух к высоким частотам. На величину коэффициента дифракции влияет форма микрофона, размер, а также его акустическое сопротивление.

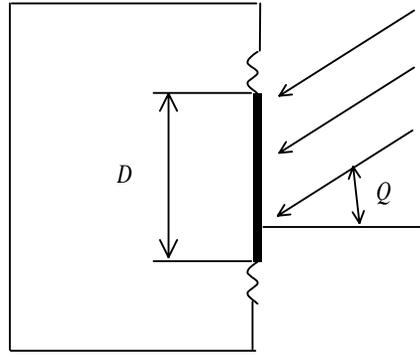


Рис. 31. Схематичное изображение приемника давления

При падении звука на диафрагму под углом Q разные ее точки возбуждаются не в фазе, как это имеет место при осевом падении. Разность фаз в крайних точках диафрагмы

$$\Delta\varphi = kD \sin Q,$$

и суммарная сила, действующая на нее, будет уменьшаться. Микрофон давления приобретает направленные свойства, проиллюстрированные на рис. 32. Таким образом, для приемника давления характерно увеличение чувствительности и обострение ДН с ростом частоты.

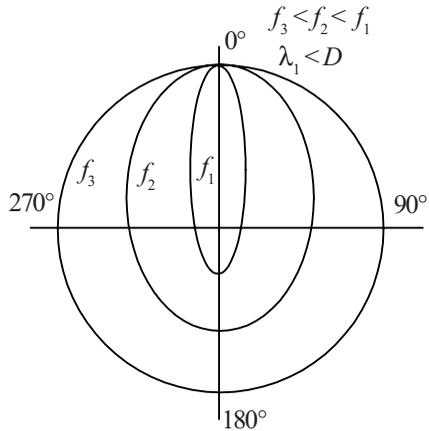


Рис. 32. ДН приемника давления на разных частотах

Если звуковое давление действует симметрично на обе стороны диафрагмы микрофона (приемник градиента давления) так, как это показано на рис. 33, а, то на нее действует разность сил, обусловленная разностью хода звуковых лучей:

$$\Delta r = D \cos Q, \tag{3.8}$$

а следовательно, и разностью фаз: $\Delta\varphi = k\Delta r$.

Сила F , вызывающая колебания диафрагмы, равна разности сил (при гармоническом звуковом колебании)

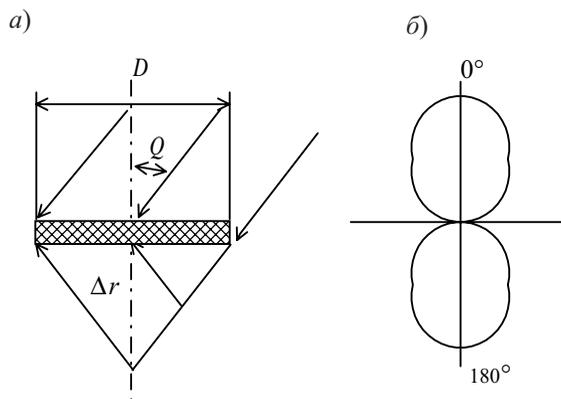


Рис. 33. Схематическое изображение:
a – приемника градиента давления; *б* – его ДН

$$\begin{aligned}
 F &= F_1 - F_2 = p_{зв} S \left[\sin \omega t - \sin (\omega t - \Delta \varphi) \right] = \\
 &= 2 p_{зв} S \sin \left(\frac{\pi D \cos Q}{\lambda} \right) \cos \left(\omega t - \frac{\Delta \varphi}{2} \right).
 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Для диафрагм значительно меньших длины волны

$$\sin \left(\frac{\pi D \cos Q}{\lambda} \right) \approx \frac{\pi D \cos Q}{\lambda},$$

и можно записать, что

$$F = p_{зв} S \frac{2\pi D}{\lambda} \cos Q \cos \left(\omega t - \frac{\Delta \varphi}{2} \right) = F_m \cos \left(\omega t - \frac{\Delta \varphi}{2} \right), \quad (3.10)$$

где $F_m = p_{зв} S \frac{D}{C_{зв}} \omega \cos Q$ – амплитуда действующей силы. Из выражения (3.10) следует, что F_m пропорциональна частоте колебаний и косинусу угла между осью микрофона и направлением прихода звука. На низких частотах эта зависимость линейна, на высоких – приблизительно синусоидальна. Кроме того, на высоких частотах, где размеры микрофона становятся сравнимыми с длиной волны, начинают сказываться частотно-зависимые явления дифракции.

