

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

Е. Г. Зайцева
В. А. Бурак

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАПИСИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ АУДИОИНФОРМАЦИИ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-38 01 01 «Механические
и электромеханические приборы и аппараты» специализации
1-38 01 01 05 «Бытовые машины, приборы и аппаратура»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области приборостроения*

Минск
БНТУ
2023

УДК 681.84.081
ББК 32.871
3-17

Р е ц е н з е н т ы:

зам. декана факультета компьютерного проектирования
УО «Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники», канд. техн. наук, доцент *П. В. Камлач*;
кафедра электронной техники и технологии УО «Белорусский
государственный университет информатики и радиоэлектроники»
(зав. кафедрой, канд. техн. наук, доцент *С. И. Мадвейко*)

Зайцева, Е. Г.

3-17 Устройство для записи и воспроизведения аудиоинформации :
учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-38 01 01
«Механические и электромеханические приборы и аппараты» спе-
циализации 1-38 01 01 05 «Бытовые машины, приборы и аппарату-
ра» / Е. Г. Зайцева, В. А. Бурак. – Минск : БНТУ, 2023. – 93 с.
ISBN 978-985-583-886-0.

Учебно-методическое пособие предназначено для изучения дисциплины «При-
боры и системы записи и воспроизведения аудио- и видеоинформации» студентами
специальности 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппара-
ты» специализации 1-38 01 01 05 «Бытовые машины, приборы и аппаратура». Посо-
бие состоит из трех разделов – «Микрофоны», «Акустические системы (громкогово-
рители)», «Стереотелефоны», – где описываются физические принципы действия,
нормируемые характеристики.

Учебное пособие также может быть полезно студентам других специальностей,
изучающим запись и воспроизведение аудиосигналов.

УДК 681.84.081
ББК 32.871

ISBN 978-985-583-886-0

© Зайцева Е. Г., Бурак В. А., 2023
© Белорусский национальный
технический университет, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Устройства для записи и воспроизведения аудиоинформации широко используются в научных, технических и учебных целях, а также в культурно-информационной области. Каждая область применения этих устройств предъявляет специфические требования к микрофонам, акустическим системам, стереотелефонам. Чтобы оптимизировать системы записи и воспроизведения звуковой информации для решения конкретных задач, необходимо иметь представление о физических принципах функционирования устройств и об их технических характеристиках. Необходимая для решения данных задач информация содержится в данном учебно-методическом пособии.

1. МИКРОФОНЫ

1.1. Классификация микрофонов

Первым звеном любой звукозаписывающей системы является микрофон – преобразователь акустических колебаний в воздушной среде в электрические колебания (ГОСТ Р 53576-2009, МЭК 60268-4:2004).

Согласно приведенному стандарту, в состав микрофона входят: чувствительный элемент, согласующий элемент, электрические соединители, усилители и блоки питания, если они являются неотъемлемыми частями микрофона и указаны в технической документации на микрофон.

Все применяемые в практике звукозаписи микрофоны можно классифицировать по принципам преобразования энергии, видам характеристик направленности, областям применения и конструктивным особенностям [1].

Возможны следующие принципы **преобразования акустической энергии в электрическую**: электродинамический, конденсаторный, со сжатием угольного порошка, пьезоэлектрический, оптический.

Исторически первым широко используемым в практике микрофоном был *угольный* [2], запатентованный в 1886 году Т. Эдисоном (рис. 1.1). Он представлял собой чашку с угольными гранулами и расположенной сверху металлической диафрагмой.

Основные элементы и эквивалентная схема этого микрофона схематично представлены на рис. 1.2. Через гранулы за счет подачи напряжения между электродами проходит слабый постоянный ток. Когда диафрагма колеблется под действием падающей звуковой волны, гранулы сжимаются, площадь контактов между ними увеличивается, электрическое сопротивление гранул падает, а ток растет. В результате изменения сопротивления под действием звукового сигнала на выходе трансформатора появлялся переменный ток, который усиливался и подавался в цепь передачи сигнала.

В *электродинамическом* микрофоне звуковая волна воздействует на легкую диафрагму. Ее колебания приводят в движение связанный с ней проводник, помещенный в постоянное магнитное поле. Возникший в цепи движущегося проводника электрический ток усиливается и передается в цепи связи. Конструкция проводника

(катушка на цилиндрическом каркасе, металлическая лента и т. д.) определяет тип электродинамического микрофона.



Рис. 1.1. Угольный микрофон [2]

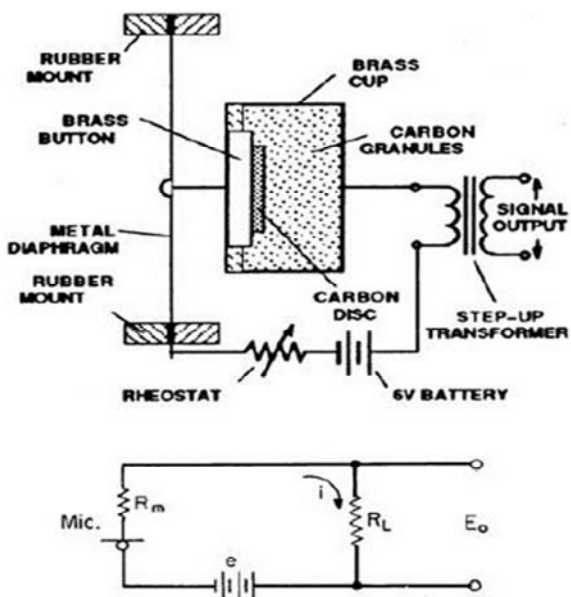


Рис. 1.2. Основные элементы и эквивалентная схема угольного микрофона [2]

Основные элементы электродинамического катушечного микрофона схематически показаны на рис. 1.3.

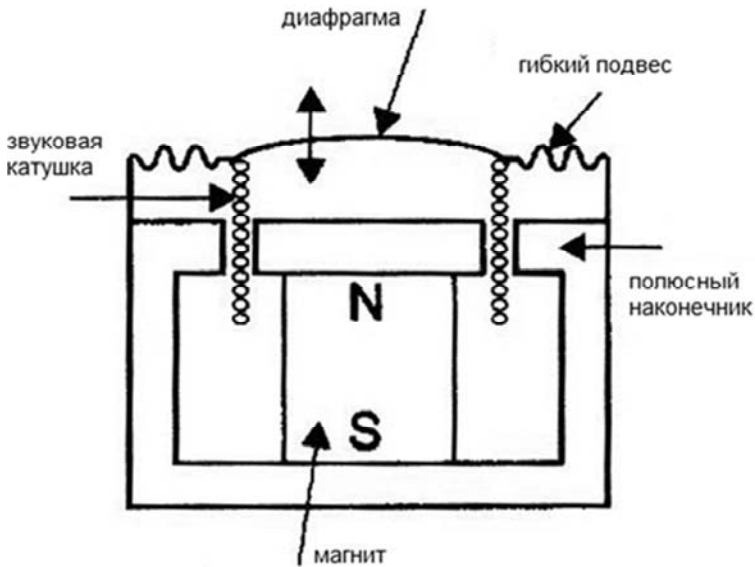


Рис. 1.3. Основные элементы электродинамического катушечного микрофона [1]

Этот тип микрофона является ненаправленным (приемник давления), т. е. его чувствительность не зависит от угла падения звуковой волны. В них звуковая волна действует только на внешнюю сторону диафрагмы. В настоящее время преимущественное распространение получили направленные микрофоны (приемники градиента давления), где обеспечен доступ звуковой волны и к тыльной поверхности диафрагмы через боковые отверстия. На рис. 1.4 представлена схема воздействия давления от звуковой волны на приемник давления (а) и приемник градиента давления (б).

Конструкция электродинамического катушечного микрофона показана на рис. 1.5.

К диафрагме, которая состоит из сферического купола 1 и гофрированного подвеса 2, приклеена звуковая катушка 3, состоящая из каркаса с намотанным на него в два слоя проводником. Магнитная цепь включает в себя постоянный магнит 4 и магнитопровод

в виде стакана 5, фланца 6 и полюсного наконечника 7. Гофрированный подвес диафрагмы через прокладку присоединен к верхнему фланцу таким образом, чтобы катушка разместилась в середине зазора 8. Поскольку магнит намагничен вдоль оси, магнитные силовые линии пересекают зазор, поэтому, когда при движении диафрагмы под действием звукового давления катушка начинает колебаться, пересекая при этом магнитные силовые линии, в ней индуцируется ток, связанный со значением звукового давления на диафрагму.

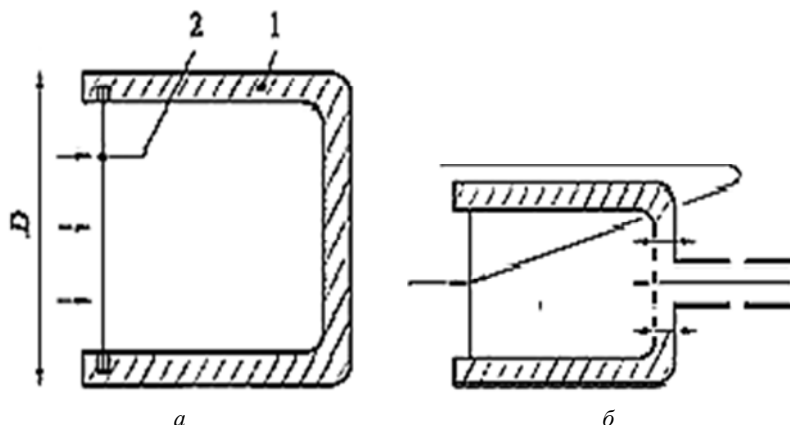


Рис. 1.4. Схема воздействия давления от звуковой волны на приемник давления (а) и приемник градиента давления (б):
1 – корпус; 2 – мембрана [3]

При колебаниях диафрагмы в полостях между ней, полюсным наконечником и верхним фланцем возникает избыточное звуковое давление и воздух начинает через зазор выходить в полость 9, а затем через отверстия в дне стакана 10 в полость 11. Отверстия эти обычно закрыты тканью 12, что дает возможность регулировать сопротивление звуковому потоку. Сверху над диафрагмой обычно устанавливается накладка 13, форма которой в центральной части повторяет сферическую форму диафрагмы. Она имеет широкие окна, то есть акустически прозрачна. Между диафрагмой и накладкой имеется узкая полость 14, которая также оказывает свое влияние на демпфирование колебаний диафрагмы.

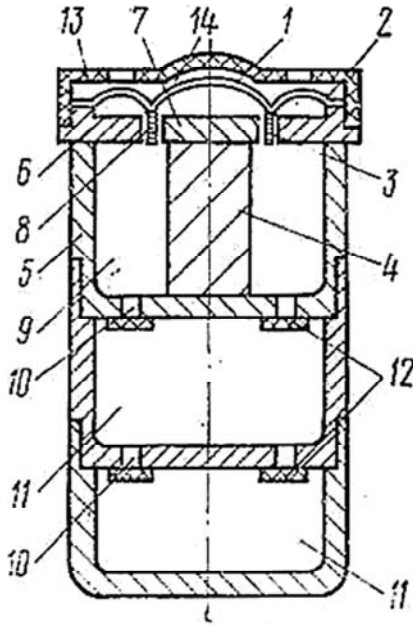


Рис. 1.5. Конструкция электродинамического катушечного микрофона:
 1 – сферический купол; 2 – гофрированный подвес; 3 – звуковая катушка;
 4 – магнит; 5 – стакан; 6 – фланец; 7 – полюсный наконечник;
 8 – воздушный зазор; 9, 11 – полости; 10 – отверстия в дне стакана;
 12 – ткань; 13 – накладка; 14 – шель [1]

Соотношение между звуковым давлением p , действующим на диафрагму, индукцией B в зазоре, площадью S диафрагмы, длиной L проводника звуковой катушки и током I в ней имеет вид:

$$p = \frac{BLI}{S}.$$

Диафрагма с подвесом обычно изготавливаются методом горячего прессования из прочной и легкой пленки толщиной около 20 мкм, например, из майлара, обладающего высокой устойчивостью к вибрациям и температуре (от -40 до $+77$ °C). Жесткость пленки позволяет сохранять поршневой режим колебания диафрагмы в достаточно широком диапазоне частот.

В качестве магнита используются магнитотвердые сплавы с высокой остаточной индукцией, например неодим. Стакан и фланец изготавливаются из магнитомягких материалов (малоуглеродистой стали или пермаллоя). Диаметр стакана 20–40 мм, что определяет общий размер капсюля. Капсюль вместе с амортизаторами, предохраняющими его от ударов и тряски, закрепляется в корпусе микрофона.

Чтобы чувствительность микрофона не зависела от частоты, необходимо сохранять сопротивление микрофона постоянным в широком диапазоне частот. С этой целью в конструкции динамических микрофонов и используются последовательности воздушных полостей со специально подобранными значениями массы и гибкости воздушного объема и активного сопротивления потерь за счет трения в щелях. Это сопротивление регулируется выбором размеров щелей и параметров ткани, которая закрывает щели.

Эквивалентная схема динамического микрофона (приемника давления) показана на рис. 1.6.

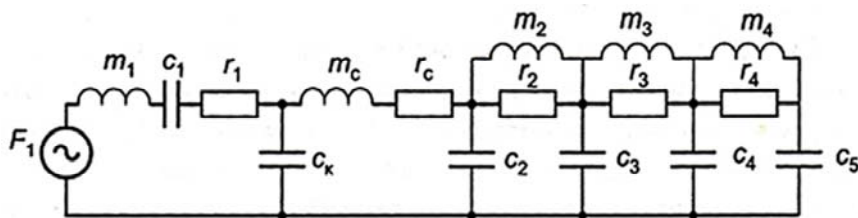


Рис. 1.6. Эквивалентная схема динамического микрофона (приемника давления):

m_1, c_1, r_1 – масса, гибкость и сопротивление подвижной системы;

m_i, c_i, r_i – масса, гибкость и сопротивление воздуха в полостях за диафрагмой

Динамические микрофоны имеют большой динамический диапазон, устойчивость к механическим, климатическим нагрузкам и ветровым помехам, низкий уровень шумов, большую надежность и т. д., поэтому они используются в системах звукоусиления, в конференц-системах, в радиовещании, в репортажах с места событий, речевых студиях [1].

К недостаткам следует отнести пониженную чувствительность, неравномерность амплитудно-частотной характеристики, повышенный уровень переходных искажений по сравнению с конденсаторными микрофонами.

Основные элементы электродинамического ленточного микрофона показаны на рис. 1.7.

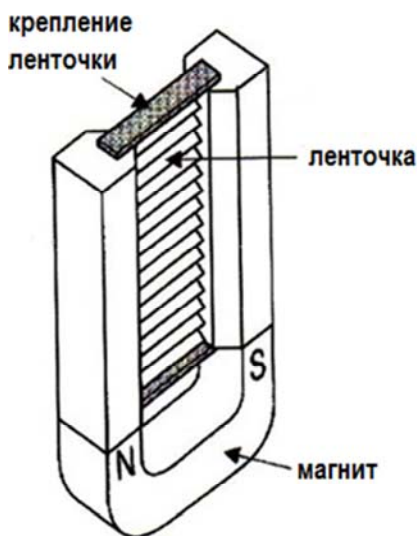


Рис. 1.7. Основные элементы электродинамического ленточного микрофона [1]

Между полюсами магнита параллельно силовым линиям располагается гофрированная металлическая ленточка. Под действием звукового давления она начинает колебаться, пересекая силовые магнитные линии, и возбуждает ток индукции в присоединенной электрической цепи. Материал ленточки – в основном алюминиевая фольга толщиной 2–4 мкм, шириной 1,5–2 мм, длиной 20–40 мм. Она имеет низкое сопротивление (0,2–0,5 Ом). Длина ленточки намного меньше длины проволоки звуковой катушки в динамическом микрофоне, а ширина – больше диаметра провода, поэтому напряжение на ее концах низкое (10–50 мкВ/Па). Применение ленточной мембраны требует использования в корпусе микрофона повышающего трансформатора для предотвращения влияния помех в кабеле. Наличие трансформатора повышает чувствительность до 1–2 мВ/Па и сопротивление до 200–300 Ом.

Эквивалентная схема ленточного микрофона представлена на рис. 1.8.

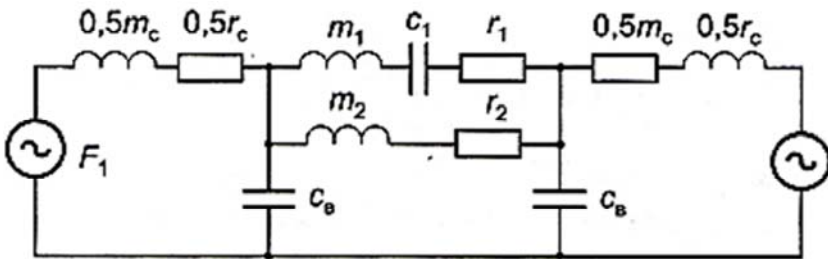


Рис. 1.8. Эквивалентная схема ленточного динамического микрофона (приемника давления):
 m_1, c_1 – эквивалентная масса и гибкость ленточки;
 r_1 – активное сопротивление ленточки;
 m_2, r_2 – масса и сопротивление трения воздуха в зазорах между ленточкой и полюсными наконечниками;
 m_c и r_c – присоединенная масса воздуха и сопротивление излучения;
 $c_в$ – гибкость воздуха в полостях перед и за ленточкой [1]

Ленточные микрофоны имеют малый уровень переходных искажений из-за малой инерционности легкой ленточки [1]. Они чувствительны к механическим воздействиям при транспортировке, к климатическим и механическим воздействиям. Наличие магнита и трансформатора обуславливает большие габариты и высокую стоимость.

Основные элементы *конденсаторного* микрофона схематично показаны на рис. 1.9. Капсюль микрофона состоит из конденсатора, одна пластина которого – неподвижный массивный электрод, вторая – тонкая натянутая мембрана из металлизированной с внешней стороны высокополимерной пленки. Поляризующее напряжение (около 48 В) подается на этот конденсатор через резистор с высоким сопротивлением, что обеспечивает постоянный заряд на обкладках. Под действием звукового давления мембрана начинает колебаться, изменяя расстояние между пластинами и, соответственно, емкость конденсатора.

Переменная составляющая напряжения u пропорциональна смещению x диафрагмы, поляризующему напряжению U_0 и обратно пропорциональна расстоянию d между обкладками:

$$u = \frac{xU_0}{d}.$$

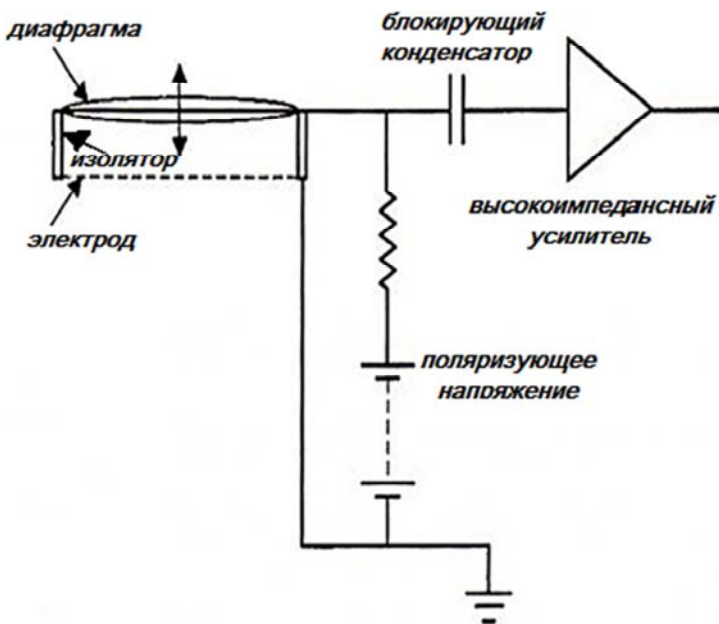


Рис. 1.9. Основные элементы конденсаторного микрофона [1]

Переменное напряжение, обусловленное колебаниями мембраны, через конденсатор, блокирующий от проникновения постоянного поляризующего напряжения, подается на предусилитель, расположенный в корпусе микрофона. Он преобразует высокое емкостное сопротивление капсуля в низкое, чтобы согласовать его с входным сопротивлением последующего микрофонного усилителя.

Кроме представленной на рис. 1.9 низкочастотной схемы, используют высокочастотную. В этом случае микрофонный конденсатор включается в цепь с высокочастотным генератором. Высокая частота модулируется низкочастотной звуковой, затем производится детектирование, т. е. выделение полезной низкочастотной составляющей. Может использоваться фазовая, частотная и амплитудная модуляция. Для схем с модуляцией необходима стабильность частоты генератора и емкости при отсутствии звукового сигнала. Эти величины могут варьироваться при изменении климатических условий. Высокочастотные схемы менее распространены в конденсаторных микрофонах, чем низкочастотные.

На рис 1.10 показана конструкция капсюля конденсаторного микрофона (приемника давления).

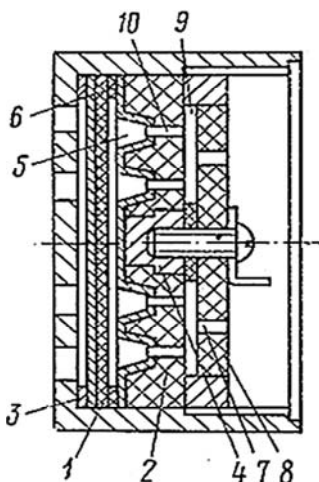


Рис. 1.10. Конструкция капсюля конденсаторного микрофона (приемника давления):

- 1 – мембрана; 2 – неподвижный электрод (НЭ); 3 – кольцо;
 4 – втулка; 5 – углубление в НЭ; 6 – изоляционное кольцо;
 7 – отверстия; 8 – шайба; 9 – щель; 10 – отверстия в дне НЭ [1]

Капсюль содержит мембрану 1 – натянутую полимерную пленку с внешним металлическим слоем (он нанесен вакуумным напылением). Мембрана соединена с металлическим кольцом посредством электропроводящего клея. Неподвижный электрод 2, являющийся второй обкладкой, представляет собой пластину из металла или металлизированного композиционного диэлектрика. Изоляционные прокладки между мембраной и неподвижным электродом образуют воздушный зазор 5 толщиной около 20–40 мкм. Корпус и неподвижный электрод разделены изолятором. Отверстия 7 в электроде определяют общую гибкость системы. Для создания дополнительной массы и трения, обеспечивающих требуемую форму характеристики направленности, используется шайба с отверстиями 8 и образующая щель 9. Втулка и планка позволяют снять механическое напряжение. Сетка над мембраной предназначена для защиты от электростатических помех и механических повреждений.

Корпус, содержащий капсуль, дополнительно содержит предусилитель, элементы крепления, амортизаторы и прочие элементы.

Так как конденсаторный микрофон нуждается в высоковольтном источнике питания для зарядки капсуля и для предусилителя, постоянное напряжение к микрофону подается по тому же двухканальному кабелю, по которому с микрофона снимается переменное напряжение. Такая подача питания называется «фантомной». Схема подачи «фантомного» питания на конденсаторный микрофон представлена на рис. 1.11.

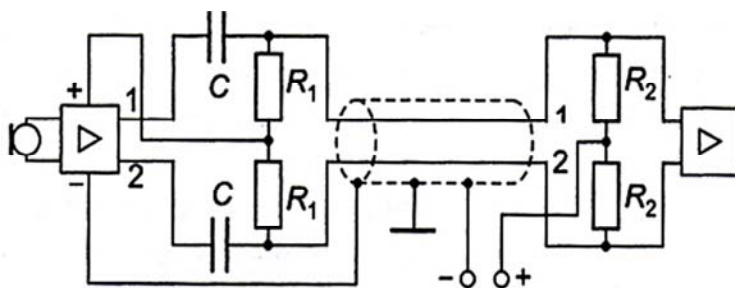


Рис. 1.11. Схема подачи «фантомного» питания на конденсаторный микрофон [1]

Электретные конденсаторные микрофоны способны длительное время сохранять электрический заряд. Его отличие от предыдущего варианта заключается в том, что в качестве одной из обкладок используется тонкая диэлектрическая пленка, сохраняющая заряд. Мембрана и неподвижный электрод металлизуются с наружных сторон. На электризованной пленке заряд сохраняется, поэтому не требуется постоянное напряжение поляризации. Небольшое напряжение питания предусилителя (несколько вольт) обусловило возможность миниатюризации предусилителей и использования малогабаритных источников питания, размещенных внутри корпуса микрофона. Это сделало возможным уменьшение размеров микрофона, упростило производство и условия эксплуатации. Толщина зазора между пленкой и электродом также уменьшена. Так как заряды находятся в связанной форме, не происходит перетекания зарядов к центру при движении мембраны, и потому не происходит «залипания» мембраны к электроду. Вследствие этого увеличивается чувствительность.

Существует вариант электретных микрофонов с массивным электретом. У них электретная пленка нанесена на неподвижный электрод, а мембрана состоит из тонкой полимерной пленки, как у обычного конденсаторного микрофона. Это позволяет уменьшить толщину мембраны и соответственно увеличить чувствительность микрофона, сохранив малые габариты.

Эквивалентная схема конденсаторного ненаправленного микрофона (приемника давления) показана на рис. 1.12.

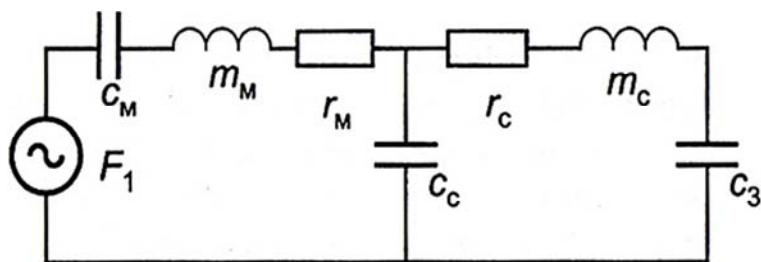


Рис. 1.12. Эквивалентная схема конденсаторного ненаправленного микрофона (приемника давления) [1]

Основные преимущества электретных микрофонов: низкий уровень переходных искажений вследствие малой массы диафрагмы, широкие частотный и динамический диапазоны, высокая чувствительность, малая чувствительность к магнитным помехам.

Среди недостатков можно назвать меньшую устойчивость к механической вибрации, климатическим изменениям, более высокий уровень шумов по отношению к динамическим микрофонам.

В *оптических* микрофонах происходит отражение лазерного луча от мембраны (рис. 1.13).

Луч, направленный по оптоволокну к мембране, освещает ее. Отраженный от мембраны луч изменяет свое направление при ее колебании. Соответственно, с торцом второго оптоволокну совмещается часть отраженного светового пучка, который затем направляется на фотодиод. В нем сигнал преобразуется в переменный ток. В данном случае мембрана может быть значительно удалена на большое расстояние от источника света и фотодиода, так как потери в оптоволокну очень малы. Микрофон не чувствителен к электромагнитным, электростатическим и радиоактивным полям и имеет малые габариты.

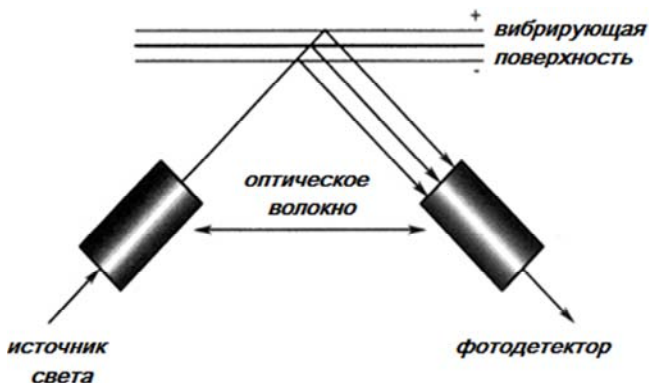


Рис. 1.13. Схема отражения лазерного луча от мембраны микрофона [2]

В *пьезоэлектрических* микрофонах преобразователями являются пьезоэлектрические кристаллы или керамика (в частности, титанат бария). После поляризации эти материалы могут преобразовывать механические деформации в электрический ток. К достоинствам относится стабильность характеристик.

Миниатюризация конденсаторного и пьезоэлектрического типа преобразования привела к возникновению *MEMS*-микрофонов (*MEMS* – микро-электромеханические системы). Схема *MEMS*-микрофона на одной подложке и на двух склеенных подложках представлена на рис. 1.14.

Мембрану напыляют на кремниевую подложку. На заднюю поверхность подложки – защитный слой, в котором сделаны V-образные канавки. На одной кремниевой подложке находится мембрана с металлизированным слоем и V-канавками, на другой выгравированы сплошные отверстия и она служит неподвижным металлизированным электродом. Обе подложки склеены. Между ними находятся прокладки для формирования воздушного зазора. Под действием звуковой волны мембрана колеблется, изменяется емкость конденсатора и создается переменный электрический сигнал. На обкладки микрофона подается постоянное напряжение.

Преимуществами *MEMS*-микрофонов являются малые размеры (площадь мембраны составляет около 1 мм^2) и, соответственно, возможность интегрировать в его корпус усилители, АЦП, цифровые процессоры и т. д. Кроме того, матрица таких микрофонов

и процессоров может позволить варьировать характеристики направленности этой системы.

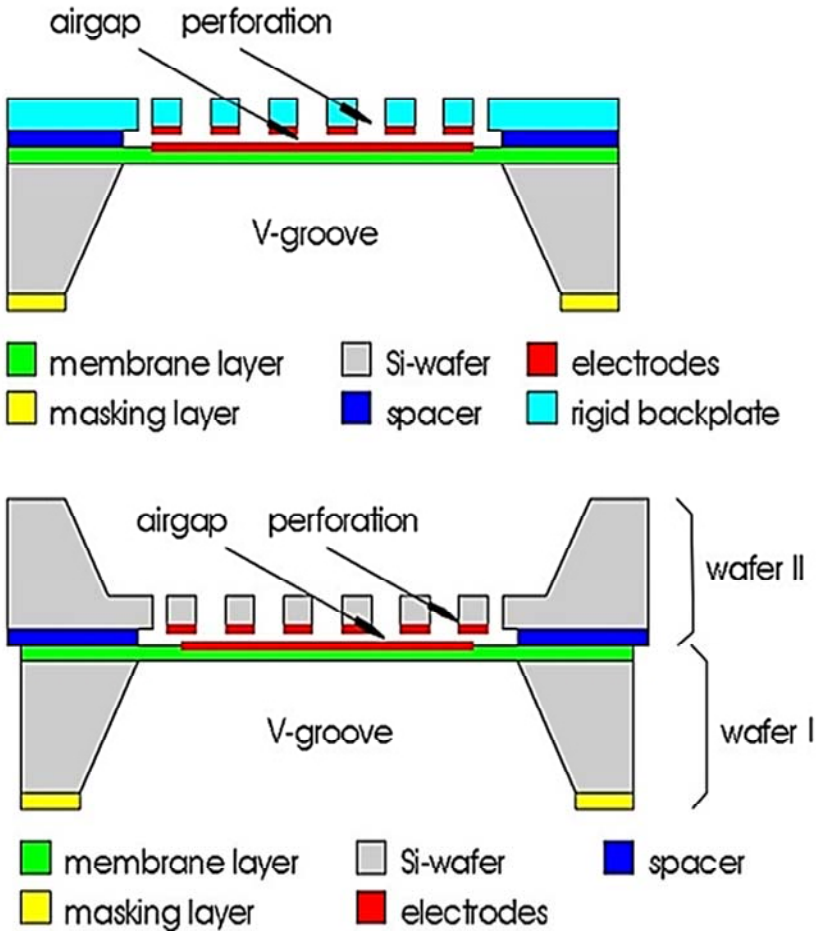


Рис. 1.14. Схема MEMS-микрофона на одной подложке (а) и на двух склеенных подложках (б) [2]

Как уже было указано, все микрофоны делятся на приемники давления и приемники градиента давления (рис. 1.4). У микрофонов первой группы чувствительность не зависит от направления воздействия звукового давления, у второй группы присутствует такая

зависимость. Поэтому приемники давления называют *ненаправленными*, а приемники градиента давления – *направленными*. Ранее были рассмотрены конструкции и эквивалентные схемы ненаправленных микрофонов.

Для получения требуемой **характеристики направленности** в направленных микрофонах (зависимости чувствительности от направления звукового давления) используют разные конструкторские решения [4].

В одном из исторически первых вариантов два капсюля размещали в одном корпусе и складывали их выходные напряжения. В настоящее время используют один капсюль с двумя или более акустическими входами для доступа звуковой волны к диафрагме, причем в них условия доступа волны к передней и задней части диафрагмы неодинаковы (рис. 1.15).

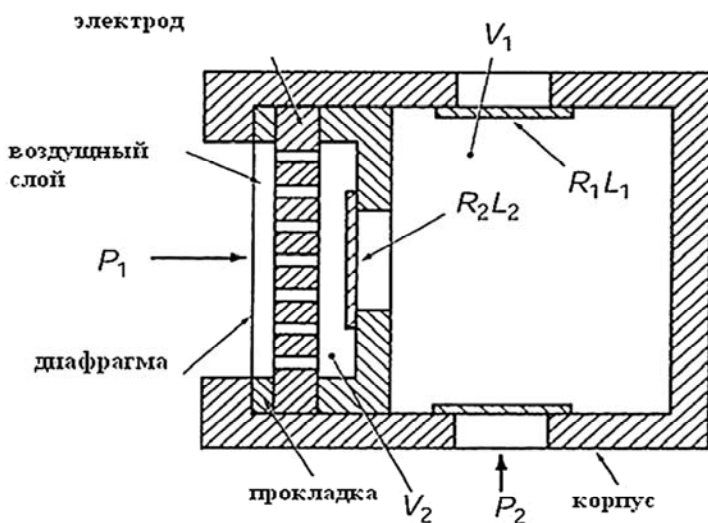


Рис. 1.15. Основные элементы направленного микрофона [4]

Например, в модели Sennheiser MD441 (рис. 1.16) три отверстия для доступа звукового давления со стороны тыльной поверхности диафрагмы располагаются от нее на разном расстоянии: 3,8 см для высокочастотного входа, 5,6 см – для среднечастотного, 7 см – для низкочастотного.



Рис. 1.16. Микрофон Sennheiser MD441 [4]

В конденсаторных микрофонах с *двойными мембранами* используются капсулы, имеющие две мембраны и общий неподвижный электрод. Схема такого микрофона приведена на рис. 1.17. В нем есть замкнутые полости и сквозные отверстия, соединяющие зазоры под мембранами. В таких микрофонах существует возможность управлять характеристикой направленности. Складывая напряжения с двух микрофонов, можно получить ненаправленную характеристику, вычитая – «восьмерку», а меняя соотношение напряжений, можно получить другие виды характеристик направленности: кардиоиду и т. д.

Технически это осуществляется с помощью подачи поляризующего напряжения на потенциометр (рис. 1.17). Неподвижный электрод подключается через резистор к середине потенциометра, левая мембрана – к положительному полюсу источника питания, правая – к одной из трех точек. При подключении к правой точке (Omni) получается круговая характеристика, к средней точке (Cardioid) – кардиоидная (мембрана имеет тот же потенциал, что и неподвижный электрод, следовательно, не является электрически активной), при подключении к левой точке (Figure 8) характеристика направленности имеет вид восьмерки.

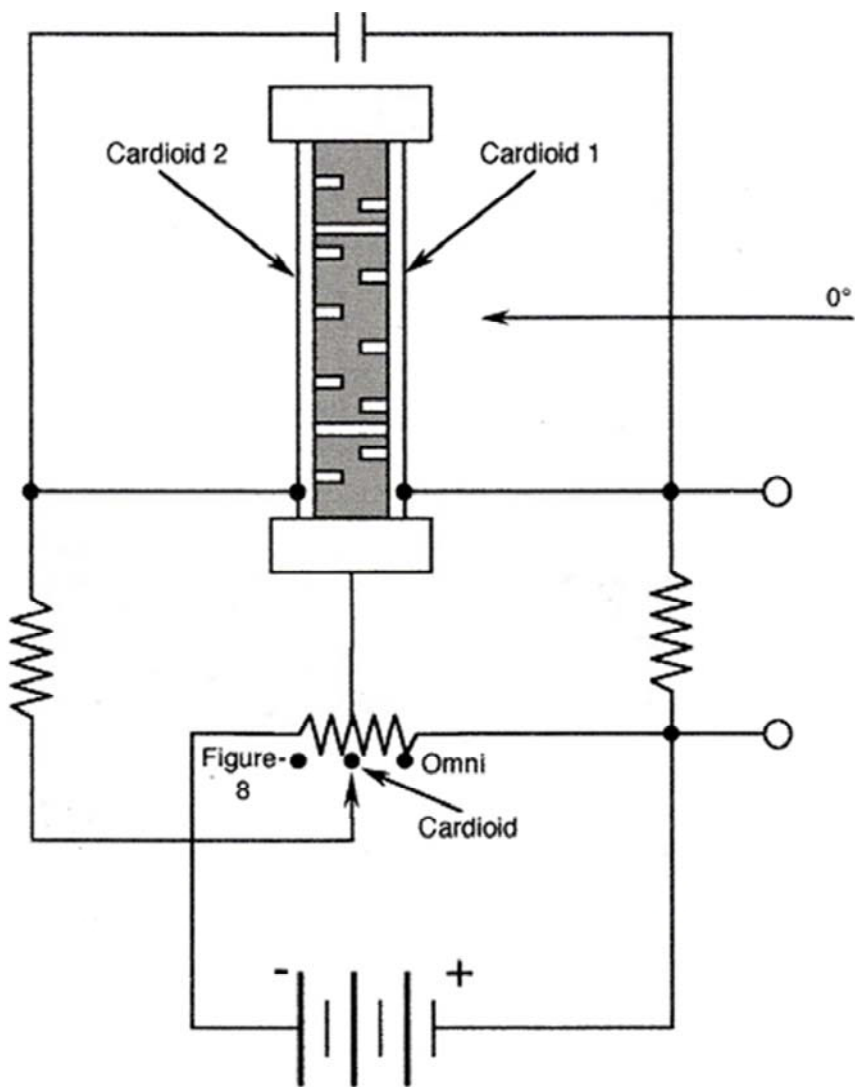


Рис. 1.17. Схема конденсаторного микрофона с двойными мембранами [4]

Сток воздуха в микрофонах с двойными мембранами может быть раздельным и совмещенным. Соответствующие конструкции представлены на рис. 1.18.

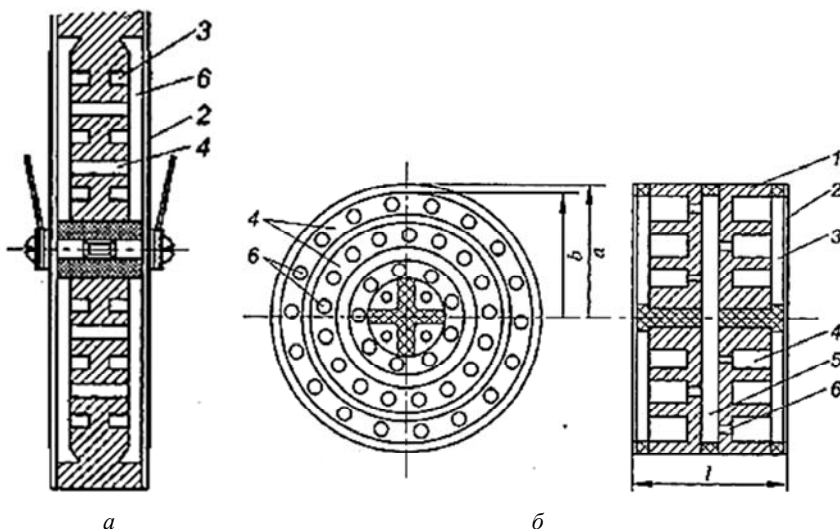


Рис. 1.18. Основные элементы микрофона с двумя мембранами с раздельным (а) и совмещенным (б) стоком воздуха:
 1 – неподвижные электроды; 2 – мембраны; 3 – подмембранный зазор;
 4 – подмембранные полости в виде концентрических пазов;
 5 – межэлектродный зазор (щель);
 6 – отверстия, соединяющие объем 4 с щелью 5 [4]

Особую группу направленных микрофонов образуют *остронаправленные* микрофоны, так называемые «shotgun». В них односторонне направленный капсюль соединен с трубкой, имеющей отверстия или прорези, закрытые тканью (рис. 1.19). Его внешний вид представлен на рис. 1.20.

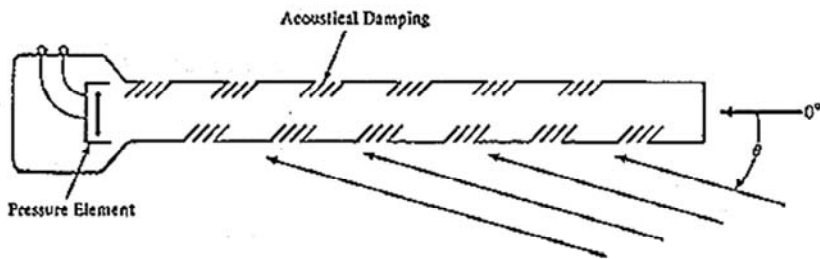


Рис. 1.19. Основные элементы остронаправленного микрофона [4]



Рис. 1.20. Внешний вид остронаправленного микрофона [4]

Области применения микрофонов – радиовещание, телевидение, звукозапись, озвучение и звукоусиление, концертно-театральная аппаратура, медицина, измерительная техника и т. д.

1.2. Параметры микрофонов

Одной из основополагающих характеристик микрофонов является **номинальный диапазон частот** [3]. Это частотный диапазон, в котором определяются параметры микрофона. Для современных конденсаторных микрофонов может достигать 20–20 000 Гц.

Чувствительность S определяется отношением сигнала на выходе микрофона, то есть напряжения U , к сигналу на входе микрофона, то есть звуковому давлению p :

$$S = \frac{U}{p}.$$

Учитывая, что напряжения на выходе микрофона мало, чувствительность обычно задается в мВ/Па.

Очевидно, что чувствительность зависит от частоты акустических колебаний, подаваемых на вход микрофона, и от направления вектора звукового давления, т. е. является не параметром, а многомерной функцией. Кроме того, чувствительность может определяться в помещениях с разными акустическими свойствами (чувствительность по свободному или по диффузному полю).

Существует несколько методик измерения чувствительности [3]. Измерение чувствительности *по свободному полю* производится в заглушенной камере. Это специальное помещение, в котором обеспечено отсутствие отражений за счет размещения на стенках большого количества звукопоглощающего материала.

При этом возможны две методики измерения: замещения и сравнения.

Метод *замещения* заключается в следующем. На измерительный громкоговоритель подается синусоидальный сигнал, напряжение которого выбирается так, чтобы обеспечить постоянный уровень звукового давления в заданной точке поля. Уровень давления измеряется специальным измерительным микрофоном малого размера, чтобы не вносить искажений в структуру звукового поля.

Затем на это место устанавливается измеряемый микрофон и определяется его выходное напряжение. Чувствительность определяется как отношение выходного напряжения на измеряемом микрофоне к звуковому давлению, измеренному измерительным микрофоном в точке размещения испытуемого микрофона.