Характеристика направленности таких микрофонов (рис. 33, *б*) имеет вид "восьмерки" (график синусоиды в полярных координатах). Следует заметить, что приведенные выводы справедливы только для дальней зоны, т. е. когда микрофон находится в поле плоской волны [6].

3.5. Комбинированные микрофоны

Комбинированными называют микрофоны, состоящие из двух или большего числа стандартных микрофонов, имеющих общий выход. Как известно, приемник давления на низких частотах имеет сферическую характеристику направленности, а приемник градиента давления – косинусоидальную (дипольную, восьмерочную). Чувствительность первого микрофона E_1 не зависит от угла падения звуковой волны, а второго – зависит от $E_2 \cos Q$. Соединяя эти микрофоны последовательно, получаем приемник звука с чувствительностью

$$E_Q = E_1 + E_2 \cos Q$$

и осевой чувствительностью

$$E_{oc} = E_1 + E_2.$$

Чувствительность комбинированного приемника можно записать как

$$E_Q = E_{oc}(1 - \gamma + \gamma \cos Q), \quad (3.11)$$

а характеристику направленности

$$D(Q) = \frac{E_Q}{E_{oc}} = 1 - \gamma + \gamma \cos Q, \quad (3.12)$$

где $\gamma = \frac{E_2}{E_{oc}}$ – параметр, характеризующий долю участия второго микрофона в осевой чувствительности комбинированного. Меняя этот параметр, можно получить различные характеристики направленности (рис. 34):

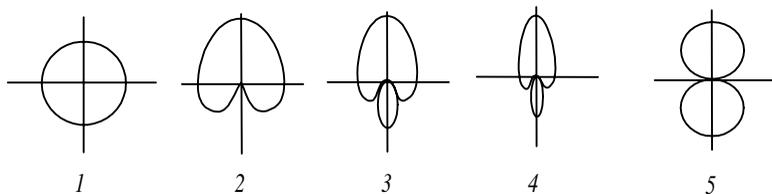


Рис. 34. Характеристики направленности комбинированного приемника

- 1) при $\gamma = 0$ – окружность (нет приемника градиента давления);
- 2) при $\gamma = 0,5$, что соответствует равенству $E_1 = E_2$ – кардиоида $D(Q) = 0,5(1 + \cos Q)$;

- 3) при $\gamma = 0,63$ – суперкардиоида;
- 4) при $\gamma = 0,75$ – гиперкардиоида;
- 5) при $\gamma = 1$ – восьмерка (нет приемника давления).

Соединение микрофонов в комбинированный микрофон можно осуществить электрически или акустически.

Электрическое сложение выходных напряжений базовых микрофонов (синфазное или противофазное) осуществляется либо непосредственно, либо с применением электрических фазосдвигающих цепей и регуляторов. Для примера на рис. 35 изображен двухмембранный конденса-