При измерениях методом *сравнения* измерительный и испытуемый микрофон сразу устанавливаются в одну точку поля. Измеренная методом сравнения чувствительность называется *чувствительностью по давлению*. Она отличается от чувствительности, измеренной методом замещения, так как микрофон сам вносит определенные искажения в структуру звукового поля.

Если измерения звукового давления выполняются на шумовом сигнале в реверберационных камерах, обеспечивающих равномерное и изотропное звуковое поле за счет большого количества отражений, то отношение выходного напряжения к звуковому давлению называется *чувствительностью по диффузному полю*.

По отсутствию и наличию электрического сопротивления на выходе исследуемого микрофона чувствительность классифицируется на две группы: чувствительность *на холостом ходу*, если сопротивление на выходе микрофона отсутствует, и чувствительность *на номинальной нагрузке*, если измерения напряжения проводятся на номинальном выходном сопротивлении микрофона, указываемом в технической документации.

Уровень чувствительности L – это 20 логарифмов отношения чувствительности микрофона S_m к постоянному значению S_0 , равному 1 В/Па:

$$L = 20 \lg S_m / S_0.$$

Величина L измеряется в децибелах (дБ). Так как чувствительность микрофонов мала (несколько милливольт на 1 Па), то значения уровня чувствительности микрофонов отрицательны.

Частотная характеристика чувствительности или **амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)** микрофона $S(f)$ или $L(f)$ – зависимость чувствительности S или уровня чувствительности L от частоты f в номинальном диапазоне частот.

Традиционным способом экспериментального определения этой характеристики являлось измерение амплитуды электрических косинусоидальных колебаний звукового давления на выходе микрофона при подаче на его вход косинусоидальных колебаний давления с различными частотами. Современный метод определения АЧХ микрофона является более оперативным и заключается в измерении его импульсной реакции при подаче на вход импульса, имитирующего дельта-функцию Дирака, а затем в пересчете импульсной реакции в АЧХ. При этом вначале в данной точке помещения с помощью измерительного микрофона выравнивается частотная характеристика измерительного громкоговорителя, подающего на вход испытуемого микрофона акустический сигнал. Затем короткий электрический импульс подается на измерительный громкоговоритель, импульс от громкоговорителя поступает на испытуемый микрофон, а полученный на выходе микрофона сигнал обрабатывается в компьютерной измерительной станции. Графики импульсной реакции конденсаторного (емкостного) и динамического микрофонов представлены на рис. 1.21.

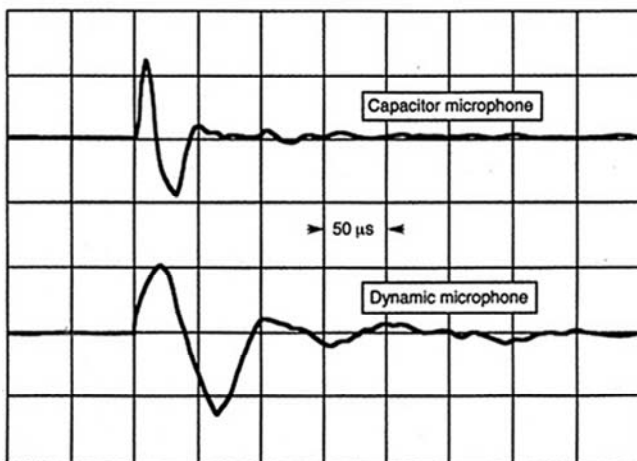


Рис. 1.21. Графики импульсной реакции конденсаторного и динамического микрофонов [5]

Из графиков видно, что импульсная реакция конденсаторного микрофона более близка к форме короткого импульса линейчатой формы, описываемого дельта-функцией Дирака, чем динамического, т. е. первый имеет более равномерную частотную характеристику.

В измерительной станции с помощью преобразования Фурье производится расчет АЧХ микрофона, зависимость АЧХ от времени (трехмерный спектр) и фазовая характеристика.

Пример графика АЧХ микрофона с возможностью ее коррекции на низких частотах представлен на рис. 1.22.

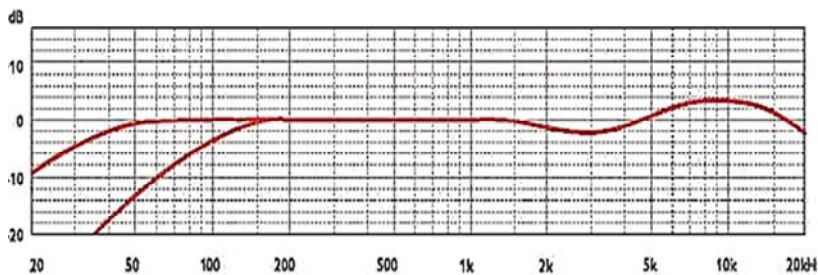


Рис. 1.22. Пример графика частотной характеристики чувствительности с возможностью ее коррекции на низких частотах [3]

Неравномерность частотной характеристики – разность максимального и минимального значений уровня чувствительности в номинальном диапазоне частот.

АЧХ микрофонов должны обладать минимальной неравномерностью, чтобы обеспечить передачу минимально искаженного сигнала в последующие звенья звукового тракта. Исключения предусмотрены для микрофонов, записывающих речь и пение. В этом случае обеспечивается подъем АЧХ в области 2–8 кГц, чтобы увеличить разборчивость (рис. 1.22).

Характеристика направленности $S_M(f, \alpha, \beta)$ – зависимость чувствительности микрофона на заданной частоте в свободном поле от угла падения звуковой волны. Частотные характеристики направленности можно определить как семейство АЧХ микрофона, измеренных при разных углах падения звуковой волны в свободном поле. Так как угол падения в пространстве задается двумя проекциями, меридиональной α и азимутальной β , то с учетом направленности АЧХ микрофона является функцией трех переменных (временной частоты f и двух углов α и β). Информацию о функциях трех переменных можно представить в виде совокупности графиков зависимости значения АЧХ от угла в определенном пространственном сечении в полярных координатах. Пример такой совокупности графиков характеристик направленности микрофона в определенном пространственном сечении представлен на рис. 1.23.

На основании информации, полученной из характеристики направленности, возможно определить комплекс параметров направленности микрофона. К ним относятся коэффициент направленности, индекс направленности, коэффициент осевой концентрации, перепад чувствительности (отношение «фронт-тыл»).

Коэффициент направленности $\Gamma(\alpha)$ – отношение чувствительности $S_M(\alpha)$ микрофона на данной частоте при падении звуковой волны под углом α к чувствительности $S_M(0)$ при угле падения звуковой волны вдоль оси микрофона (под углом 0 градусов):

$$\Gamma(\alpha) = \frac{S_M(\alpha)}{S_M(0)}.$$

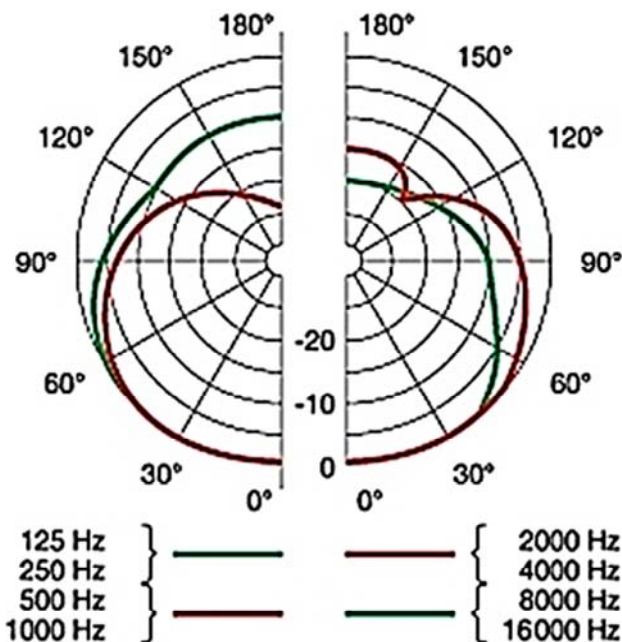


Рис. 1.23. Пример совокупности графиков характеристик направленности микрофона в определенном пространственном сечении [5]

Индекс направленности D равен двадцати десятичным логарифмам от коэффициента направленности $\Gamma(\alpha)$:

$$D = 20 \lg \Gamma(\alpha).$$

Коэффициент осевой концентрации Ω на частоте f есть отношение звуковой энергии, падающей на микрофон вдоль оси, к энергии со всех остальных направлений. Он определяется как отношение квадратов чувствительности, измеренной по свободному полю S_{M0} и по диффузному полю $S_{M\text{диф}}$ при использовании третьоктавного шумового сигнала с центральной частотой f Гц:

$$\Omega = \frac{S_{M0}^2}{S_{M\text{диф}}^2}.$$

Индекс осевой концентрации Q – десятикратный логарифм коэффициента осевой концентрации Ω :

$$Q = 10 \lg \Omega.$$

Перепад чувствительности, «фронт-тыл» $Q_{0/180}$ – разность между уровнями чувствительности микрофонов, измеренными при углах приёма 0 (L_0) и 180 градусов (L_{180}) на данной частоте в свободном поле:

$$Q_{0/180} = L_0 - L_{180} = 20 \lg \frac{S_M(0)}{S_M(180)}.$$

Коэффициент расстояния равен отношению расстояний от источника до направленного микрофона и от источника до ненаправленного микрофона, на которых обеспечиваются одинаковые значения выходного сигнала.

Например, кардиоидный микрофон может быть отодвинут на расстояние в 1,7 раза большее, чем ненаправленный, при сохранении того же выходного сигнала.

Угол максимального подавления – угол, в направлении которого микрофон наименее чувствителен к окружающему звуку.

Как упоминалось ранее, микрофоны можно классифицировать по форме характеристик направленности. Возможные формы характеристик направленности и их ориентация относительно капсуля микрофона представлены на рис. 1.24, а численные значения этих параметров, соответствующие данным характеристикам, – в табл. 1.1.

Микрофон является источником нелинейных искажений, т. е. при подаче на его вход гармонического сигнала определенной частоты на выходе дополнительно появляются гармонические составляющие с другими частотами. Для оценки нелинейных искажений микрофона используется **полный коэффициент гармонических искажений K_Γ** . Он равен отношению среднего квадратического значения амплитуд U_i дополнительных гармоник на выходе с частотами, кратными частоте гармоники на выходе, к амплитуде U_1 гармоники на входе:

$$K_\Gamma = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1}.$$

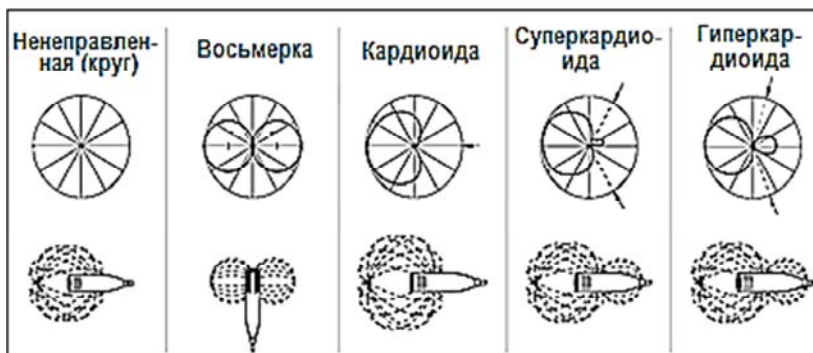


Рис. 1.24. Возможные формы характеристик направленности и их ориентация относительно капсулы микрофона [3]

Таблица 1.1

Численные значения параметров направленности для микрофонов с различными характеристиками направленности [3]

| Характеристика | Ненаправленная | Кардиоида | Суперкардиоида | Гиперкардиоида | Восьмерка |
|--|----------------|-----------|----------------|----------------|-----------|
| Ширина диаграммы направленности, град. | 360 | 131 | 115 | 105 | 90 |
| Угол максимального подавления, град. | – | 180 | 126 | 110 | 90 |
| Отношение «фронт-тыл», дБ | 0 | 25 | 12 | 6 | 0 |
| Коэффициент расстояния | 1 | 1,7 | 1,9 | 2 | 1,7 |

Обычно величина коэффициента гармонических искажений для современных микрофонов составляет меньше 0,5 % [3], т. к. микрофон – первое звено записи сигнала и требования к его параметрам максимально жесткие.

Возникновение шумов происходит при использовании всех типов микрофонов. Микрофонные шумы обычно разделяются на внутренние, наводимые и внешние [1].

Внутренние (собственные) шумы возникают в капсулах в результате случайных колебаний молекул воздуха в слое между мембраной и неподвижным электродом, в элементах электрической

схемы микрофона за счет случайных тепловых процессов в сопротивлении нагрузки, в интегральных схемах предусилителя и т. д. В результате появляется ток на выходе микрофона при отсутствии внешнего звукового воздействия. В конденсаторных микрофонах предусилители используются всегда, а в динамических катушечных микрофонах их обычно нет (в них собственные шумы возникают в основном в активном сопротивлении звуковой катушки), поэтому уровень внутренних шумов у конденсаторных микрофонов выше, чем у динамических.

Наводимые шумы появляются за счет воздействия внешних электромагнитных и электрических полей на элементы микрофонных конструкций: на выходные трансформаторы ленточных микрофонов, звуковые катушки динамических микрофонов и т. д. Источниками электромагнитных помех, которые проявляются в виде низкочастотного фона, являются кабели мощных осветительных приборов, электропитающих устройств и др. Для их предотвращения трансформаторы защищают экранами из низкоуглеродистой стали, пермаллоя и других материалов. В профессиональных динамических микрофонах применяют антифоновые катушки, наматываемые на корпус, в котором находится капсюль. Индуктивность антифоновой катушки равна индуктивности звуковой катушки, но с целью компенсации помех намотка проводится в противоположном направлении. В микрофонах возникают также электростатические помехи, которые проявляются как в виде фона, так и в виде щелчков, шорохов и др. при резком перемещении микрофона и его кабеля. Защита от них осуществляется с помощью симметрирования микрофонных цепей и электростатической экранировки кабелей (с помощью чулка из гибкой металлизированной заземляемой оплетки).

Внешние шумы производятся находящимися в помещении *оборудованием* (вентиляция, осветительные приборы, видеокамеры и др.) и *людьми* (публика, операторы и т. д.). Такие шумы создают в помещении, как правило, диффузное звуковое поле, энергия которого распределена равномерно. Учитывая, что полезные источники звука имеют точную локализацию в помещении, для отстройки от этих шумов применяются направленные и остронаправленные микрофоны, выбирается оптимальное расположение микрофона по отношению к источнику и т. д. Кроме того, к внешним шумам относятся *аэродинамические* шумы, то есть помехи, возникающие вследствие

обтекания микрофона потоками воздуха (из-за ветра, резкого перемещения, дыхания вокалиста при произнесении взрывных и фрикативных согласных и др.). Защитой от этих помех служат ветровые экраны («ветрозащита») из травленого поролона или многослойных металлических сеток, рассекающих поток воздуха. Эффективность экранов увеличивается с увеличением их размеров. Однако поскольку экраны оказывают существенное влияние на форму частотной характеристики в области высоких частот, оптимальный выбор их параметров имеет большое значение. Внешние *вибрационные* шумы обусловлены низкочастотными колебаниями, действующими через элементы конструкции на капсуль, из-за колебаний опор (стойки, пола и др.), тряски микрофона в руках исполнителя, случайных ударов, толчков и др. Защитой от такого типа шумов служит применение амортизаторов внутри корпуса с целью уменьшения передачи колебаний корпуса микрофона на капсуль. *Структурный* шум возникает вследствие трения микрофона об одежду (для петличных микрофонов), сжимания и трения в руках исполнителя и др. Для его снижения необходимо уменьшать шероховатость корпуса, увеличивать его толщину, разделять металлические части корпуса и капсуль резиновыми и полимерными прокладками и т. д.

Существует несколько критериев для оценки шумовых параметров: отношение сигнал/шум, уровень собственных шумов микрофонов.

Отношение сигнал/шум рассчитывается двумя способами. По стандарту IEC 60268-1 – как разница между опорным уровнем звукового давления 94 дБ (1 Па) и уровнем эквивалентного звукового давления, измеренного с взвешиванием по кривой А из стандарта IEC 60268-1. По стандарту CCIR 468-3 – как разница между опорным уровнем звукового давления 94 дБ (1 Па) и уровнем напряжения, соответствующего собственному шуму, измеренному с фильтром по CCIR 468-3.

Уровень эквивалентного звукового давления, обусловленного помехами, определяется по ГОСТ Р 53576-2009 (МЭК 60268-4:2004) как величина, равная двадцати десятичным логарифмам отношения напряжения на выходе микрофона, вызванного воздействием внешних помех или собственным шумом, к напряжению, вызванному опорным звуковым давлением $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Максимальное звуковое давление, которое может воспринимать микрофон, ограничивается амплитудой возникающих нелинейных искажений.

Уровень максимального звукового давления – это такой уровень звукового давления, при котором коэффициент гармонических искажений не превосходит заданного значения. В настоящее время этот показатель может достигать значений 140–150 дБ (при этом коэффициент гармонических искажений не превышает 0,5 % на частоте 1000 Гц) [3].

Разность между максимальным и минимальным значением воспринимаемого звукового сигнала оценивается **динамическим диапазоном**, представляющим собой разность между максимальным уровнем звукового давления, при котором нелинейные искажения на выходе микрофона не превышают допустимое значение, и эквивалентным уровнем шумов.

Номинальный электрический импеданс $[Z]$ – это модуль полного электрического сопротивления микрофона. Значение $[Z]$ является функцией частоты поступающего на микрофон сигнала. Измерения выполняют в номинальном диапазоне частот испытываемого микрофона. **Полное электрическое сопротивление** есть отношение величины напряжения на выходе микрофона к результирующему току.

В соответствии с ГОСТ Р 53576-2009 (МЭК 60268-4:2004) определение частотной характеристики модуля полного электрического сопротивления для динамического микрофона может производиться как электрическим, так и электроакустическим методом.

Схема измерения модуля полного электрического сопротивления микрофона электрическим методом показана на рис. 1.25.

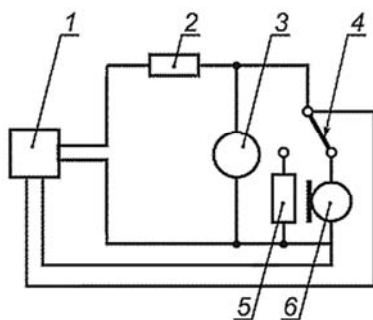


Рис. 1.25. Схема измерения модуля полного электрического сопротивления динамических микрофонов электрическим методом:

1 – установка для автоматической записи частотной характеристики;
2, 5 – сопротивления; 3 – вольтметр; 4 – переключатель; 6 – испытываемый микрофон

Активное сопротивление 2 и входное сопротивление регистрирующего устройства должны не менее чем в 20 раз превышать сумму ориентировочного максимального значения модуля полного электрического сопротивления микрофона в номинальном диапазоне частот и модуля выходного сопротивления генератора.

Запись частотной зависимости уровня напряжения выполняется на выходе микрофона. Затем вместо микрофона подключают постоянное сопротивление 5 и на том же бланке записывают уровень напряжения, снимаемого с сопротивления 5, которое выбирают приблизительно равным сопротивлению микрофона.

Модуль полного электрического сопротивления микрофона на данной частоте определяют как произведение сопротивления 5 на 10 в степени разности уровней напряжения на выходе испытуемого микрофона и снимаемого с сопротивления 5, деленной на 20.

Допускается измерять модуль полного электрического сопротивления микрофона на дискретных частотах по схеме на рис. 1.25, где установка для автоматической записи частотной характеристики 1 может быть заменена звуковым генератором.

Измерения электроакустическим методом выполняют в условиях свободного поля по схеме на рис. 1.26.

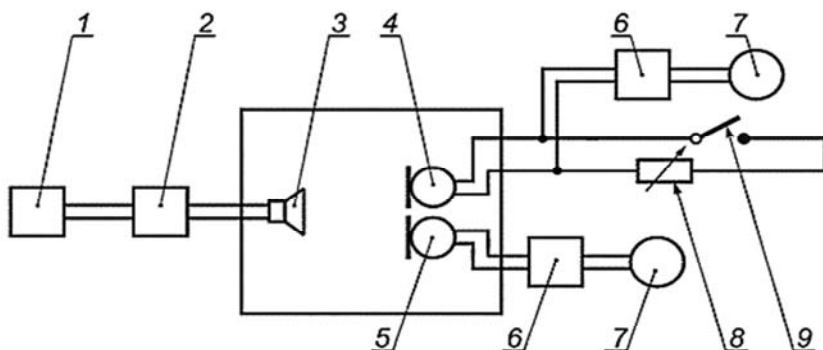


Рис. 1.26. Схема измерения модуля полного электрического сопротивления динамических микрофонов электроакустическим методом:
 1 – звуковой генератор; 2 – усилитель мощности; 3 – громкоговоритель;
 4 – испытуемый микрофон; 5 – рабочий измерительный микрофон;
 6 – микрофонный усилитель; 7 – вольтметр;
 8 – магазин сопротивлений; 9 – переключатель

Испытуемый микрофон подключают к микрофонному усилителю, входное сопротивление которого обеспечивает режим холостого хода. Измеряют напряжение на выходе микрофонного усилителя при разомкнутых контактах переключателя 9 (режим холостого хода). Затем при замкнутых контактах переключателя 9 подбирают сопротивление магазина, при котором напряжение на выходе микрофонного усилителя равно половине напряжения холостого хода. При этом модуль полного электрического сопротивления испытуемого микрофона равен сопротивлению, установленному на магазине.

Для конденсаторных микрофонов в соответствии со стандартом ГОСТ Р 53576-2009 (МЭК 60268-4:2004) используется метод, где микрофон замещается конденсатором равной емкости.

Модуль полного электрического сопротивления в большинстве современных конденсаторных микрофонов находится в диапазоне 50–200 Ом, у динамических микрофонов – до 600 Ом [3].