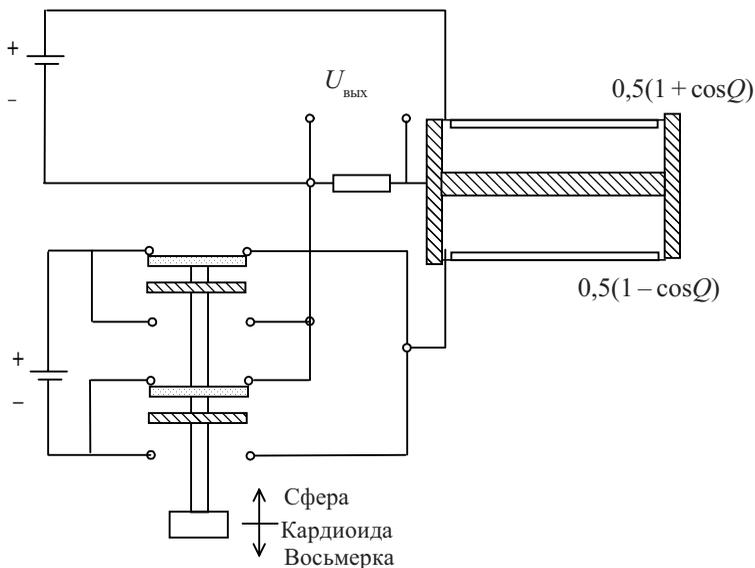


Рис. 35. Двухмембранный конденсаторный микрофон

торный микрофон с электрически изменяемой характеристикой. У двух одинаковых кардиоидных микрофонов, акустические оси которых направлены противоположно, характеристики направленности могут быть представлены как

$$D_1(Q) = 0,5(1 + \cos Q),$$

$$D_2(Q) = 0,5(1 - \cos Q).$$

Электрические сигналы обоих микрофонов складываются. Если напряжение на диафрагмах имеет одинаковую полярность, то две карди-

оиды, суммируясь, дают сферическую характеристику. При снятии поляризационного напряжения с одного из микрофонов у второго остается кардиоидная характеристика. Если же напряжения у диафрагм имеют различную полярность, то сигналы обоих микрофонов сдвинуты по фазе на 180° , т. е. одна кардиоидная характеристика будет вычитаться из другой, что дает восьмерочную характеристику.

Таким образом, с помощью переключателя, расположенного даже дистанционно, можно получать различные характеристики направленности комбинированного микрофона.

Комбинированный приемник можно получить не только электрическим способом, но и *акустическим*. В акустической системе действующая на диафрагму сила может быть разложена на две компоненты, одна из которых не зависит от угла Q , а другая – пропорциональна $\cos Q$ [2].

Принцип действия микрофона с односторонней направленностью и акустическим сложением заключается в том, что он имеет два пространственно разнесенных входа для воздействия звукового давления с расстоянием между ними, равным d . Сдвиг фазы давления внутри микрофона делается равным сдвигу фазы φ_1 звукового давления на пути от первого входа (p_1 – у диафрагмы) до второго (p_2 – у входа в микрофон, рис. 36, а).

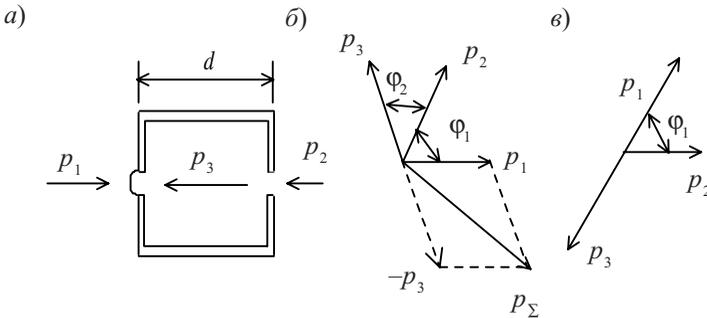


Рис. 36. Векторные диаграммы звуковых давлений, воздействующих на кардиоидный микрофон

Внутри микрофона звуковое давление p_2 претерпевает такой же сдвиг фазы на угол φ_2 , и на обратную сторону диафрагмы действует давление p_3 . Результирующее давление p_Σ приводит диафрагму в движение (рис. 36, б).

Если звук приходит со стороны второго входа, то давления p_1 и p_3 будут одинаково сдвинуты по фазе относительно звукового давления p_2 и их разность будет равна нулю (рис. 36, в). Такое акустическое комбинирование эффективно в ограниченном диапазоне частот, поэтому в реальных конструкциях делают несколько "вторых" входов, каждый для своей области частот, так, чтобы расстояние d уменьшалось с повышением частоты.