В соответствии с ГОСТ Р 53566-2009, микрофоны в зависимости от условий эксплуатации, указанных в ТУ, должны выдерживать следующие виды механических и климатических испытаний по ГОСТ 11478: на прочность при воздействии синусоидальной вибрации, на прочность при транспортировании, на воздействие повышенной температуры, на воздействие пониженной температуры среды, на воздействие повышенной влажности.

1.3. Системы записи звука группами микрофонов

Восприятие объемности звукового образа происходит в первую очередь благодаря способности слуха к бинауральной локализации звуков в трехмерном пространстве:

а) *в горизонтальной плоскости* – за счет оценки временной и интенсивностной разностей сигналов;

б) *в вертикальной плоскости* – за счет учета изменений спектральных составляющих звука из-за дифракции на голове и ушной раковине;

в) *по глубине* – за счет изменения уровня сигнала, изменения спектральных характеристик и оценки соотношений уровней прямого и отраженного сигналов [6].

Для создания в системе записи и воспроизведения аудиоинформации пространственного звукового образа, идентичного восприятию

от реального звукового источника, необходимо оптимально размещать в пространстве не только системы звуковоспроизведения, но и системы записи звука (микрофоны). Исторически первым способом для решения этой задачи явилось использование стереосистем, основу которых составляет пара микрофонов. Совершенствование методов обработки сигнала позволило перейти к более сложным системам для пространственной звукозаписи, объединяемым названием «системы объемного звучания» (surround sound system).

1.3.1. Стереосистемы микрофонов

Большинство промышленно выпускаемых в настоящее время микрофонных стереосистем можно разделить на следующие группы:

- раздельные стереосистемы (*AB, DIN, NOS, ORTF, Baffled*);
- совмещенные стереосистемы (*XY, MS, Blumlein*);
- «верхние» стереосистемы (*Overhead*);
- системы типа «искусственная голова» (*Head related*);
- бинауральные стереосистемы (*Binaural*).

При использовании **раздельных микрофонных стереосистем** перед исполнителями на некотором расстоянии друг от друга устанавливаются два одинаковых по чувствительности и направленности микрофона. Акустические оси микрофонов могут быть параллельными или развернутыми а сами микрофоны – как ненаправленными, так и направленными. В данном случае используется временная стереофония – сдвиг по времени прихода к микрофонам звуков от различных источников. Для направленных микрофонов дополнительно имеет место разность по интенсивности за счет не изотропной формы характеристики направленности. На рис. 1.27 представлены микрофоны, объединенные в систему *AB*.

Обычно применяемое в *AB* расстояние между микрофонами составляет 50–60 см [6]. С уменьшением этого расстояния угол охвата для сохранения стереоэффекта увеличивается, однако для расстояния меньше 40 см стереоэффект практически исчезает.

К недостаткам системы *AB* следует отнести передачу информации о позиции первичного источника звука при его перемещении и о скорости его движения в узкой зоне. Кроме того, запись системой *AB* не позволяет получить высокое качество при переводе сигнала в одну монофоническую фонограмму, т. к. временные сдвиги

между канальными сигналами при совмещении создают интерференционные искажения.



Рис. 1.27. Микрофоны, объединенные в систему *AB* [6]

Системы *DIN*, *NOS* и *ORTF* построены по такому же принципу, что и *AB*, отличие заключается в значениях расстояний между микрофонами, углов их относительного разворота и типах характеристик направленности. Например, в *ORTF stereo technique* два кардиоидных микрофона разнесены на 17,5 см и повернуты между собой на угол 110° . Расстояние соответствует расстоянию между ушами [3, 7], а угол разворота моделирует теневой эффект человеческой головы. В данном случае используется различие между сигналами как по времени, так и по интенсивности, поэтому стереобраз записывается с качественной локализацией источников в пределах угла охвата 95° .

В системах типа *Baffled* два разнесенных микрофона дополняются акустическим поглощающим экраном между ними. Примером системы является *Jecklin Disk* с двумя ненаправленными микрофонами, размещенными на расстоянии 16,5 см, и специальным акустически обработанным диском диаметром 28 см, размещенным между ними (рис. 1.28) [3].

В совмещенных микрофонных стереосистемах используют два направленных микрофона, расположенных в одной точке под углом друг к другу, фактически они устанавливаются один над другим (рис. 1.29).

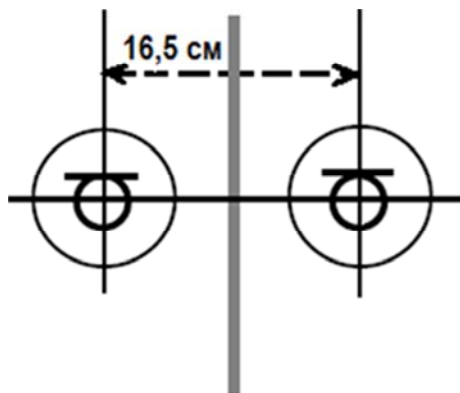


Рис. 1.28. Система *Jecklin Disk*



Рис. 1.29. Совмещенные микрофоны в системе XY [6]

В системе *XU* используются два направленных микрофона (две кардиоиды, либо две суперкардиоиды, либо две восьмерки), установленные на одной оси. Акустические оси микрофонов образуют угол, обычно в диапазоне 60–130°. Так как в обоих каналах отсутствует относительный временной сдвиг, система *XU* хорошо совместима с монофонической системой. Но этой системе присущи искажения пространственного распределения звука по глубине и по фронту.

Система *MS* также содержит два совмещенных микрофона, имеющих разные характеристики направленности (часто круг-восьмерка или кардиоида-восьмерка). Сигналы на их выходе подвергаются суммарно-разностному преобразованию. Если один из микрофонов ненаправленный (*M*), то напряжение на его выходе неизменно при любом положении источника. Напряжение с другого микрофона (*S*) определяется формой его характеристики направленности. Если это восьмерка, то при положении источника слева или справа оно будет максимальным, при положении в центре – равно нулю. Поэтому при расположении источника под углом +90° выходное напряжение будет равно сумме напряжений с микрофонов *M* и *S*.

При положении источника под углом 0° напряжение будет равно только напряжению с *M*-микрофона, а при положении –90° оно равно разности напряжений с *M*- и *S*-микрофонов. К достоинствам системы следует отнести точную локализацию источников внутри ансамбля и движущихся источников звука, а также она обеспечивает хорошую моносовместимость и широкие возможности микширования. Недостатки – искажения в передаче фронтального движения источника.

Часто используется комбинация систем *AB* и *XU* или *AB* и *MS*, т. к. недостатки одной из двух систем компенсируются достоинствами другой.

Blumlein – разновидность системы *XU*, использующая два микрофона с характеристикой направленности типа «восьмерка», установленных в одной точке под углом 90°. Ее недостаток – за пределами определенного угла охвата смещение реального источника не сопровождается соответствующим смещением мнимого источника.

В системах **Overhead («верхние»)** микрофоны размещают намного выше музыкальных инструментов. При этом звуки от разных индивидуальных инструментов достигают микрофонов с более реальным распределением по времени, чем при их близком расположении, что приближает тембр записанного звука к естественному.

Несколько записанных первых отражений имитируют эффект звучания в реальном помещении.

Например, в системе *Spaced Omni* ненаправленные микрофоны устанавливаются на стойках перед исполнителем на высоте 1,2–2,4 м, иногда 3 м или выше. Достоинство – высокое качество стереоэффекта, недостаток – может вносить фазовые искажения.

В системе *Decca Tree* три ненаправленных микрофона размещаются на стойках на 3–3,7 м выше и слегка позади головы дирижера. Они наклонены приблизительно на 30° вниз по направлению к оркестру и установлены под определенным углом друг к другу: один направлен в центр, два других – под углом 45° от центра. Достоинства – высокое качество стереоэффекта и возможность отдельно записывать центральный канал, что может быть необходимо при микшировании.

В системах **«искусственная голова»** два ненаправленных микрофона размещаются на твердой сфере диаметром 20 см, моделирующей акустическое поле вокруг человеческой головы. Диафрагмы микрофонов совмещены с поверхностью сферы. На рис. 1.30 показана система *Neumann KFM100* (одна из разновидностей искусственной головы).



Рис. 1.30. Система *Neumann KFM100*
(одна из разновидностей искусственной головы) [6]

Появление этой системы обусловлено попыткой имитировать естественные условия прослушивания, при которых разница по времени и интенсивности двух сигналов, приходящих на левое и правое ухо, формируется за счет расстояния между приемниками, равному диаметру головы, а также за счет дифракции на голове, ушных раковинах и торсе.

Пространственное распределение звукового поля, записанного этой системой, подобно воспроизводится в стереотелефонах, но искажается при воспроизведении через акустические системы.

Другой попыткой имитации естественных условий прослушивания является **бинауральные стереосистемы**. В них используется модель искусственной головы с микрофонами, расположенными внутри слуховых каналов (рис. 1.31).



Рис. 1.31. Модель искусственной головы [6]

На рис 1.32 показано крепление микрофонов внутри искусственной головы. Чтобы осуществить имитацию дифракции на торсе, отдельные модели искусственной головы дополняются торсом (рис. 1.33).

В устройствах этого типа точно копируется форма головы и ушных раковин, а физико-механические параметры материалов выбираются таким образом, чтобы моделировать костную проводимость.

Звуковой сигнал поступает на мембрану микрофона после обработки в раковине и слуховом канале. Если передать записанную информацию по двум каналам и воспроизвести через стереотелефоны, слушатель получает достаточно точное пространственное ощущение записанной звуковой картины. Но при прослушивании через акустические системы пространственные ощущения искажаются, что можно компенсировать использованием специальных процессоров.



Рис. 1.32. Крепление микрофонов внутри искусственной головы [6]



Рис. 1.33. Модель искусственной головы, дополненная торсом [6]

1.3.2. Микрофонные системы объемного звучания (surround sound system)

Системы объемного звучания обеспечивают подобие звуковой картины в помещениях записи и воспроизведения, недоступное стереофоническим системам. Все системы этой группы делятся на 2 типа: совмещенные и разнесенные [8].

В **совмещенных** системах объемного звучания микрофоны располагаются на близком расстоянии, аналогично совмещенным стереосистемам, но, в отличие от последних, содержат более двух микрофонов. К этому типу можно отнести системы *Soundfield*, *Surround Sphere*, *DoubleMS*.

Система *Soundfield* использует четыре кардиоидных микрофона, размещенных в форме тетраэдра, и соответствующий процессорный блок (рис. 1.34). Внешний вид системы представлен на рис. 1.35.

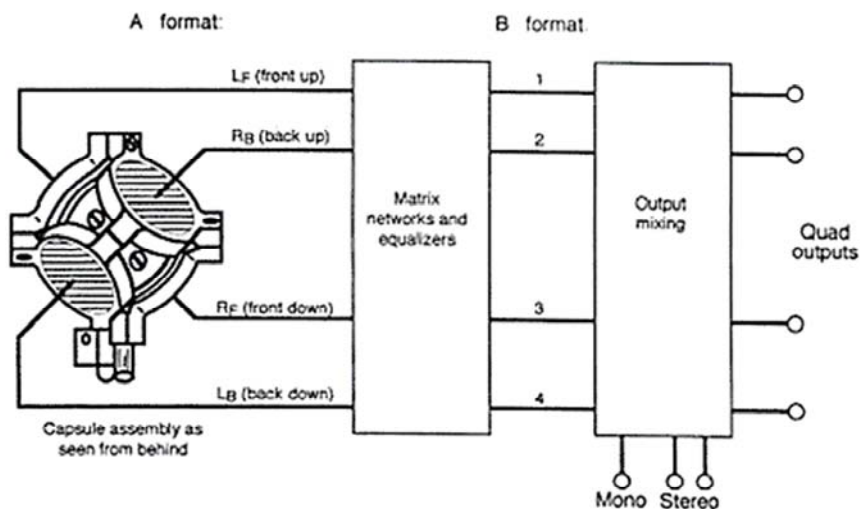


Рис. 1.34. Расположение микрофонов и схема обработки в системе Soundfield [8]

Первичные сигналы, получаемые от этих микрофонов (L_F , R_B , R_F , L_B) образуют *A*-формат. Затем с помощью специального цифрового процессора из них формируются четыре новых сигнала W , X , Y ,

Z (B -формат), из которых сигнал W соответствует сигналу от ненаправленного микрофона, а сигналы X , Y и Z – сигналам от микрофонов с характеристикой направленности типа «восьмерка», ориентированным влево-вправо, вперед-назад и вверх-вниз.



Рис. 1.35. Внешний вид четырех кардиоидных микрофонов системы Soundfield, размещенных в форме тетраэдра

Четыре компонента B -формата могут быть электрически скомбинированы в разных пропорциях таким образом, что можно имитировать ряд кардиоидных или других характеристик направленности, ориентированных в любом направлении в пространстве, причем можно менять направление и наклон этих характеристик как в процессе записи, так и при последующей обработке. Сигналы B -формата конвертируются в любые варианты сигналов для моно-, стерео- и *surround*-систем, вплоть до 10.1.

Если микрофонная система состоит из одного ненаправленного микрофона и трех микрофонов с характеристикой направленности типа «восьмерка», закрепленных очень близко друг к другу, то можно

сразу записывать сигналы *B*-формата [8]. В этой системе, предложенной фирмой *Schoeps*, процессорная обработка несколько проще, поэтому можно использовать микрофоны разных фирм.

В системе *Surround Sphere* используются два направленных микрофона, установленных на поверхности сферы, и два микрофона с характеристикой направленности «восьмерка», расположенных ниже и направленных прямо по оси (рис. 1.36).

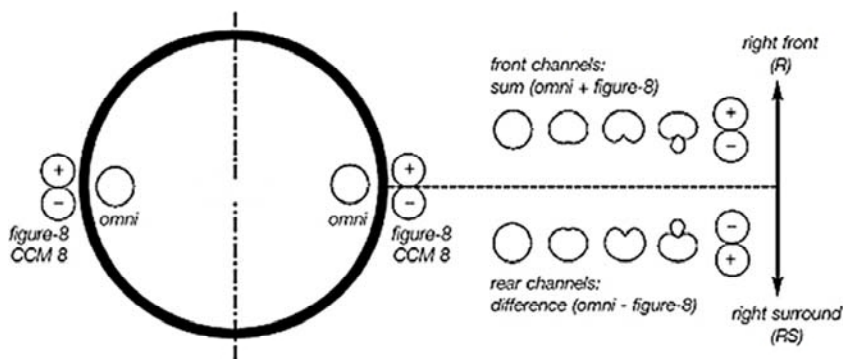


Рис. 1.36. Расположение микрофонов и формы имитируемых характеристик направленности в системе *Surround Sphere* [8]

Суммируя электрические сигналы на выходах микрофонов в разных пропорциях, можно получить различные виды характеристик направленности как во фронтальной, так и в тыловой плоскости (круг, кардиоида, суперкардиоида, восьмерка и т. д.). Система имеет большой угол охвата (120°). Цифровая обработка сигнала может обеспечить формат 5.1.

Система *DoubleMS* получена дополнением стереосистемы *MS* четырехканального звука еще одним *M*-микрофоном (ненаправленным или кардиоидным). Характеристики направленности микрофонов и их расположение в *DoubleMS* приведены на рис. 1.37.

S-микрофон с характеристикой направленности «восьмерка» расположен выше заднего *M*-микрофона. Используя различные варианты характеристик направленности *M*-микрофонов и соответствующую обработку электрических сигналов, можно сформировать воспроизведение для формата 5.1. Системы с адаптивным цифровым управлением представляют собой микрофонные антенны, в которых

с помощью цифровых фильтров синтезируются диаграммы направленности различной формы, ширины и ориентации, адаптированные к различным условиям окружающего пространства и задачам обработки. Схема расположения микрофонов в одной из таких систем, состоящей из центрального остронаправленного микрофона и четырех кардиоидных микрофонов, приведена на рис. 1.38.

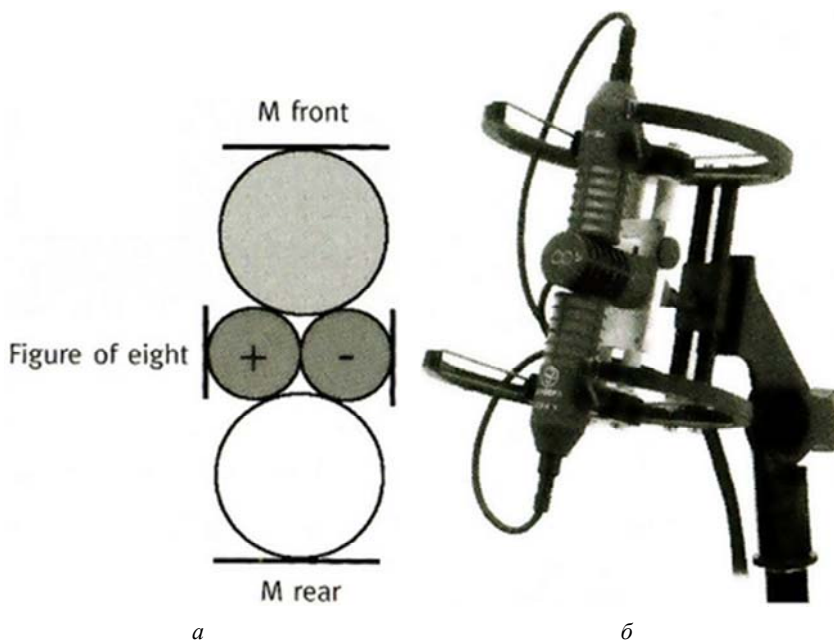


Рис. 1.37. Характеристики направленности микрофонов (а) и их расположение (б) в *DoubleMS* [8]

Группа **разнесенных систем** объемного звучания содержит системы двух типов: пятиканальные системы главных микрофонов и системы с разделением фронтальных и задних микрофонов.

Пятиканальные системы главных микрофонов обычно включают в себя пять близко расположенных микрофонов, каждый из которых создает сигнал для левого, правого, центрального и двух тыловых громкоговорителей. Пример схемы расположения микрофонов в одной из таких систем приведен на рис. 1.39, а ее внешний вид – на рис. 1.40.



Рис. 1.38. Расположение микрофонов в одной из систем с адаптивным цифровым управлением [8]

Эта система имитирует в помещении воспроизведения наличие вторичных источников, распределенных в горизонтальной плоскости. Из-за малых расстояний между отдельными микрофонами эффект подобия объемного распределения проявляется недостаточно хорошо. Поэтому такая конфигурация дополняется другими микрофонами.

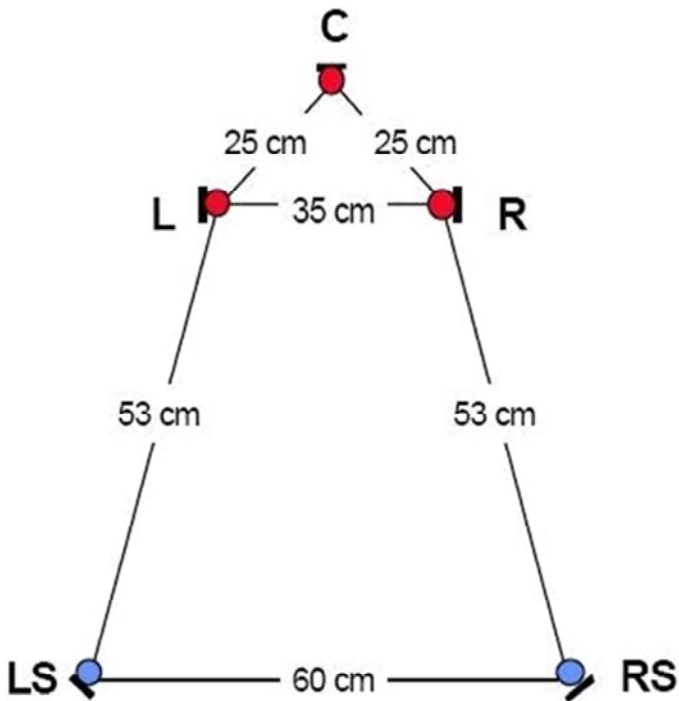


Рис. 1.39. Схема расположения в микрофонов в пятиканальной системе главных микрофонов *INA-5* [8]



Рис. 1.40. Внешний вид пятиканальной системы главных микрофонов *INA-5* [8]

Система с разделением фронтальных и задних микрофонов содержит три передних микрофона для создания точного мнимого фронтального образа и задние микрофоны для записи звуков в окружающем пространстве. Одной из лучших по субъективной оценке качества записи в этой группе является система *Fukada Tree* (рис. 1.41).

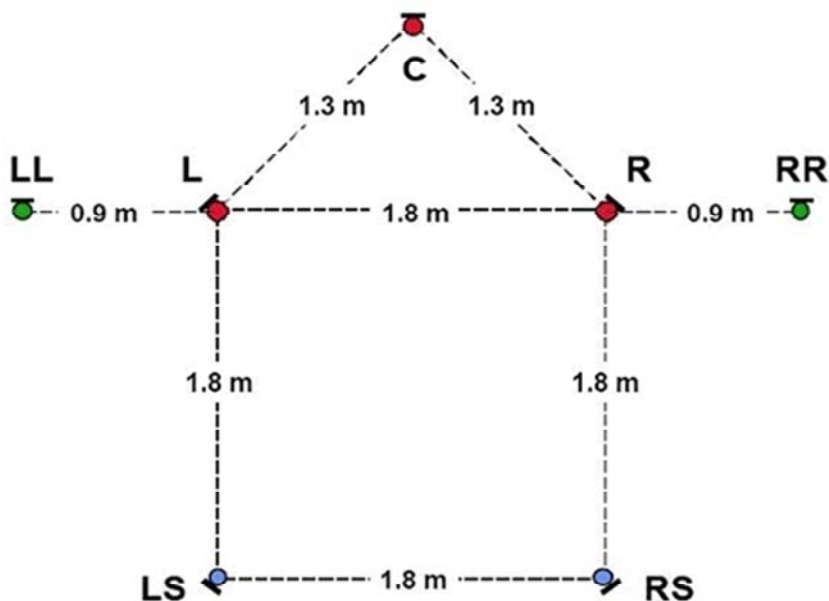


Рис. 1.41. Схема расположения в микрофонов в пятиканальной системе с разделением фронтальных и задних микрофонов *Fukada Tree* [8]

Ее конфигурация создана на основе стереосистемы *Decca Tree*, в которой ненаправленные микрофоны заменяются на кардиоидные, чтобы уменьшить поступление отраженного звука в передние микрофоны. В отдельных случаях система дополняется двумя ненаправленными микрофонами *LL* и *RR* с целью увеличения ширины охвата пространства. Задние микрофоны также имеют кардиоидные характеристики и располагаются на *критическом* для данного помещения расстоянии (критическим называется расстояние, на котором величины прямой и отраженной энергии равны друг другу, его значение зависит от времени реверберации и объема зала).

2. АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

Акустическая система – устройство, предназначенное для эффективного излучения звука в воздушной среде, включающее один или несколько звуковых излучателей в акустическом оформлении и электрические устройства. Тип акустической системы определяется в зависимости от наличия усилителя: если акустика оснащена усилителем, то она считается активной, без него – пассивной. В ГОСТ Р 53575-2009 [9] используется термин **громкоговоритель** – пассивный электроакустический преобразователь, предназначенный для излучения звука в окружающее пространство, содержащий одну или более излучающую головку, имеющий необходимое акустическое оформление и необходимые пассивные электрические устройства (фильтры, трансформаторы, регуляторы и т. п.).

Акустические системы могут содержать несколько **элементов**: сателлиты, фронтальные, мониторные, центральный и тыловой громкоговорители, твитер и сабвуфер [10].

Сателлитами называются небольшие громкоговорители в недорогих акустических системах. *Фронтальные громкоговорители* используются как автономно в стереосистемах, так и в составе многоканальной акустической системы. *Мониторный громкоговоритель* представляет собой громкоговоритель универсального типа, который может с максимальной точностью передавать все детали звукового оформления. При его использовании наряду с полезным звуковым сигналом могут слышимо воспроизводиться и шумы электрических элементов системы. Мониторы используются для контроля фонограммы, а также для прослушивания коллекционных записей. *Центральный громкоговоритель* предназначен для функционирования в многоканальных системах 5.1 или 7.1. *Тыловой громкоговоритель* предназначен для создания эффекта нахождения слушателя внутри звукового пространства и обычно располагается за спиной слушателя либо высоко над его головой. *Твитер* – громкоговоритель, который используется для воспроизведения высоких и ультравысоких частот. *Сабвуфер* – это громкоговоритель для передачи звуков низких частот до 100 Гц.

Акустическое оформление громкоговорителей определяется особенностями конструкции корпуса акустической системы. Существует четыре типа акустического оформления: фазоинверторного, открытого, закрытого типов либо с пассивным излучателем [10].

Акустическая система с *фазоинвертором* имеет закрытый корпус, в котором выведен порт для подключения фазиинвертора. Последний представляет собой трубку определенных размеров. Проходя через нее, звук меняет фазу, выходя через порт. При этом звуковые сигналы из фронтальной и тыльной плоскостей диффузора соединяются для увеличения громкости. Диффузор – часть громкоговорителя, преобразующая механические колебания электромагнитных катушек в акустические колебания в воздухе. Достоинства таких систем – высокая чувствительность, хорошее качество воспроизведения низких частот и сравнительно небольшие размеры. Недостатки – невысокий уровень качества переходных характеристик, оценивающих моменты возникновения и исчезновения звукового сигнала.

В акустических системах *открытого типа* корпус является панелью с установленными в ней динамиками. Звук в таких системах распределяется по помещению как с фронтальной стороны, так и с тыловой. Отсутствие корпуса в колонках открытого типа минимизирует колебания, возникающие при резонансе. Системы можно располагать почти вплотную к стене, так как отсутствуют боковые распространения звука. Недостатком является низкое качество воспроизведения низких частот. Для его компенсации необходимо использовать низкочастотные динамики больших размеров.

Акустические системы *закрытого типа* – это герметичный блок, на фронтальной панели которого выведен звуковой излучатель (диффузор громкоговорителя). Акустические системы этого типа отличаются низкой чувствительностью, при этом имеют низкий уровень искажений, хорошие переходные характеристики и простую конструкцию.

Акустические системы с *пассивным излучателем* аналогичны системам с фазиинвертором, где вместо фазиинвертора в отверстие корпуса вставляется пассивный излучатель (элемент низкочастотного динамика, лишенный магнитной системы и катушки). Резонансная частота пассивного излучателя должна быть равна нижней частотной границе громкоговорителя. Это обеспечивает значительное улучшение воспроизведения низких частот. В пассивном излучателе по сравнению с фазиинвертором отсутствуют воздушные шумы в резонаторной трубе.

2.1. Классификация громкоговорителей

Громкоговорители возможно классифицировать по полосе воспроизводимых частот, по принципу действия, по способу излучения [11].

По полосе воспроизводимых частот различают низкочастотные, среднечастотные, высокочастотные и широкополосные громкоговорители.

Низкочастотные громкоговорители имеют более низкую чувствительность из-за более тяжелой подвижной системы. В связи с этим для обеспечения необходимого звукового давления в области низких частот они должны быть рассчитаны на значительную подводимую мощность (200 Вт и более). Сравнительно низкая резонансная частота (16–30 Гц), необходимая для обеспечения эффективного воспроизведения низкочастотных составляющих сигнала, требует высокой линейности упругих характеристик гибких элементов вплоть до больших смещений подвижной системы (до ± 12 –15 мм). Низкочастотные громкоговорители должны иметь гладкую амплитудно-частотную характеристику до верхней границы воспроизводимого ими диапазона частот (1500–3000 Гц).

Среднечастотные громкоговорители воспроизводят частоты от 200–800 Гц до 5–8 кГц, где чувствительность слуха ко всем видам искажений максимальна. Субъективные пороги восприятия практически всех видов искажений достигают минимума в области 1–3 кГц. Кроме того, именно на область средних частот приходится максимум спектральной плотности мощности музыкального сигнала. Поэтому требования к качеству воспроизводимого ими звука максимальны.

Широкополосные громкоговорители имеют два конструктивных исполнения:

а) полностью бумажный диффузор с дополнительным высокочастотным рупором, прикрепленным к основному диффузору;

б) коаксиальный громкоговоритель, в котором высокочастотный излучатель находится в центре основного низкочастотного диффузора.

По способу излучения громкоговорители бывают прямого действия, рупорные, ненаправленные.

В громкоговорителях **прямого действия** диффузор непосредственно преобразует колебания электромагнитной катушки в движение воздушной массы.

Рупорный громкоговоритель излучает звук через предрупорную камеру и рупор. Излучателем является диффузор. В рупорном громкоговорителе происходит согласование акустических сопротивлений головки громкоговорителя и воздуха. Поэтому излучаемая акустическая мощность велика и коэффициент полезного действия (КПД) рупорного громкоговорителя достигает 20 %, в отличие от громкоговорителя прямого излучения с КПД не выше нескольких процентов. Но при этом рупорные громкоговорители имеют высокий уровень нелинейных искажений при больших уровнях сигнала, искажения тембра за счет появления отраженных волн в рупоре. Кроме того, для эффективного воспроизведения низких частот необходимо значительно увеличивать размеры конструкции, что заставляет использовать свернутые рупоры.

В **ненаправленных** акустических системах два абсолютно идентичных излучателя направлены навстречу друг другу попарно для каждой группы частот. При встрече одинаковых звуковых волн они начинают распространяться в радиальном направлении. В упрощенных ненаправленных акустических системах низкочастотные излучатели обычно направлены вниз, а средние и высокочастотные – вверх, но не на такой же излучатель, а на шаровидный или конический рассеиватель. При встрече с ним звуковые волны также распространяются в радиальном направлении. В этих системах не требуется определять угол разворота излучателей относительно слушателя вследствие отсутствия у них направленности. Недостатком является необходимость акустической подготовки помещений к их установке, чтобы предотвратить большое количество отражений и «размывание» акустической картины.

По принципу действия громкоговорители классифицируют на четыре основные группы: электродинамические, электростатические, электромагнитные и использующие другие принципы преобразований.

Принцип действия **электродинамического диффузорного** излучателя основывается на движении помещенного в постоянное магнитное поле проводника с протекающим через него током под действием силы Лоренца. Конструкция классического электродинамического излучателя включает следующие основные элементы (рис. 2.1): диффузор, звуковая катушка с гибкими выводами, гибкий подвес диффузора, пылезащитный колпачок, центрирующая шайба, магнитные цепи, диффузородержатель.

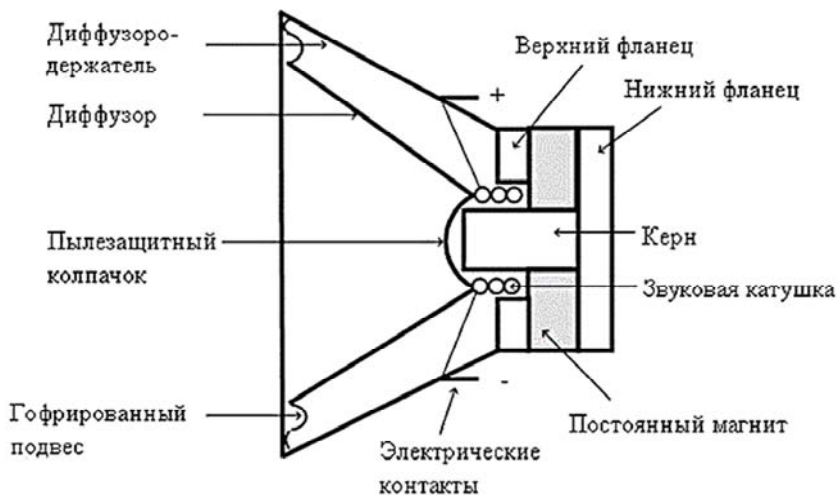


Рис. 2.1. Основные элементы конструкции электродинамического излучателя [12]

Основным рабочим узлом электродинамического громкоговорителя является диффузор, который осуществляет преобразование механических колебаний в акустические. Диффузор приводится в движение силой, действующей на жестко скрепленную с ним катушку, находящуюся в радиальном магнитном поле. В катушке течет переменный ток, соответствующий аудио-сигналу, который должен воспроизвести громкоговоритель. Магнитное поле в громкоговорителе создается кольцевым постоянным магнитом и магнитной цепью из двух фланцев и керна. Катушка под действием электродвижущей силы свободно движется в пределах кольцевого зазора между керном и верхним фланцем, а ее колебания передаются диффузору, который, в свою очередь, создает акустические колебания, распространяющиеся в воздушной среде.

Катушка находится во взвешенном состоянии в зазоре постоянного магнита и через гибкие выводы подключается к усилителю мощности. При протекании переменного тока она совершает поршневые колебания, амплитуда которых пропорциональна амплитуде протекающего переменного тока. Диффузор на гибком подвесе прикреплен к катушке и поэтому совершает те же поршневые движения, вызывая колебания воздуха.

Диффузор должен обеспечивать поршневой характер колебаний в требуемом диапазоне воспроизводимых частот, а также малые амплитуды резонансов. Эффективное демпфирование этих резонансов на частотах, где они появились, достигается выбором соответствующей конфигурации диафрагмы и материала, из которого она изготовлена.

Диффузоры низкочастотных (НЧ) громкоговорителей должны быть жесткими и в то же время легкими. С целью повышения конструктивной жесткости их часто изготавливают в виде криволинейных конусообразных фигур или дуг окружностей, плавно переходящих одна в другую. Иногда для уменьшения амплитуд резонансных колебаний диафрагмы на ее поверхности используют радиальные и кольцевые ребра жесткости. В настоящее время диафрагмы низкочастотных динамиков изготавливаются из различных сложных композиций на основе натуральной длиноволокнистой целлюлозы с различными добавками, повышающими ее прочность, жесткость и демпфирующие свойства, например, волокнами шерсти, льна, углестекловолокна, графитовыми чешуйками, металлическими волокнами, влагозащитными и демпфирующими пропитками. Некоторые производители при производстве НЧ диффузоров применяют различные композиционные материалы, как правило, разработанные ранее для аэрокосмической и военной техники. К таким материалам можно отнести многослойные сотовые и вспененные металлы и др. Все чаще используются синтетические пленочные материалы на основе полиолефинов (полипропилена и полиэтилена) и композиционные материалы на основе высокомодульной ткани «кевлар». Применение таких диафрагм позволяет обеспечивать постоянство АЧХ до 1500–2500 Гц.

Диффузоры среднечастотных (СЧ) громкоговорителей изготавливаются в виде криволинейных конусообразных рупоров или в виде куполов: либо из «мягких» (пропитанные ткани, синтетические пленки, целлюлоза и т. п.), либо из «жестких» материалов (алюминиевая, титановая, бериллиевая фольга, различные их высокомодульные сплавы, например, с бором, и т. п.). «Мягкие» диффузоры отличаются меньшей чувствительностью и обеспечивают естественное по тембру звучание. Но при больших уровнях сигнала в них может возникнуть потеря динамической устойчивости и, соответственно, слышимые искажения. «Жесткие» купольные СЧ диффузоры

обеспечивают расширенный диапазон частот (до 12 кГц) при практически поршневом характере колебаний, что обеспечивает малые уровни переходных искажений и чистое звучание.

В высокочастотных (ВЧ) громкоговорителях используются купольные диафрагмы диаметром 15–40 мм, так как применение конусных диафрагм в этой области частот сопровождается появлением собственных резонансных колебаний, значительно ухудшающих как объективные характеристики, так и звучание. Диффузоры ВЧ громкоговорителей изготавливаются из тех же «мягких» или «жестких» материалов, как и СЧ громкоговорителей – соответственно, горячим прессованием или штамповкой с электронно-вакуумным напылением. В качестве материалов используются алюминий, титан (иногда даже с напыленным слоем золота), бериллий и др. Номинальная подводимая мощность некоторых ВЧ-излучателей достигает 100 Вт и более, а чувствительность – 100 дБ. Для улучшения теплоотвода в некоторых конструкциях купол и каркас звуковой катушки изготавливаются как единая деталь из одного материала (например, алюминиевой фольги). Наряду с купольными диффузорами в ряде моделей применяются плоские или U-образные кольцевые диффузоры. Такие излучатели применяются, например, в концертно-театральной аппаратуре.

В ВЧ громкоговорителях для выравнивания АЧХ и диаграммы направленности дополнительно используются так называемые «акустические линзы» (эквализаторы, концентраторы), устанавливаемые перед диффузором.

Параметры *звуковых катушек* должны быть выбраны по значениям требуемого входного электрического сопротивления и подводимой мощности, так как имеется количественная связь между диаметром катушки и рассеиваемой ею тепловой энергией. Например, звуковые катушки диаметром 25 мм способны без применения особо термостойких и теплоотводящих материалов выдерживать долговременную электрическую мощность до 25 Вт, а катушки диаметром 50 мм – до 100 Вт. Для увеличения термической прочности применяются термостойкие материалы (клеи, изоляция проводов, каркасы) и различные конструктивные меры для более эффективного отвода выделяющегося тепла в окружающую среду. К таким мерам относятся вентиляционные отверстия в каркасах катушек и магнитных цепях, тепловые трубки, теплопроводящие каркасы и даже полупроводниковые холодильники.

Часто в НЧ громкоговорителях для уменьшения нелинейных гармонических искажений, возникающих из-за нелинейности и несимметричности магнитного поля, применяются звуковые катушки, высота которых в две раза превышает высоту рабочего зазора магнитной цепи. Обычно звуковые катушки наматываются в два слоя, хотя встречаются конструкции и с четырьмя слоями. При этом для намотки используются кабели круглого, квадратного и даже плоского сечения. Последние две формы обеспечивают более высокую плотность заполнения рабочего зазора проводом, что повышает КПД громкоговорителя.

Если учесть, что подвижная система СЧ громкоговорителя имеет меньший ход по сравнению с НЧ, то для уменьшения нелинейных искажений, возникающих из-за нелинейности и несимметричности магнитного поля, напротив, применяются катушки с меньшей высотой рабочего зазора магнитной цепи. Это позволяет катушке в процессе работы все время находиться в наиболее равномерном и однородном поле внутри магнитного зазора.

Звуковые катушки ВЧ громкоговорителей часто наматываются более легким, по сравнению с медным, алюминиевым или серебряным плоским проводом. Это позволяет увеличить уровень звукового давления на несколько децибел в области верхней граничной частоты.

Гибкие выводы предназначены для подвода электрических сигналов к звуковой катушке. Они подвергаются значительным переменным механическим нагрузкам. Одновременно их гибкость должна быть выше гибкости подвеса и центрирующей шайбы, чтобы не влиять на резонанс громкоговорителя и не являться источником призвуков. Выводы изготавливают из многожильных медных или серебряных проводов, в состав нитей которых вплетаются хлопчатобумажные или синтетические составляющие. Крепление гибких выводов к диффузору осуществляется пришиванием нитками припаиванием к металлическим заклепкам на диффузоре с последующей заливкой мест соприкосновения с диффузором различными вибродемпфирующими материалами, в том числе натуральными латексами. Места пайки гибких выводов к клеммам необходимо защитить амортизаторами.

Подвес должен обладать достаточной гибкостью, низкой резонансной частотой, устойчивостью к различным климатическим условиям, обеспечивать плоскопараллельный характер движения

всей подвижной системы в обе стороны во всем диапазоне возможных амплитуд и поглощение энергии собственных резонансных колебаний подвижной системы.

В низкочастотных и среднечастотных излучателях преимущественно используются подвесы с полутораидальным, синусоидальным или S-образным профилем. Их изготавливают из резины, пенополиуретана, прорезиненных тканей. При этом используются специальные демпфирующие пропитки и покрытия. Подвесы высокочастотных громкоговорителей обычно изготавливают из того же материала, что и диффузор. Их профиль плоский или синусоидальный. Чтобы избежать возникновения резонансных колебаний объема под диафрагмой, подвес ВЧ диффузоров заполняется демпфирующим материалом.

Колпачок защищает рабочий зазор магнитной цепи от попадания пыли. Он также выполняет функции кольцевого ребра жесткости и излучающего элемента для формирования высокочастотной части АЧХ громкоговорителя. Жесткость колпачков обеспечивается в основном куполообразной формой. Их изготавливают из композитных материалов, содержащих целлюлозу, синтетических пленок, тканей с пропитками. В мощных НЧ громкоговорителях часто используют колпачки из алюминиевой фольги для отвода тепла от звуковой катушки.

Центрирующие шайбы должны удерживать звуковую катушку в центре магнитного зазора. Они должны обеспечивать стабильность резонансной частоты в условиях больших динамических и температурных нагрузок, линейность упругих характеристик при больших смещениях подвижной системы, предотвращать смещения звуковой катушки в радиальном направлении, «провисание» подвижной системы и т. д.

Форма шайб плоская, с косинусоидальным профилем, содержащим от 5 до 11 периодов, тангенциальная или более сложная. Материалом являются натуральные ткани (миткаль, бязь и т. д.), пропитанные бакелитовым лаком, а также синтетические, основа которых содержит полиамид, полиэстер, нейлон и т. д. Для теплоотвода в материал шайб возможно вплетать алюминиевые или медные нити, соединенные с каркасом звуковой катушки и диффузордержателем. В мощных громкоговорителях центрирующие шайбы могут отсутствовать.

Магнитные цепи должны обеспечивать максимально возможный КПД громкоговорителя и минимизацию нелинейных искажений,

обусловленных несимметричностью и неоднородностью магнитного поля в рабочем зазоре и за его пределами. Они включают магнит, керн, нижний и верхний фланцы.

В магнитных цепях высококачественных динамиков для снижения нелинейных искажений используют следующие способы:

- достижение симметрии магнитного поля за пределами рабочего зазора за счет применения кернов Т-образной формы;
- уменьшение влияния переменного магнитного поля от звуковой катушки на постоянное магнитное поле цепи за счет применения фланцев и кернов с многослойными вставками;
- короткое замыкание цепей за счет наличия колпачков или колец на керне и на внутренней поверхности верхнего фланца;
- уменьшение неоднородности магнитного поля за счет специальных профилей рабочего зазора и т. д.

Магнитные цепи изготавливают из феррит-бариевых, кобальтосодержащих сплавов, сплава неомакс, содержащего неодим-железобор. Для уменьшения полей рассеивания магнитная цепь может помещаться в металлический экран или дополняться вторым магнитом, имеющим противоположную намагниченность.

Для эффективного отвода тепла и повышения демпфирования звуковой катушки используют ферромагнитную жидкость (суспензию с магнитными частицами). При воздействии постоянного магнитного поля упорядоченное положение магнитных частиц предотвращает вытекание жидкости из зазора. Так как магнитная жидкость имеет теплопроводность почти в пять раз большую, чем воздух, тепло от катушки отводится более интенсивно, в результате чего возможно увеличить подводимую мощность. Ферромагнитная жидкость также обеспечивает механическое демпфирование и уменьшение искажений.

Диффузородержатель предназначен для поддержания, соединения элементов подвижной системы и магнитной цепи, а также для закрепления громкоговорителя в корпусе. Он не только обеспечивает устойчивость громкоговорителя к механическим воздействиям, но и не допускает смещения массивной магнитной цепи относительно основной оси (нарушения симметричности), а также устраняет собственные резонансы в области 200–600 Гц.

Чтобы предотвратить появление воздушной подушки позади диффузора, в нем должны быть окна соответствующих размеров

между ребрами. Диффузодержатели изготавливают главным образом из алюминиевых сплавов.