3.6. Специализированные микрофоны

Серьезной задачей, решение которой имеет важное практическое значение, является выделение полезного сигнала на фоне шумов (помех). Шумозащищенность микрофонов достигается разными способами, в том числе использованием специализированных микрофонов.

Одними из них являются микрофоны, отличающиеся высокой пространственной избирательностью, называемые *однонаправленными*. Существуют несколько вариантов получения остронаправленной характеристики приема, одним из которых является использование линейной группы микрофонов (см. рис. 26, б). В этом случае характеристика направленности микрофонов $D_{л.г.}(Q)$ определяется с учетом выражения (2.49) как

$$D_{л.г.}(Q) = D(Q)R_{г.}(Q), \quad (3.13)$$

где $D(Q)$ – характеристика направленности одного микрофона, описываемая равенством (3.3), а $R_{г.}(Q)$ – множитель решетки, имеющий вид (2.48). Из (3.13) очевидно, что чем меньше отношение длины волны к длине линейной группы микрофонов, тем уже основной лепесток характеристики направленности.

Специализированными микрофонами, использующими остронаправленные характеристики направленности, являются трубчатые микрофоны (рис. 37).

Однонаправленные микрофоны обычно состоят из микрофона 1, к которому примыкает трубка с отверстиями по длине (рис. 37, а) или пучок трубок нарастающей длины (рис. 37, б), соединенной с предкапсюльным объемом 4. Если звук приходит по оси, то пути его распространения по трубе 2 (трубкам) и через отверстия одинаковы, а составляющие звукового давления синфазны. Следовательно, сумма их, воздействующая на диафрагму, максимальна. Звуковые волны, приходящие под углом к оси, оказываются сдвинутыми по фазе из-за разности путей, которые они проходят. Если разность длин ближайших по размеру тру-

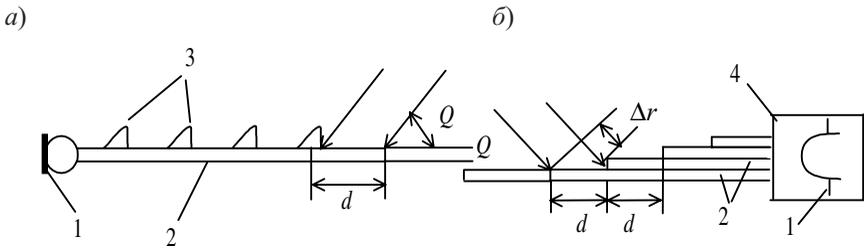


Рис. 37. Схематическое изображение трубчатых микрофонов

бок или расстояние между отверстиями равно d , то минимальная разность хода будет $\Delta r = d(1 - \cos Q)$. Следовательно, сдвиг фаз между этими волнами

$$\Delta\varphi = kd(1 - \cos Q) = \frac{4\pi d}{\lambda} \sin^2 \frac{Q}{2}.$$

Поскольку $\Delta\varphi$ растет с частотой, то ширина главного лепестка характеристики направленности уменьшается с увеличением частоты. Для достижения направленности на низких частотах общая длина акустической системы бывает порядка 0,8–1,2 м.

Иногда для компенсации падения чувствительности микрофона на высших частотах из-за большого поглощения их в трубке (см. рис. 37, а) вокруг каждого из отверстий устанавливают концентраторы-рупорки 3. Размеры их подбирают так, чтобы обеспечить подъем частотной характеристики на высших частотах диапазона до 10–12 дБ.

Наиболее трудной задачей обычно является обеспечение шумозащищенности микрофонов, работающих в условиях близко расположенных источников помех с широким частотным спектром, создающих у микрофонов высокий уровень шумов. Здесь эффективным является использование микрофонов, размещенных как можно ближе к источнику полезного сигнала (например, ко рту при приеме речи).

Радиомикрофон получил довольно большое распространение в практике звукоусиления. Его преимущество перед обычным микрофоном заключается в том, что он постоянно находится рядом с источником звука, перемещаясь совместно с ним. Кроме того, при работе исполнитель (оратор, певец) не связан при своем перемещении с микрофонным кабелем, так как радиомикрофон снабжен миниатюрным радиопередатчиком, работающим на находящийся поблизости радиоприемник, выходное напряжение которого уже используется обычным образом.