Электродинамические громкоговорители имеют широкую диаграмму направленности, широкий частотный диапазон, приемлемый уровень звукового давления [12], что позволяет применять их для решения самого широкого класса задач – от музыкальной трансляции до аварийного оповещения. Недостаток – низкий КПД: единицы в процентном выражении.

Электростатический громкоговоритель – это громкоговоритель, в котором преобразование электрического сигнала в колебания воздуха осуществляется с помощью мембраны, помещенной в электростатическое поле. Известны три разновидности электростатических громкоговорителей: конденсаторные, электретные и пьезоэлектрические.

Конденсаторный громкоговоритель (рис. 2.2) имеет две обкладки, разделенные диэлектриком, одна из которых – массивное основание, а другая – легкая и подвижная пленка [11]. При подаче постоянного напряжения осуществляется первоначальное натяжение пленки. При подаче переменного напряжения пленка начинает натягиваться и ослабляться, создавая вместе с тем колебания воздуха.

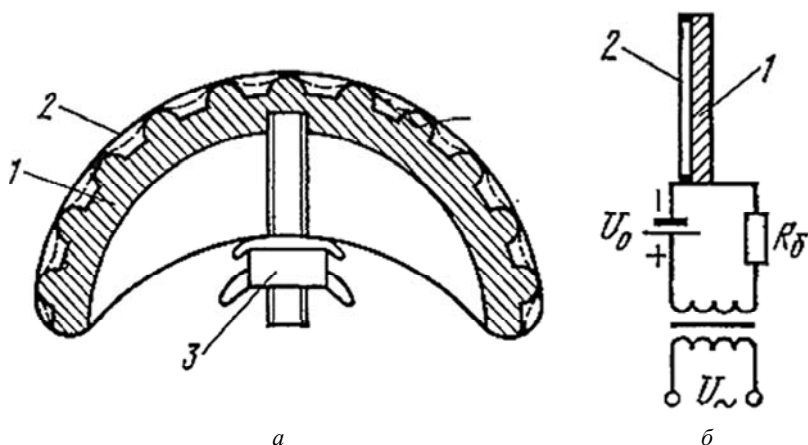


Рис. 2.2. Конденсаторный громкоговоритель:
a – конструкция; *б* – схема подключения;
1 – массивный электрод; 2 – гибкий электрод с изоляцией;
3 – натягивающий винт [13]

Конденсаторные излучатели обладают очень высокой линейностью всех характеристик, что обеспечивает ровную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и гораздо меньший, по сравнению с электродинамическими излучателями, коэффициент нелинейных искажений. Однако такой излучатель должен иметь большую емкость для эффективного воспроизведения низких частот, а емкость напрямую связана с размерами его обкладок. Конструкции низкочастотных электростатических излучателей имеют большие размеры и, соответственно, стоимость. Поэтому их используют в основном для воспроизведения высокочастотных составляющих.

Электретные громкоговорители отличаются от конденсаторных наличием заранее наэлектризованной электретной пленки, поэтому им не требуется поляризующего напряжения. Со временем электретная пленка теряет свои свойства и требует замены либо повторной поляризации.

В **пьезоэлектрических** громкоговорителях используются пьезокерамические или сегнетовые пластины, край которых соединяется с диффузором. Наличие диффузора приводит к увеличению неравномерности АЧХ и нелинейных искажений. Пьезокерамические громкоговорители имеют низкую чувствительность, а содержащие сегнетовую соль чувствительны к климатическим условиям и воздействиям внешней среды.

Нижняя частотная граница АЧХ электростатических громкоговорителей определяется геометрическими размерами излучателя, а верхняя может превышать 20 кГц.

Достоинством электростатических громкоговорителей является высокое качество звука, а недостатками – высокая стоимость, большие размеры и масса.

На рис. 2.3 представлен внешний вид электростатической акустической системы ElectroMotion ESL.

Принцип действия **электромагнитного громкоговорителя**, как и электродинамических систем, основан на перемещении проводника в переменном магнитном поле, но в нем колеблется не катушка с диффузором, а ферромагнитный элемент. При этом магнитное поле создается системой, содержащей постоянный магнит с надетами на магнитопровод катушками.

Варианты схем электромагнитного громкоговорителя представлены на рис. 2.4.



Рис. 2.3. Внешний вид электростатической акустической системы ElectroMotion ESL [14]

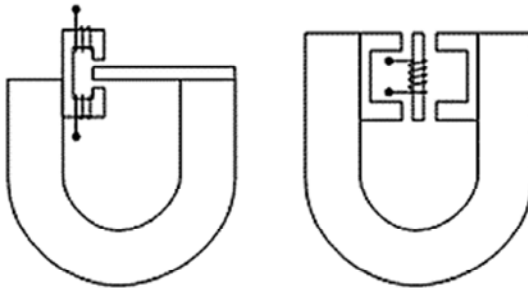


Рис. 2.4. Варианты схем электромагнитного громкоговорителя [11]

Недостатком электромагнитных громкоговорителей является значительное рассеивание магнитного потока и малое значение магнитной индукции, обусловленное замыканием потока через тело постоянного магнита с невысокой проницаемостью. Эти громкоговорители имеют ограниченную область применения (звонки, гудки), так как по своим качественным показателям значительно уступают электродинамическим.

Четвертая классификационная по принципу действия группа громкоговорителей (объединяющая громкоговорители **других принципов действия**) включает ленточный, изодинамический, ортодинамический громкоговорители, излучатель Хейла, ионофон, пневматический излучатель, NXT излучатель и излучатель на основе нанотрубок.

Принцип действия **ленточного** излучателя заключается в колебании под действием силы Лоренца легкой металлической ленты, обычно гофрированной, помещенной между полюсами постоянного магнита, при протекании через нее переменного тока (рис. 2.5).

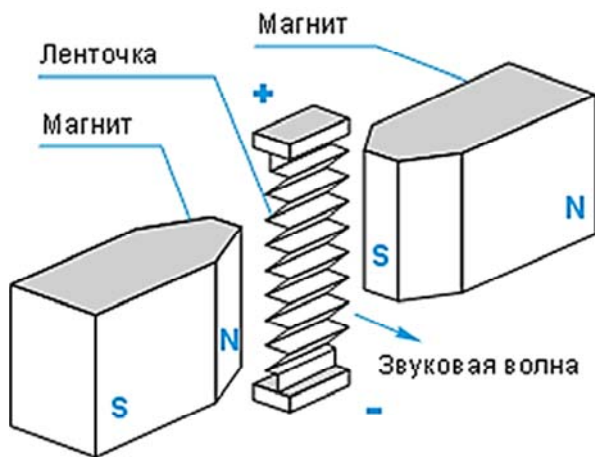


Рис. 2.5. Схема ленточного громкоговорителя [11]

Ленточные громкоговорители обладают большой чувствительностью, так как легкая лента значительно смещается при малом протекающем в ней токе. Их входное электрическое сопротивление мало из-за большой ширины ленты. Поэтому их надо применять

совместно с трансформаторами для согласования с усилителями мощности. Лента обычно гофрируется для увеличения гибкости и устранения нежелательных резонансных колебаний. Для уменьшения резонансов воздушной полости позади ленты производится ее заполнение поглощающими материалами.

Достоинствами ленточных громкоговорителей являются равномерная АЧХ (отсутствие резонансов), малый уровень нелинейных искажений, возможность подвода значительной мощности (большая площадь ленты обеспечивает быстрое охлаждение), а также широкая диаграмма направленности в горизонтальной плоскости и узкая в вертикальной (последнее помогает избежать нежелательных отражений от потолка и пола).

Недостаток – сложность изготовления магнитов с требуемой однородностью и симметричностью магнитного поля в зазоре.

На рис. 2.6 показан внешний вид ленточного громкоговорителя в акустической системе ELAC.



Рис. 2.6. Внешний вид ленточного громкоговорителя в акустической системе ELAC [15]

Принцип действия **изодинамического** громкоговорителя заключается в колебании мембраны из майлара с нанесенными на нее проводящими дорожками под действием силы Лоренца. Магнитная система для таких излучателей имеет сложную форму и представляет две перфорированные пластины, на которых установлены стержневые магниты (рис. 2.7).

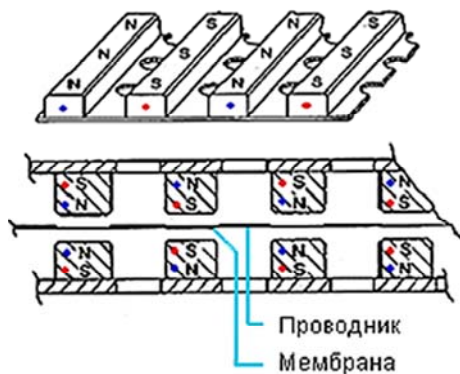


Рис. 2.7. Схема изодинамического громкоговорителя [16]

Полюса на пластинах чередуются, поэтому между соседними фрагментами пластины создается магнитный зазор. На тонкую майларовую мембрану нанесены проводящие дорожки в форме меандра. Переменный ток, протекающий по этим дорожкам, создает электромагнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем в зазоре и вызывает колебание мембраны. Звук распространяется в окружающее пространство через перфорации в пластинах.

Преимущество изодинамических громкоговорителей – малые нелинейные искажения, высокая чувствительность и большой динамический диапазон.

На рис. 2.8 показан внешний вид изодинамического громкоговорителя.

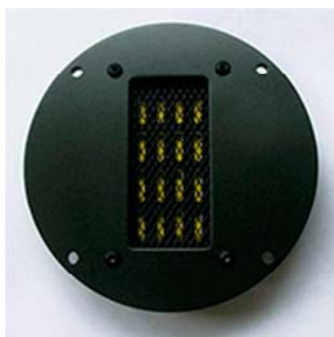


Рис. 2.8. Внешний вид изодинамического громкоговорителя [16]

Принцип действия **ортодинамических** громкоговорителей аналогичен принципу действия изодинамических. Отличие заключается в конструкции магнитной системы и мембраны. Магнитная система состоит из двух перфорированных дисковых магнитов, которые намагничены таким образом, что образуют на поверхности концентрические кольца с чередующимися полюсами (рис. 2.9).

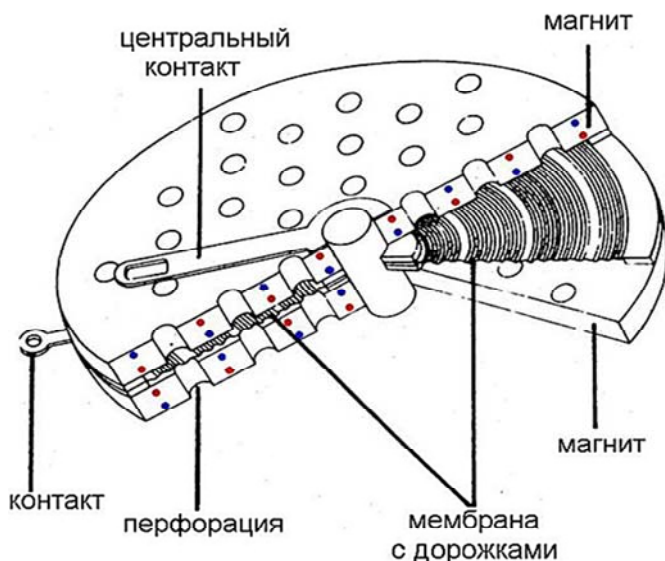


Рис. 2.9. Схема ортодинамического громкоговорителя [17]

В магнитный воздушный зазор помещается круглая майларовая мембрана с нанесенной на нее в виде спирали проводящей дорожкой. Один ее контакт находится по центру, а другой – на краю излучателя. При протекании переменного тока создается электромагнитное поле, которое взаимодействует с полем в магнитном зазоре и вызывает колебания мембраны. Иногда для увеличения чувствительности мембрана гофрируется (рис. 2.10).

Ортодинамические громкоговорители обладают теми же достоинствами, что и изодинамические, и дополнительно отличаются более широким диапазоном воспроизводимых частот.

Внешний вид ортодинамического излучателя представлен на рис. 2.11.



Рис. 2.10. Внешний вид гофрированной майларовой мембраны в ортодинамическом громкоговорителе [17]



Рис. 2.11. Внешний вид ортодинамического излучателя [17]

По принципу действия **громкоговоритель Хейла** аналогичен изодинамическому, так как имеет такую же магнитную решетку. Отличие заключается в ориентации гофрированной мембраны с проводящими дорожками относительно магнитной решетки (рис. 2.12).

Эти дорожки на мембране, по сравнению с изодинамическим громкоговорителем, находятся в другой плоскости. Поэтому сила Лоренца (вектор \mathbf{A} на рис. 2.12), действующая на них, перемещает складки мембраны не вертикально, а вдоль горизонтальной плоскости. Поскольку направление тока для соседних складок противоположное, то при протекании тока они с одной стороны притягиваются, а с другой – отталкиваются. При изменении знака приложенного напряжения начинается обратный процесс. Поэтому полости между складками то засасывают, то выталкивают воздух, образуя звуковую волну. Этот процесс аналогичен возникновению звукового сигнала в гармонии.

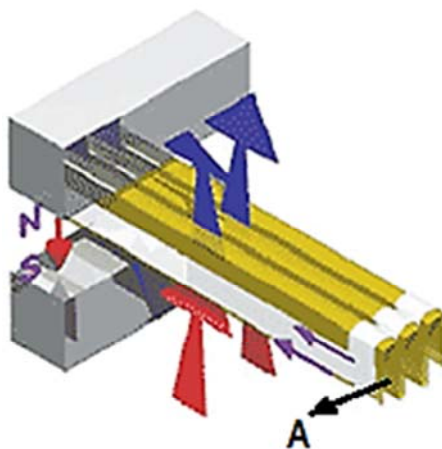


Рис. 2.12. Схема громкоговорителя Хейла [18]

Такая конструкция дает возможность увеличить площадь мембраны и, как следствие, повысить чувствительность громкоговорителя Хейла по отношению к чувствительности изодинамического громкоговорителя.

Составные элементы конструкции громкоговорителя Хейла представлены на рис. 2.13.

Преобразователем электрического сигнала в колебания воздуха в **ионофоне** являются электроды с воздушным зазором между ними. При приложении высокого переменного напряжения около 10 кВ с частотой 20–30 МГц между электродами происходит ионизация.

Объем ионизированного воздуха изменяется в соответствии с амплитудой переменного напряжения, что приводит к возникновению звукового сигнала. Схема ионофона представлена на рис. 2.14.

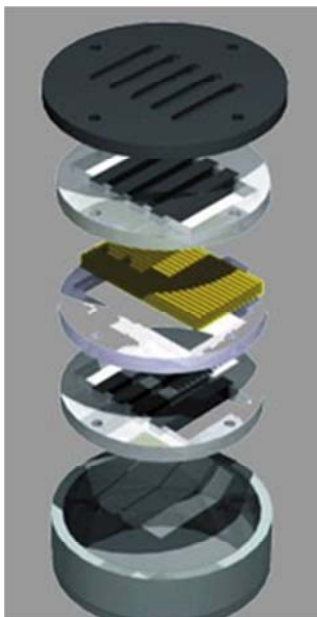


Рис. 2.13. Составные элементы конструкции громкоговорителя Хейла [18]

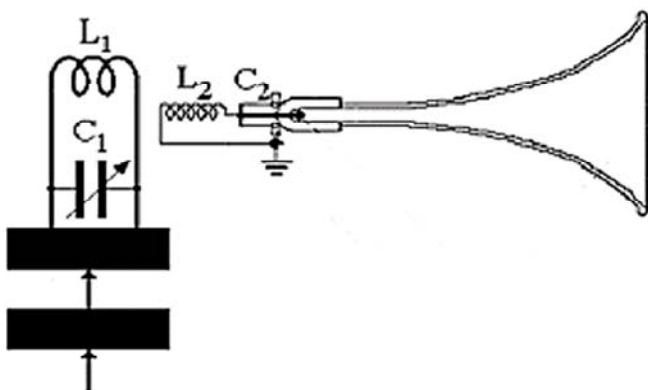


Рис. 2.14. Схема ионофона [19]

В ионофоне основной подвижной системой является воздух, поэтому в нем отсутствуют переходные искажения и резонансы. Амплитудно-частотная характеристика равномерна в области широкого диапазона частот. Применение ионофона ограничивают существенные недостатки: во-первых, при его эксплуатации используется высокое напряжение, во-вторых, ионизация приводит к синтезу озона, который является канцерогеном.

В **пневматическом** громкоговорителе звук создается модуляцией потока сжатого воздуха. Его конструкция содержит компрессор, емкость со сжатым газом, модулятор и рупор. Громкоговоритель обеспечивает высокую акустическую мощность (до 2000 Вт), узкий диапазон частот (2,5–3,5 кГц), а также значительный уровень собственных шумов и нелинейных искажений. Это обусловило ограниченность области применения пневматических громкоговорителей воспроизведением специальных сигналов.

НХТ громкоговоритель представляет собой комбинацию плоской панели и одного или нескольких электродинамических, пьезо-керамических, пневматических или других преобразователей «электрический сигнал – перемещение» [20]. Вместо динамика используется достаточно плотная панель, мембрана. Если к ней приложить источник возбуждения акустического диапазона, то в материале мембраны от места приложения силы распространяются колебания. Волна колебаний, распространившись до края мембраны, отражается и возвращается, образуя стоячие волны. Процесс определяется скоростью распространения волны в материале мембраны. Различные частоты вынуждающих колебаний приводят к возникновению стоячих волн с разными частотами и разным пространственным расположением максимумов и минимумов. В результате каждая зона панели начинает излучать в определенном частотном диапазоне, причем мембрана синфазно и когерентно излучает одинаковые сигналы в обе стороны.

НХТ громкоговоритель обладает двумя достоинствами. Во-первых, акустическое короткое замыкание (эффект взаимного подавления встречных звуковых волн) отсутствует, т. е. не требуется большой корпус для размещения громкоговорителя. Во-вторых, падение акустического давления обратно пропорционально расстоянию до акустической системы, а не квадрату расстояния, как в традиционных системах, т. е. **НХТ** может создать в определенной точке пространства

требуемый уровень звука при меньшей подводимой электрической мощности.

Недостатки – узкая полоса воспроизводимых частот и отсутствие возможности локализовать источник звука.

В настоящее время ведутся разработки излучателей **на нанотрубках**.

В 2008 году китайские исследователи под общим руководством Кайли Цзян обратили внимание на то, что лист из нанотрубок издает звук под воздействием переменного тока [21]. Звук появлялся вследствие быстрого нагревания листа, т. е. термоакустического процесса. Используемая в качестве излучателя пленка не двигалась. Максимальная температура листа при подаче сигнала номинальной мощностью 12 Вт составила 80 °С. По утверждениям Кайли Цзян, существует возможность создать аналогичные громкоговорители с менее высокой температурой, но это не было реализовано в рамках эксперимента.

В ходе описанных экспериментов было зафиксировано, что излучатель позволяет генерировать звук с диапазоном частот и уровнем звукового давления, достаточным для применения в современной портативной и стационарной акустической технике. Кроме того, прототип обладал впечатляюще низким уровнем гармонических искажений.

Также прозрачный и гибкий лист из нанотрубок можно деформировать без существенного ущерба для качества звукоизлучения. По экспериментальным данным, при растяжении пленки на 200 % от исходной площади сигнал практически не изменился. Пленка из нанотрубок, размещенная на цилиндрическом каркасе, позволяет излучать звук одинаковой интенсивностью во все стороны.

Внедрение таких акустических систем в практику пока ограничивается высокой стоимостью нанотрубок.

Используя пленку из нанотрубок в качестве мембраны, американский исследователь русского происхождения М. Козлов из Техасского университета разработал громкоговоритель, который использовал термоакустический эффект и традиционный принцип динамического драйвера [21]. Лист углеродной нанотрубки размещен между проводящими стержнями рядом с постоянным магнитом. При электрическом возбуждении тепловой отклик материала сочетается с колебаниями листа, вызванными электромагнитным действием силы Лоренца. В результате система позволяет получить

гибридное термомагнитное излучение звуковых волн с хорошими амплитудными характеристиками и невысоким уровнем искажений.

Цифровые громкоговорители непосредственно преобразуют цифровой сигнал в акустический [22]. В этом случае возможно упростить электрическую схему, убрав из нее цифроаналоговый конвертер, фильтр, усилитель, кроссовер и увеличить КПД за счет отказа от традиционного преобразователя «электрический сигнал – звук». Общая концепция этих громкоговорителей заключается в дифференциации поверхности излучателя или обмотки катушки индуктивности и возбуждении этих дифференцированных участков таким образом, чтобы площади участков, длина обмотки либо количество участков излучателя или катушки зависели от разрядности сигнала. В 2002 году на выставке в Лас-Вегасе компания 1.limited продемонстрировала систему The Digital Sound Projector с цифровым громкоговорителем [22]. Система обеспечивала воспроизведение 8-битного бинарного сигнала и КПД 10 %.

В настоящее время информация о серийном выпуске акустических систем с цифровым громкоговорителем отсутствует.

2.2. Параметры громкоговорителей

Нормируемые параметры акустических систем [23–25] во многом подобны соответствующим параметрам микрофонов.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) громкоговорителя – зависимость напряжения на выходе громкоговорителя от звукового давления на его входе в номинальном диапазоне частот. По графику АЧХ громкоговорителя определяются параметры, позволяющие количественно оценить его качество. На рис. 2.15 приведена схема измерений АЧХ громкоговорителя традиционным аналоговым способом.

Методы измерений громкоговорителей с использованием цифровой техники основаны на прямых измерениях их импульсных реакций с последующей цифровой обработкой, что дает возможность с помощью преобразования Фурье получить расчетным путем амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики.