Так, например, серийный радиомикрофон включает конденсаторный электрретный микрофон МКЭ-19 и снабжен радиопередатчиком, имеющим выходную мощность не менее 10 мВт (рабочая дальность в свободном пространстве не менее 50 м при отношении сигнал/шум на выходе приемника не менее 40 дБ) и работающим на частоте 160 МГц.

Выпускаемые ранее радиомикрофоны диапазона 160–170 МГц потребностей радиовещания и телевидения не удовлетворяли. В связи с этим в технику радиообслуживания, радио- и телевизионного вещания внедряются радиомикрофоны диапазона 470–950 МГц.

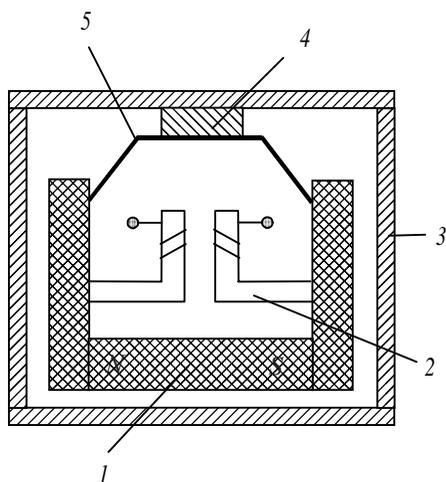


Рис. 38. Электромагнитный микрофон:
1 – постоянный магнит; 2 – полюсные наконечники с надетыми катушками;
3 – корпус; 4 – якорь; 5 – диафрагма

Для приема речи в условиях окружающего шума применяются ларингофоны. Эти микрофоны воспринимают непосредственно механические колебания гортани, возникающие при речеобразовании. Для этого ларингофоны (обычно пара) прижимаются к горлу в области гортани с двух сторон. Электрически при этом они соединены последовательно. Раньше применялись угольные, теперь электромагнитные ларингофоны, конструкция одного из которых представлена на рис. 38. При разговоре колебания от мышц гортани передаются корпусу. Благодаря инерции маг-

нитной системы она начинает перемещаться относительно якоря, что изменяет магнитный поток, пронизывающий катушки, из-за чего на зажимах последней развивается напряжение звуковой частоты. Диапазон рабочих частот ларингофона ЛЭМ-3 составляет от 1 до 3 кГц.

Заключение

В пособии рассмотрены основы теории ЭП: физические принципы преобразования звуковых волн в электрические колебания, основные соотношения электромеханической взаимности, эквивалентные схемы преобразователей-генераторов и преобразователей-двигателей. Кратко рассмотрен метод электромеханических и электроакустических аналогий, позволяющий представить сложную электро-механо-акустическую систему в виде эквивалентной, в частности электрической, схемы.

Основное внимание уделено вопросам анализа работы, принципам функционирования, важнейшим параметрам и характеристикам микрофонов, телефонов, громкоговорителей и акустических систем.

Несмотря на значительный объем представленного материала, охватывающего существенную часть курса, его нельзя считать исчерпывающим. Многие вопросы, связанные с конструктивными и технологическими аспектами разработки ЭП, условиями их эксплуатации, требуют дополнительного углубленного изучения с помощью литературы.

Вопросы, связанные с методиками измерения параметров и характеристик ЭП, также не нашли должного освещения в предлагаемом пособии, а вынесены на самостоятельное изучение при выполнении, оформлении и защите лабораторных работ по данной тематике [10–12].

За рамками данного пособия остались вопросы, связанные с теорией и практикой создания электроакустических преобразователей, преобразующих звуковые волны в электрические колебания не из воздушной среды. Информацию о виброприемниках, предназначенных для измерения звуковой вибрации, и гидрофонах, осуществляющих извлечение и измерение звука в воде, можно найти в многочисленной специальной литературе.

Библиографический список

1. Радиовещание и электроакустика: Учеб. пособие для вузов / *С. И. Алябьев, А. В. Выходец, Р. Гермер и др.*; Под ред. *Ю. А. Ковалгина*. М.: Радио и связь, 2000. 792 с.
2. Радиовещание и электроакустика: Учебник для вузов / *А. В. Выходец, М. В. Гитлиц, Ю. А. Ковалгин и др.*; Под ред. *М. В. Гитлица*. М.: Радио и связь, 1989. 472 с.
3. Акустика: Справочник / *А. П. Ефимов, А. В. Никонов, М. А. Сапожков, В. И. Шоров*; Под ред. *М. А. Сапожкова*. М.: Радио и связь, 1989. 336 с.
4. *Алдошина И. А., Войтвило А. Г.* Высококачественные акустические системы и излучатели. М.: Радио и связь, 1985. 168 с.
5. Звуковое вещание / *А. В. Выходец, П. М. Жмурин, И. Ф. Зорин и др.*; Под ред. *Ю. А. Ковалгина*. М.: Радио и связь, 1993. 464 с.
6. *Иофе В. К., Корольков В. Г., Сапожков М. А.*: Справочник по акустике / Под ред. *М. А. Сапожкова*. М.: Связь, 1979. 312 с.
7. Справочник по технической акустике: Пер. с нем. / Под ред. *М. Хекла и Х. А. Мюллера*. Л.: Судостроение, 1980. 440 с.
8. *Урбанский Б.* Электроакустика в вопросах и ответах: Пер. с польск. / Под ред. *М. А. Сапожкова*. М.: Радио и связь, 1981. 248 с.
9. *Лепендин Л. Ф.* Акустика: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1978. 448 с.
10. ГОСТ 16122-87. Громкоговорители. Методы измерений электроакустических параметров. М.: Изд-во стандартов, 1988. 91 с.
11. ГОСТ 16123-88. Микрофоны. Методы измерений электроакустических параметров. М.: Изд-во стандартов, 1989. 63 с.
12. *Сидоров И. Н., Димитров А. А.* Микрофоны и телефоны: Справочник. М.: Радио и связь, 1993. 326 с.

Оглавление

Предисловие	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	5
1.1. Основные соотношения электроакустического преобразователя ..	5
1.2. Физические принципы преобразования	7
1.3. Соотношение электромеханической взаимности	12
1.4. Эквивалентные схемы преобразователей	14
1.5. Метод электромеханических аналогий	16
1.6. Электроакустические аналогии	19
2. ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ, АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕЛЕФОНЫ	22
2.1. Основные определения, классификация, область применения	22
2.2. Важнейшие параметры громкоговорителей и телефонов	24
2.3. Основные соотношения при анализе работы преобразователя- излучателя	27
2.4. Описание работы электродинамического громкоговорителя	29
2.5. Модуль полного входного электрического сопротивления электродинамического громкоговорителя	33
2.6. Не электродинамические громкоговорители	37
2.7. Акустическое оформление громкоговорителей	40
2.8. Рупорные системы	46
2.9. Акустические системы	48
2.10. Пространственные характеристики акустических систем	52
2.11. Основные виды искажений в акустических системах	55
2.12. Телефоны	59
3. МИКРОФОНЫ	63
3.1. Основные определения, классификация и области применения	63
3.2. Важнейшие технические характеристики микрофонов	64
3.3. Принцип действия микрофонов	66
3.4. Приемники давления и градиента давления	68
3.5. Комбинированные микрофоны	71
3.6. Специализированные микрофоны	74
Заключение	77
Библиографический список	78

Учебное издание

Петров Павел Николаевич

АКУСТИКА
ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Учебное пособие

Редактор *А. Г. Ларионова*
Компьютерная верстка *Н. С. Степановой*

Сдано в набор 10.12.02. Подписано к печати 14.02.03. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,4. Усл. кр.-отг. 4,5. Уч.-изд. л. 4,7. Тираж 100 экз. Заказ №

Редакционно-издательский отдел
Отдел электронных публикаций и библиографии библиотеки
Отдел оперативной полиграфии библиотеки
СПбГУАП
190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67