Эффективно воспроизводимый диапазон частот – диапазон, в пределах которого уровень звукового давления снижается на некоторую заданную величину по отношению к уровню среднего

звукового давления, усредненному в некотором диапазоне частот. В современной студийной аппаратуре и аппаратуре высшего класса High-End спад составляет 3 дБ в частотном диапазоне 20–20 000 Гц.

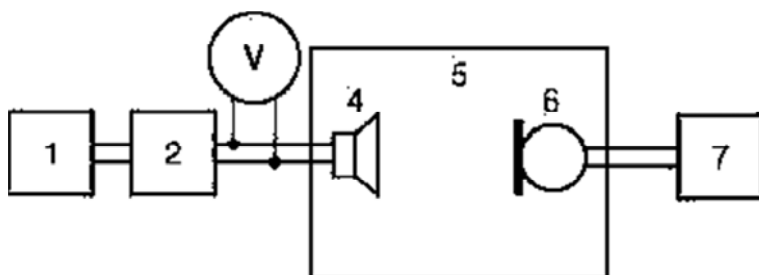


Рис. 2.15. Схема измерений АЧХ громкоговорителя:

- 1 – установка автоматической записи; 2 – усилитель низких частот;
3 – вольтметр; 4 – испытуемый громкоговоритель; 5 – заглушенная камера;
6 – измерительный микрофон; 7 – микрофонный усилитель [23]

Неравномерность АЧХ – разница между максимальным значением уровня звукового давления и минимальным или между максимальным и средним внутри эффективно воспроизводимого диапазона частот. В лучших моделях она составляет ± 2 дБ.

В акустической аппаратуре для стереовоспроизведения нормируется расхождение АЧХ в стереопаре (обычно 2 дБ в диапазоне 250–8000 Гц).

Для оценки фазочастотных искажений используется **групповое время задержки**, представляющее собой производную фазочастотной характеристики по частоте.

Переходные искажения определяют характер процесса нарастания и спада воспроизводимых сигналов. Методика измерений этих искажений в заглушенной камере практически совпадает с методами измерения АЧХ, только выполняется на других видах испытательных сигналов. По осциллограммам на резонансной частоте можно определить такие параметры переходного процесса, как *логарифмический декремент затухания* (логарифм отношения амплитуд предыдущей волны к последующей) и *время затухания*, в течение которого амплитуда сигнала падает до 0,1 начального значения.

В настоящее время для более полной оценки акустических систем используют **кумулятивный спектр**, характеризующий процесс

затухания амплитуды звукового сигнала на разных частотах в разные моменты времени. Эта характеристика позволяет определить наличие задержанных резонансов в системе. Его рассчитывают, применяя преобразование Фурье к отдельным частям импульсной характеристики. Графически он представляет собой зависимость уровня звукового давления от временной частоты и от времени. Пример графика кумулятивного спектра показан на рис. 2.16.

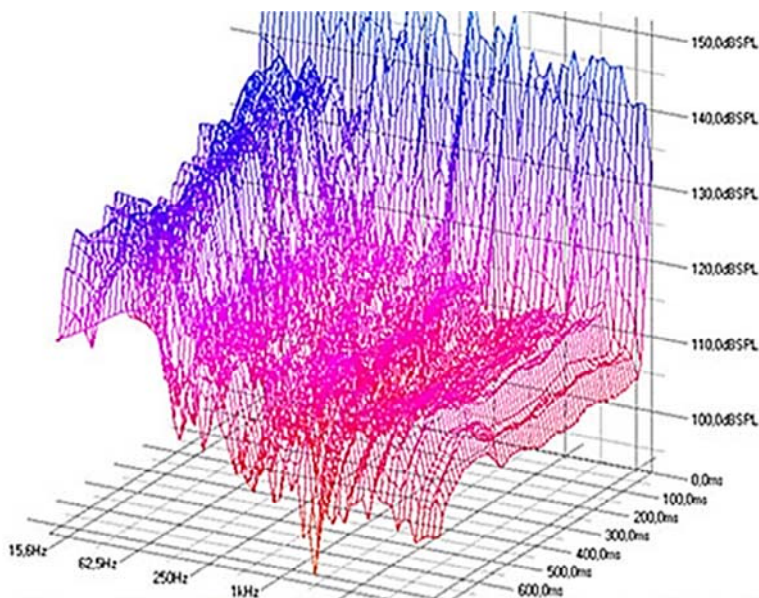


Рис. 2.16. Пример графика кумулятивного спектра [26]

Для оценки зависимости параметров громкоговорителя в функции направления излучения используются характеристика направленности и частотная характеристика акустической мощности.

Характеристика направленности – это зависимость уровня звукового давления от частоты и от угла между опорной осью и измеряемой осью в условиях свободного поля в различных заданных плоскостях (измеряемая ось – линия, соединяющая микрофон и измеряемый источник звука). Измерение этой характеристики возможно ранее описанными аналоговым и цифровым методами при относительном повороте громкоговорителя и измерительного микрофона.

С учетом направленности АЧХ громкоговорителя является функцией трех переменных: частоты и двух углов (азимутального и меридионального). В этом случае графики АЧХ возможно представить тремя способами: в виде полярной диаграммы, построенной в определенной плоскости для фиксированного значения АЧХ (рис. 2.17, а), двумерного графика АЧХ в определенной плоскости (рис. 2.17, б), трехмерной диаграммы для фиксированного значения АЧХ (рис. 2.17, в).

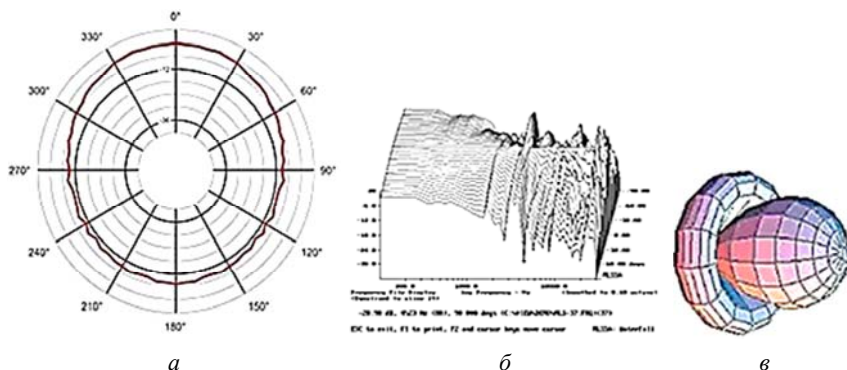


Рис. 2.17. Примеры графиков АЧХ громкоговорителя с учетом направленности: а – в виде полярной диаграммы, построенной в определенной плоскости для фиксированного значения АЧХ; б – двумерного графика АЧХ в определенной плоскости; в – трехмерной диаграммы для фиксированного значения АЧХ [24]

На основании характеристики направленности возможно определить ряд параметров.

Коэффициент направленности – отношение звукового давления, измеренного под заданным углом относительно рабочей оси, к звуковому давлению на рабочей оси для одной и той же частоты (полосы частот) и при одном и том же расстоянии от рабочего центра громкоговорителя.

Индекс направленности – 20-кратный десятичный логарифм коэффициента направленности.

Угол излучения – угол, в пределах которого значение индекса направленности падает менее чем на 10 дБ.

Угол покрытия или *ширина луча при спаде 6 дБ* определяется по записанной полярной диаграмме как угол, в пределах которого

уровень звукового давления у главного лепестка диаграммы снижается на 6 дБ по отношению к уровню на оси.

Обычно индекс направленности существенно возрастает с частотой, а угол покрытия уменьшается, при этом их значения и характер зависимости от частоты существенно различаются в вертикальной и горизонтальной плоскостях [24].

Акустическая мощность на определенной частоте определяется как функция, пропорциональная квадрату усредненного звукового давления, измеренному в разных точках пространства. В зависимости от методики измерения могут производиться как в свободном, так и в заглушенном поле.

С использованием акустической мощности рассчитываются еще два параметра, характеризующие пространственное распределение звуковой энергии, генерируемой громкоговорителем.

Коэффициент осевой концентрации пропорционален отношению квадрата звукового давления, измеренного на оси системы, к ее акустической мощности на этой же частоте (давление должно измеряться в тех же условиях, что и акустическая мощность, т. е. в свободном или реверберирующем поле).

Индекс осевой концентрации в одной из двух методик определения рассматривается как 10-кратный десятичный логарифм коэффициента осевой концентрации.

На основании измеренных или рассчитанных значений акустической мощности можно определить *коэффициент полезного действия* (КПД), т. е. отношение излучаемой акустической мощности к подводимой электрической мощности при измерениях на заданной частоте или полосе частот. Все электродинамические громкоговорители прямого излучения и, соответственно, акустические системы с ними имеют чрезвычайно низкий КПД (<1 %). Исключение составляют узкогорлые рупорные громкоговорители с КПД до 10 % [24].

В громкоговорителях имеют место нелинейные искажения, проявляющиеся как новые спектральные составляющие, отсутствующие в исходном сигнале, возникающие за счет нелинейного взаимодействия приложенного напряжения со звуковым давлением. Источниками колебаний могут являться нелинейные колебания в гофрированных подвесах и диафрагме громкоговорителей, нелинейные процессы взаимодействия звуковой катушки с магнитным полем, нелинейные процессы в фазоинверторе при больших давлениях и т. д.

Чтобы оценить **нелинейные искажения** в громкоговорителях, на их вход подают **однотональные сигналы** (гармоники определенной частоты), **двухтональные** (содержащие две частоты) и **многотональные**. Каждой группе тестовых сигналов соответствуют различные количественные критерии для оценки нелинейных искажений.

При подаче на вход электрического *однотонального* сигнала с частотой F_0 на вход громкоговорителя на его выходе могут образоваться акустические ложные составляющие с частотами nF_0 , как высокочастотные ($n > 1$), так и низкочастотные ($n < 1$). АЧХ сигнала на выходе громкоговорителя с искажениями обоих типов представлена на рис. 2.18.

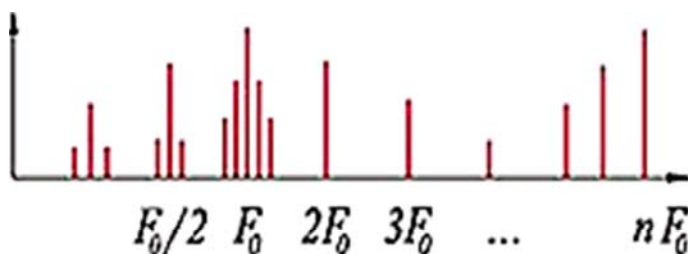


Рис. 2.18. АЧХ сигнала на выходе громкоговорителя с высокочастотными и низкочастотными искажениями [25]

В случае использования *однотонального* сигнала для количественной оценки нелинейных искажений используются четыре коэффициента. Первые два позволяют оценить вклад отдельных частотных составляющих, а два последующих – общий вклад всех ложных составляющих в совокупности.

Коэффициент гармонических искажений i -того порядка K_i определяется как отношение, выраженное в процентах (или децибелах) эффективного значения звукового давления i -той гармоники к эффективному (среднеквадратичному) значению звукового давления сигнала, содержащего частоту возбуждения и все ее гармоники.

Характеристический коэффициент гармонических искажений i -того порядка – отношение, выраженное в процентах (или децибелах) эффективного значения звукового давления i -той гармоники к среднему значению звукового давления сигнала в заданном диапазоне частот.

Полный коэффициент гармонических искажений K_Γ может определяться как среднеквадратичная сумма коэффициентов i -того порядка K_i :

$$K_\Gamma = \sqrt{\sum_2^\infty K_i^2}.$$

Аналогично определяется *полный характеристический коэффициент*, отличие состоит в том, что под знаком суммы используются не коэффициенты гармонических искажений i -того порядка, а характеристические коэффициенты гармонических искажений i -того порядка.

Двухтональные входные сигналы применяют для оценки интермодуляционных и разностных искажений.

Методы измерений интермодуляционных искажений являются часто более информативными, чем измерения на однотоновых сигналах, поскольку их можно измерять в более широком диапазоне частот, что важно для высокочастотных излучателей, заметнее на слух (поскольку могут возникать ощущения диссонансов звучания) [25].

Интермодуляционные искажения определяются как отношение арифметической суммы среднеквадратичных значений давлений всех боковых составляющих на частотах $f_2 \pm (n - 1)f_1$ к среднеквадратичному значению давления на частоте f_2 . При этом на вход излучателя подаются два сигнала с соотношением частот f_1 и f_2 , равным 1:8, и с соотношением амплитуд на частотах f_1 и f_2 , равном 1:4.

Для измерения *разностных искажений* на громкоговоритель подаются два тональных сигнала с разностью частот 80 Гц. Их используют для оценки высокочастотных громкоговорителей в области высоких частот. Для этого при измерениях узкополосным фильтром вырезаются только значения разностных компонентов в выходном сигнале и коэффициент разностных искажений определяется как отношение звукового давления на частоте 80 Гц к сумме давлений на двух исходных частотах.

Применение *многотоновых* сигналов представляет собой более информативный инструмент для оценки как гармонических, так и интермодуляционных искажений всех порядков одновременно. Применение многотонового импульса дает возможность оценить все виды искажений в полном диапазоне за одно измерение.

Новые методы измерения нелинейных искажений включают функцию когерентности, ряды Вольтерра, а также теорию нейронных сетей и NARMAX.

Значение *функции когерентности* дает общее описание всех нелинейных продуктов в выходном сигнале, она характеризует степень «подобия» выходного и входного сигналов. *Функция когерентности* на определенной частоте – отношение квадрата кросспектра (взаимного энергетического спектра) между входным и выходным сигналами на этой частоте к произведению квадратов автоспектров (энергетических спектров) входного и выходного сигналов на этой же частоте. Если преобразователь – строго линейная система, то функция когерентности равна единице. Если входные и выходные сигналы вообще не связаны друг с другом, то функция когерентности равна нулю. Если акустическая система производит нелинейное преобразование входного сигнала или вносит шумы, то функция когерентности имеет значения между нулем и единицей

Подавая на акустическую систему шумовой или многотоновой сигнал, можно с использованием *рядов Вольтерра* рассчитать ядра (т. е. импульсные характеристики разных порядков) и, сделав их спектральный анализ, определить гармонические и интермодуляционные компоненты нелинейных искажений. Метод обеспечивает наглядность представления только для нелинейностей первого и второго порядков (рис 2.19), так как уже для третьего порядка требуются четырехмерные поверхности. Кроме того, он принципиально применим лишь к малым уровням нелинейности, что не всегда выполняется, особенно в рупорных громкоговорителях.

Для оценки громкоговорителей в области низких частот введен ряд электромеханических параметров (*параметры Small-Thiele*, названные по фамилиям разработавших их ученых): активное сопротивление звуковой катушки, частоты основного резонанса, полная, электрическая и механическая добротности, эквивалентный объем, эффективная площадь излучения, максимальное смещение звуковой катушки и т. д. Некоторые из этих параметров можно определить из частотной характеристики входного электрического сопротивления [27].

Неискаженная передача динамического диапазона сигналов оценивается динамическим диапазоном сигнала и пик-фактором.

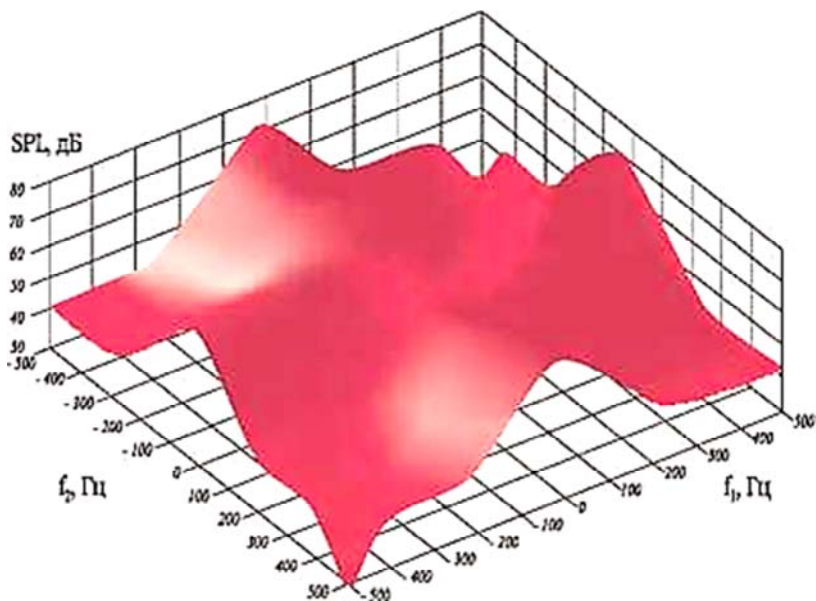


Рис. 2.19. Нелинейные искажения, определенные с помощью рядов Вольтерра второго порядка [25]

Динамический диапазон сигнала – это разность между максимальным и минимальным уровнем звукового давления.

Пик-фактор – разность между максимальным и средним уровнем звукового давления.

Под максимальным уровнем понимается уровень звукового давления, выше которого значения сигнала могут находиться не более 2 % времени для музыки и 1 % – для речи [27].

В соответствии с нормативными документами, для акустических систем указываются следующие виды **мощностей** [27]:

- *характеристическая*, при которой акустическая система (АС) обеспечивает заданный уровень звукового давления;

- *паспортная*, при которой АС может работать на специальном шумовом сигнале длительное время (обычно 100 ч) без механических и тепловых повреждений (это самый распространенный вид мощности, указываемый в технической литературе);

- *максимальная синусоидальная*, обеспечивающая возможность проведения измерений на синусоидальном сигнале в течение 1 ч.

Для согласования с усилителями введено еще два вида мощностей: *долговременная* и *кратковременная* максимальная мощность (в немецком стандарте DIN 45500 введена близкая к последней по определению мощность «*музыкальная*»), где испытания с шумовым сигналом продолжаются соответственно по 1 мин 10 раз с интервалом 2 мин и по 1 с 60 раз с интервалом 1 мин.

Значения этих мощностей могут для одной и той же акустической системы отличаться в несколько раз. Например, характеристическая мощность – 35 Вт, максимальная синусоидальная – 50 Вт, паспортная – 90 Вт, долговременная – 100 Вт, кратковременная – 150 Вт [27].

Для согласования акустических систем с усилителями мощности большое значение имеет ее **полное входное электрическое сопротивление (импеданс)**, являющееся функцией частоты (рис. 2.20).

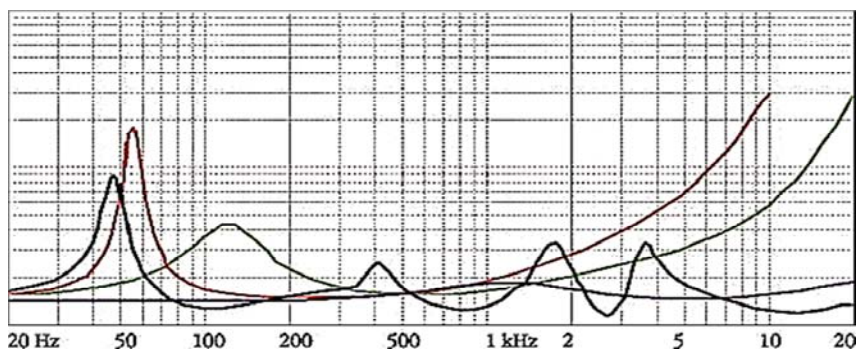


Рис. 2.20. Зависимость импеданса от частоты для акустической системы и отдельных громкоговорителей [27]

3. СТЕРЕОТЕЛЕФОНЫ

Телефоном называется электроакустический преобразователь, предназначенный для работы в условиях акустической связи с ухом [28]. **Головным телефоном** называется один или два телефона на оголовье, **стереофоническим** – двухканальный головной телефон, предназначенный для индивидуального прослушивания стереофонических записей [28]. Таким образом, стереотелефон состоит из двух телефонов, каждый из которых включает в себя преобразователь, заключенный в корпус, амбушюр, оголовье, кабель и соединитель.

Основной частью телефона является *преобразователь электрического сигнала в акустический*. *Корпус* предназначен для защиты преобразователя от повреждений, обеспечения необходимой акустической нагрузки на него и для закрепления оголовья при наличии последнего. *Амбушюром* называется деталь телефона, обеспечивающая акустическую связь телефона с ухом, которая представляет собой кольцевую прокладку из упругого материала. *Оголовье* предназначено для соединения двух телефонов и закрепления их на голове слушателя.

3.1. Классификация стереотелефонов

Стереотелефоны классифицируются по принципам преобразования электрической энергии в акустическую в используемых в них излучателях, по видам акустической нагрузки, по областям применения, по способам передачи к ним сигнала, по видам процессорной обработки и т. д. [28].

По принципам преобразования применяемые в современных телефонах излучатели могут быть разделены на следующие типы: электродинамические, электростатические, пьезоэлектрические и арматурные (с уравновешенным якорем). Принципы преобразования «электрический сигнал – звук» в первых трех группах аналогичны этим принципам в громкоговорителях.

Электродинамические преобразователи делятся на две группы: катушечные, цилиндрическая катушка которых находится в воздушном зазоре магнитной системы, и орто- и изодинамические.

Катушечные преобразователи имеют двух видов:

а) с миниатюрной магнитной системой и легкой подвижной системой;

б) на основе обычных головок громкоговорителей.

Схема электродинамического катушечного преобразователя с миниатюрной магнитной системой и с легкой подвижной системой показана на рис. 3.1.

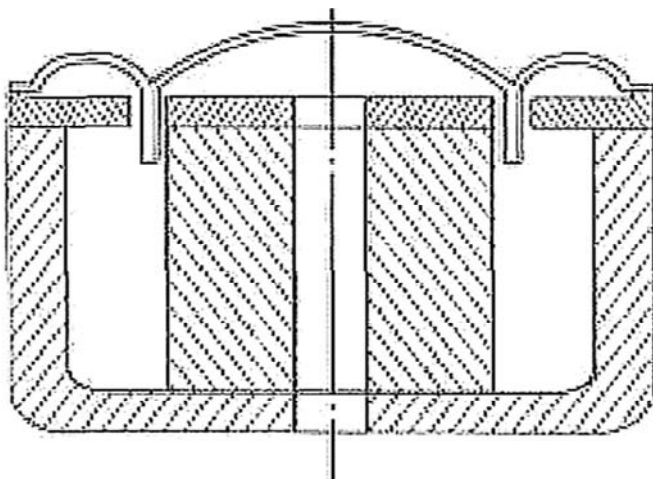


Рис. 3.1. Схема электродинамического катушечного преобразователя с миниатюрной магнитной системой и с легкой подвижной системой [28]

Арматура в *арматурных* телефонах – это ферромагнитная пластина П-образной формы (рис. 3.2).

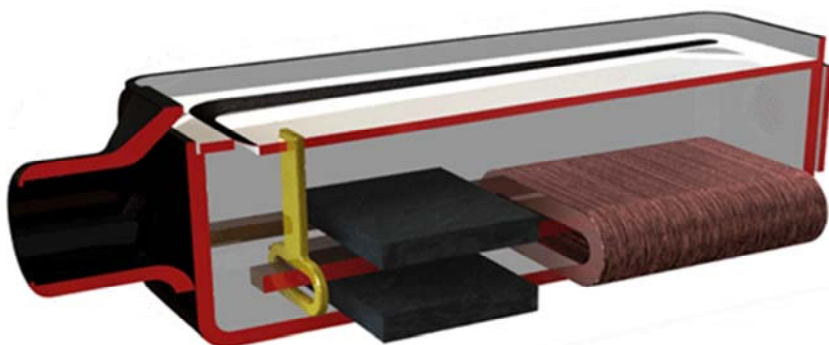


Рис. 3.2. Схема арматурного преобразователя [29]

Вокруг нее установлена катушка, под действием тока изменяющая силу притяжения арматуры к постоянным магнитам. Арматура соединена рычагом с диафрагмой, которая, совершая колебания, создает звук.

При одинаковой площади мембраны у арматурного и динамического излучателя ход мембраны меньше у арматурного, поэтому у него возможны акустические шумы на высокой громкости. Кроме того, узкая горловина, необходимая для крепления звуковода в органе слуха, увеличивает низкочастотные искажения. В настоящее время в один телефон может быть вмонтировано до 12 арматурных преобразователей [29] (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Стереотелефоны Custom с 8-ю излучателями [29]

Это рационально в концертных мониторах, где за счет большого количества излучателей обеспечивается слышимость слабых источников. В бытовой аппаратуре это увеличивает слышимость фоновых помех от источника.

Чтобы повысить качество воспроизведения арматурных телефонов на низких частотах, были созданы *гибридные* системы (рис. 3.4), где низкие частоты воспроизводятся электродинамическим излучателем, а высокие – арматурным. В гибридной системе требуется отдельная камера для динамика, поэтому эргономика такого телефона напоминает электродинамическую.



Рис. 3.4. Составляющие элементы гибридных телефонов (комбинация электродинамических и арматурных излучателей) [29]

По виду акустической нагрузки телефоны разделяются на два типа: закрытые и открытые [29] (рис. 3.5).

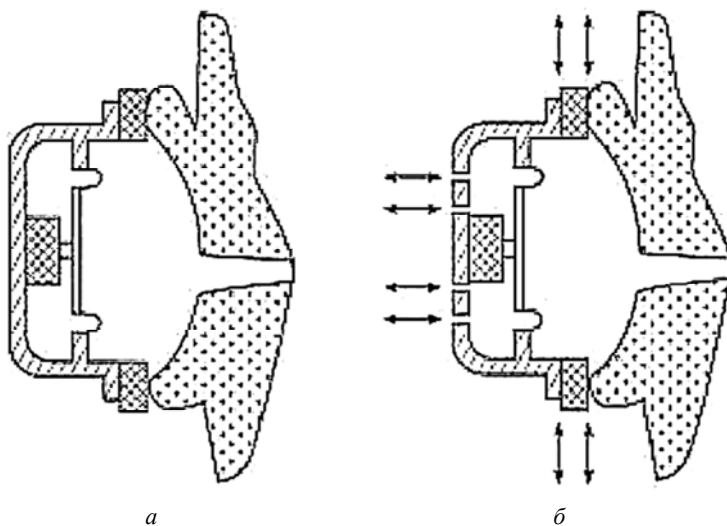


Рис. 3.5. Закрытые (а) и открытые (б) телефоны [29]

Тип акустической нагрузки определяется способом акустической связи преобразователя с ухом слушателя и окружающей средой. *Закрытые* телефоны (рис. 3.5, *а*) имеют плотные амбушюры и корпус без отверстий, т. е. они нагружены на замкнутый объем. В зависимости от формы амбушюра закрытые телефоны могут быть либо охватывающими, либо прижимными, либо вкладными. Охватывающим называется телефон, амбушюр которого охватывает ушную раковину и прижимается к голове; прижимным – телефон, прижимаемый снаружи к ушной раковине; вкладным – непосредственно вводимый в ушную раковину или слуховой канал.

Открытыми называются телефоны, электроакустический преобразователь которых сообщается с открытым пространством как со стороны уха, так и с обратной стороны. Эта связь с передней стороны обеспечивается пористым амбушюром, а сзади – отверстиями в магнитопроводе и корпусе телефона (рис. 3.5, *б*).

По областям применения стереотелефоны можно разделить на студийные для контроля качества записи, для работы с телевизионными и другими приемниками со встроенными регуляторами громкости баланса, специальные конструкции, совмещенные с микрофоном, миниатюрные для плееров и мобильных телефонов и т. д.

По способам передачи сигнала к стереотелефонам они классифицируются на проводные и беспроводные (инфракрасные и радиотелефоны).

Классификация **по видам процессорной обработки** определяется функцией обработки, например, воссоздание пространственной панорамы звука и вынос звукового образа из головы, уменьшение уровня шумов с использованием активного шумоподавления, увеличение субъективного ощущения низких частот и т. д.

3.2. Параметры стереотелефонов

Стереотелефоны, как и громкоговорители, являются преобразователями «электрический сигнал – звук», поэтому они оцениваются теми же параметрами, что и громкоговорители.

Основными указываемыми в документации параметрами стереотелефонов являются:

– **чувствительность** – уровень звукового давления, развиваемого телефоном при 1 мВт входной мощности;

– **суммарный коэффициент гармоник** при уровне звукового давления 94 дБ;

– **максимальная шумовая (паспортная) входная мощность;**

– **модуль полного электрического сопротивления (импеданс).**

В отличие от громкоговорителей, где измерение звукового давления на выходе системы с использованием измерительного микрофона не вызывает затруднений, в стереотелефонах необходимо производить измерения этого параметра внутри слухового аппарата человека, что затруднительно. Поэтому измерения звукового давления на выходе стереотелефона производятся либо тремя прямыми способами (с помощью зонда, помещенного в слуховой канал слушателя; на искусственном ухе; на искусственной голове), либо методами сравнения громкости как в свободном, так и в диффузном звуковом поле сигналов от громкоговорителя и стереотелефона, надетого на уши слушателя.

Зонд – это измерительный микрофон с насадкой в виде тонкой трубки, плотно примыкающей к приемной части микрофона. Он помещается у входа в слуховой канал испытуемого, между амбушуром телефона и выемкой ушной раковины (см. рис. 3.6). Его использование обеспечивает наиболее точные измерения амплитудно-частотной характеристики стереотелефонов.



Рис. 3.6. Зонд для измерения звукового давления на выходе стереотелефона, помещенный в слуховой канал слушателя [29]

Искусственное ухо (рис. 3.7) представляет собой камеру, состоящую из трех полостей, соединенных между собой через узкие ще-

ли и отверстия. Объемы полостей соответственно равны: $V_1 = 2,5 \text{ см}^3$, $V_2 = 1,8 \text{ см}^3$, $V_3 = 7,5 \text{ см}^3$ [29]. В искусственное ухо входит измерительный конденсаторный микрофон (приемник звукового давления). Модуль полного входного сопротивления ИУ в диапазоне частот 50–10 000 Гц соответствует модулю входного сопротивления среднего человеческого уха. В зависимости от типа стереотелефона (охватывающие, прижимные или вкладные) они по-разному устанавливаются на искусственное ухо. Звуковое давление, развиваемое телефоном в камере ИУ, преобразуется микрофоном в регистрируемое напряжение. Конструкция и акустические свойства установки «искусственное ухо», несмотря на удобство ее использования при серийном производстве телефонов, лишь приблизительно соответствуют реальным условиям размещения стереотелефонов на голове, поэтому корреляция между измеренными таким образом параметрами и субъективной оценкой качества телефонов относительно невелика [29].

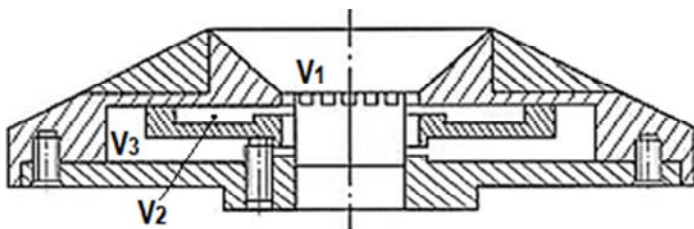


Рис. 3.7. Искусственное ухо для измерения звукового давления на выходе стереотелефона [29]

Измерения с использованием искусственной головы (рис. 1.31) являются более точными, т. к. ее геометрические параметры и физико-механические свойства ее материалов являются более близкими к голове человека, чем в искусственном ухе, однако стоимость искусственной головы намного выше.

В ряде нормативных документов предложены методы определения амплитудно-частотных характеристик стереотелефонов путем сравнения громкости сигналов от громкоговорителей и стереотелефонов как в свободном, так и в диффузном звуковом поле [29]. Схема измерения амплитудно-частотной характеристики телефонов в свободном поле методом сравнения громкостей приведена на рис. 3.8.

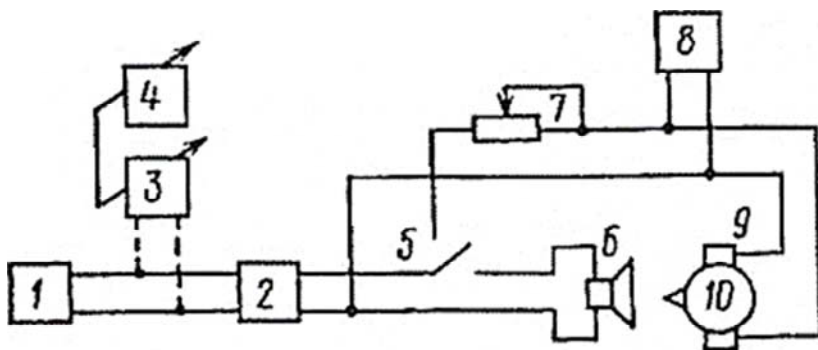


Рис. 3.8. Схема измерения АЧХ стереотелефона методом сравнения громкостей в свободном поле:

- 1 – генератор электрических колебаний; 2 – усилитель мощности;
 3 – генератор розового шума; 4 – переключаемый узкополосный фильтр;
 5 – переключатель; 6 – измерительный громкоговоритель;
 7 – регулятор уровня; 8 – вольтметр; 9 – телефон; 10 – эксперт [29]

В точку, расположенную на расстоянии 2 м от рабочей плоскости громкоговорителя по его рабочей оси, устанавливают измерительный микрофон и градуируют громкоговоритель при подведении к нему испытательного сигнала, т. е. записывают величины напряжения, при которых громкоговоритель в точке установки микрофона обеспечивает на всех частотах уровень давления 70 дБ. На телефоне эксперт устанавливает значение напряжения, чтобы различие уровней громкости, полученных воздействием звукового давления от громкоговорителя и от телефона, было минимальным. В диапазоне частот 20–630 Гц используется синусоидальный сигнал, а в диапазоне частот 630–20 000 Гц – третьоктавные полосы розового шума.

За результат измерений принимают чувствительность телефона по свободному полю, равную отношению звукового давления, создаваемого измерительным громкоговорителем на расстоянии 2 м, к напряжению, подводимому к телефону.

Кроме *прямого метода сравнения* громкости, используется еще *метод замещения*, в котором вместо громкоговорителя применяется головной телефон, заранее отградуированный по свободному полю. Методика измерения аналогична методике прямого измерения. К эталонному телефону подводят напряжения, величины которых

были установлены при сравнении последнего с громкоговорителем в свободном поле. Эксперт, попеременно надевая эталонные и испытуемые телефоны, добивается равенства громкостей обоих телефонов, регулируя подведение напряжения к испытуемому телефону.

Измерение АЧХ телефонов в диффузном поле, так же как и в свободном, может производиться двумя методами. *Прямой* метод основан на сравнении звуковых давлений, создаваемых в слуховом канале эталонным звуковым полем и головным телефоном. *Косвенный* метод использует вместо звукового поля громкоговорителя эталонный головной телефон, калиброванный по прямому методу. Измерения производятся сравнением уровней напряжения на выходе зонда, введенного в слуховой канал испытуемого, при попеременном измерении сигналов от головного телефона и громкоговорителя.

Требования к АЧХ стереотелефонов зависят от области их применения. Если стереотелефоны используются для снятия аудиограмм, их частотная характеристика должна быть максимально плоской. Если они используются для передачи обычных программ или контроля качества записей, предназначенных для передачи через стереосистемы громкоговорителей, то они должны обеспечивать такое же качество звучания, как и громкоговорители в помещении прослушивания. Чтобы стереотелефоны создавали такое же качество звука, как громкоговорители, звуковое давление у барабанной перепонки, создаваемое стереотелефоном и акустическими системами, должно быть не одинаковым на всех частотах. Эксперименты показали, что в этом случае для стереотелефонов оптимальной является не плоская АЧХ, а имеющая неравномерность до 20–22 дБ [29].

ЛИТЕРАТУРА

1. Алдошина, И. А. Микрофоны. Часть 3. Классификация микрофонов / И. А. Алдошина. – Режим доступа: <http://www.moinf.info/articles/mics-3>. – Дата доступа: 05.07.2022.
2. Алдошина, И. А. Микрофоны. Термины и определения. История / И. А. Алдошина. – Режим доступа: <http://www.moinf.info/articles/mics>. – Дата доступа: 05.07.2022.
3. Алдошина, И. А. Стереомикрофоны и микрофоны для систем Surround Sound. Часть 1 / И. А. Алдошина // Install-Pro. – 2005. – № 4 (34). – С. 82–89.
4. Алдошина, И. А. Микрофоны. Часть 4. Классификация микрофонов по видам характеристик направленности / И. А. Алдошина. – Режим доступа: <http://www.moinf.info/articles/mics-4>. – Дата доступа: 05.07.2022.
5. Алдошина, И. А. Микрофоны. Часть 2. Параметры. Методы измерения / И. А. Алдошина. – Режим доступа: <http://www.moinf.info/articles/mics-2>. – Дата доступа: 05.07.2022.
6. Алдошина, И. А. Микрофоны. Часть 5. Стереосистемы микрофонов / И. А. Алдошина. – Режим доступа: <http://www.moinf.info/articles/mics-5>. – Дата доступа: 05.07.2022.
7. Никитин, Б. Техника съема / Б. Никитин. – Режим доступа: <http://www.moinf.info/articles/pickup-tech>. – Дата доступа: 05.07.2022.
8. Алдошина, И. А. Микрофоны. Часть 6. Системы микрофонов для пространственной звукозаписи / И. А. Алдошина. – Режим доступа: <http://www.moinf.info/articles/mics-6>. – Дата доступа: 06.07.2022.
9. Громкоговорители. Методы электроакустических испытаний : ГОСТ Р 53575 – 2009. – Введ. 01.12.2010. – М. : Стандартинформ, 2011.
10. Словарь терминов: Акустические системы. – Режим доступа: <https://digital.1k.by/audio-acousticsystems-terms/>. – Дата доступа: 06.07.2022.
11. Классификация и конструкция акустических систем. – Режим доступа: https://www.arstel.com/details/proektirovanie/sound/statya-po-ozvuchivaniyu_02.php. – Дата доступа: 06.07.2022.
12. Особенности использования громкоговорителей в системах оповещения. – Режим доступа: <https://www.escortpro.ru/page/article/article103.htm>. – Дата доступа: 06.07.2022.

13. Сапожков, М. А. Электроакустика / М. А. Сапожков. – Режим доступа: https://scask.ru/j_book_ela.php?id=51. – Дата доступа: 06.07.2022.

14. Напольная акустика Martin Logan ElectroMotion ESL Gloss Black. – Режим доступа: https://hifidesign.ru/catalog/akustika/napolnaya_akustika/napolnaya_akustika_martin_logan/napolnaya_akustika_martin_logan_electromotion_esl_gloss_black/. – Дата доступа: 06.07.2022.

15. Семейкин, М. Твитер – купольный или ленточный? Плюсы и минусы этих решений / М. Семейкин. – Режим доступа: <https://https://blog.barnsly.ru/pt/wiki/tweeter-dome-or-ribbon/>. – Дата доступа: 06.07.2022.

16. Излучатели звука. Типы и виды излучателей. – Режим доступа: <http://techadviser.ru/articles/izluchатели-zvuka-tipy-i-vidy-izluchatelej/>. – Дата доступа: 06.07.2022.

17. Савчук, А. Ортодинамические излучатели / А. Савчук. – Режим доступа: <https://audioportal.su/diy/articles/obzory/izluchатели-hejla.html>. – Дата доступа: 06.07.2022.

18. Излучатели Хейла. – Режим доступа: <https://https://blog.barnsly.ru/pt/wiki/tweeter-dome-or-ribbon/>. – Дата доступа: 06.07.2022.

19. Пение плазмы: туманные перспективы ионофонов. – Режим доступа: <https://www.pvsm.ru/diy/250690>. – Дата доступа: 06.07.2022.

20. «Физика процесса наукой не объяснена»: история акустики в России. – Режим доступа: <https://yandex.by/turbo/techinsider.ru/s/gadgets/494572-fizika-processa-naukoy-ne-obyasnena-unikalnaya-rossijskaya-akus-tika/>. – Дата доступа: 06.07.2022.

21. Карапузов, Д. Акустическое будущее нанотрубок: новая жизнь термоакустики / Д. Карапузов. – Режим доступа: <https://www.pult.ru/articles/interesting/akusticheskoe-budushchee-novaya-jizn/>. – Дата доступа: 06.07.2022.

22. Панада, В. Цифровые громкоговорители / В. Панада // Компьютерные вести. – 2004. – № 11 – С. 20.

23. Алдошина, И. А. Акустическая метрология. Часть 1. Электроакустические параметры излучателей / И. А. Алдошина // Install-Pro. – 2001. – № 5. – С. 36–41.

24. Алдошина, И. А. Акустическая метрология. Часть 2. Электроакустические параметры излучателей / И. А. Алдошина // Install-Pro. – 2001. – № 6. – С. 64–69.

25. Алдошина, И. А. Акустическая метрология. Часть 3. Электроакустические параметры излучателей. Нелинейные искажения / И. А. Алдошина // Install-Pro. – 2002. – № 1. – С. 84–89.

26. Методология настройки аудиосистем в автостудии «Эргономика». – Режим доступа: <https://ergonomika-auto.ru/diagnostika-i-nastroyka-audiosystem/10-uslugi/105-metodologia-nastroyki.html>. – Дата доступа: 30.07.2022.

27. Алдошина, И. А. Акустическая метрология. Часть 4. Электроакустические параметры излучателей / И. П. Алдошина // Install-Pro. – 2002. – № 2. – С. 86–90.

28. Алдошина, И. А. Акустическая метрология. Часть 6. Электроакустические параметры излучателей / И. А. Алдошина // Install-Pro. – 2002. – № 4–5. – С. 88–94.

29. Арматурные наушники со сбалансированным якорем – отличия и особенности против других типов излучателей в наушниках // Блог компании Soundpal Гаджеты Звук. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/soundpal/blog/378671/>. – Дата доступа: 30.07.2022.

30. Электроакустика и звуковое вещание : учебное пособие для вузов / И. А. Алдошина [и др.]; под общ. ред. Ю. А. Ковалгина. – М. : Горячая линия-Телеком, Радио и связь, 2007. – 872 с.

31. Алдошина, И. А. Бытовая электроакустическая аппаратура : справочник / И. А. Алдошина, В. Б. Бревдо, Г. Н. Веселов. – М. : КУБК-а, 1996. – 320 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| 1. МИКРОФОНЫ | 4 |
| 1.1. Классификация микрофонов | 4 |
| 1.2. Параметры микрофонов..... | 22 |
| 1.3. Системы записи звука группами микрофонов..... | 34 |
| 1.3.1. Стереосистемы микрофонов..... | 35 |
| 1.3.2. Микрофонные системы объемного звучания (<i>surround sound system</i>)..... | 42 |
| 2. АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ | 49 |
| 2.1. Классификация громкоговорителей | 51 |
| 2.2. Параметры громкоговорителей..... | 71 |
| 3. СТЕРЕОТЕЛЕФОНЫ | 81 |
| 3.1. Классификация стереотелефонов | 81 |
| 3.2. Параметры стереотелефонов | 85 |
| ЛИТЕРАТУРА | 90 |

Учебное издание

ЗАЙЦЕВА Елена Георгиевна
БУРАК Вероника Анатольевна

**УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ЗАПИСИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ
АУДИОИНФОРМАЦИИ**

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-38 01 01 «Механические
и электромеханические приборы и аппараты» специализации
1-38 01 01 05 «Бытовые машины, приборы и аппаратура»

Редактор *Н. Ю. Казакова*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 13.04.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,46. Уч.-изд. л. 4,30. Тираж 100. Заказ 72.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.