

**Министерство высшего и среднего специального образования
Республики Узбекистан**

**Ташкентский государственный технический университет
им. А.Р.Беруни**

Кафедра "Метрология, стандартизация и сертификация"

И.Н.Хасанов

Акустические измерения

Учебное пособие

Т а ш к е н т – 2007

УДК 534.6:389.001

Хасанов И.Н. Акустические измерения. Учебное пособие. – Ташкент: Ташкентский государственный технический университет им. А. Р. Беруни, 2007. – 132 с.

В учебное пособие рассматриваются основные вопросы акустических измерений: акустические явления в воздухе и в воде, акустические величины и единицы измерений, акустические сигналы и шумы, акустические спектры, источники и приемники звуковых сигналов, акустические камеры связи, шумомеры и анализаторы спектра, средства измерений в области физиологической акустики, гидроакустические приборы, вопросы измерения мощности излучателей звука, характеристик направленности преобразователей, шумовых характеристик и методов их определения, проведения измерений шума, обработки результатов измерений шума, спектрального анализа акустических сигналов, оценки достоверности проводимых измерений, методы градуировки акустических преобразователей и другие вопросы.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальности «Метрология, стандартизация и сертификация», а также может быть полезно студентам вузов различных специальностей, сотрудникам метрологических служб, специалистам работающим в области метрологии и акустических измерений.

Рецензент: доктор технических наук, профессор О.Ш.Хакимов

© Хасанов И.Н., 2007.

© Ташкентский государственный технический университет им.
А. Р. Беруни, 2007.

Содержание

Предисловие	5
Введение: из истории акустики	7
Глава 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЗВУКА	10
1.1. Звуковые волны	10
1.2. Акустические явления	12
1.3. Акустические величины и единицы измерений	17
1.4. Акустические сигналы	22
1.5. Акустические шумы	26
1.6. Акустические спектры	29
1.7. Звук и слух	33
1.8. Гидроакустика	36
Глава 2. АКУСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ	40
2.1. Электроакустические преобразователи	40
2.2. Микрофоны	44
2.3. Образцовый источник шума	57
2.4. Громкоговорители	58
2.5. Шумомеры и анализаторы спектра	61
2.6. Заглушенные камеры	66
2.7. Реверберационные камеры	69
2.8. Средства измерений в области физиологической акустики.	74
2.9. Гидроакустические приборы	80
Глава 3. ИЗМЕРЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	86
3.1. Измерение мощности излучателей звука	86
3.2. Определение характеристик направленности преобразователей	88
3.3. Шумовые характеристики и методы их определения источников шума	91
3.4. Шумовые характеристики и методы их определения мест нахождения людей	94
3.5. Проведение измерений шума	96
3.6. Обработка результатов измерений шума на рабочем месте	98
3.7. Спектральный анализ акустических сигналов	101
3.8. Измерения звукоизоляции и звукопоглощения материалов	106
3.9. Оценка достоверности проводимых измерений	110
Глава 4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ	113
4.1. Эталонные средства для воспроизведения звукового давления в воздушной среде	113
4.2. Общие методы градуировки акустических преобразователей	116
4.3. Градуировка электроакустических преобразователей методом взаимности	118
4.4. Градуировка приемников звука с помощью акустических труб и акустического радиометра	121

4.5. Градуировка электроакустических преобразователей с помощью пистонфона	124
4.6. Градуировка электроакустических преобразователей электростатическим методом	129
Литература	131

Предисловие

Акустика (от греческого *acusticos* - слуховой, слушающийся) - область физики, исследующая упругие колебания и волны от самых низких частот (условно 0 Гц) до предельно высоких частот (10^{11} , ..., 10^{13} Гц), их взаимодействия с веществом и разнообразные применения.

Акустика - одна из самых древних областей знания и возникла как учение о звуке, т.е. об упругих волнах, воспринимаемых человеческим ухом. Вопросы, которыми занимается акустика, очень разнообразны. Некоторые из них связаны со свойствами и особенностями органов слуха.

Общая акустика изучает вопросы возникновения, распространения и поглощение звука.

Физическая акустика занимается изучением самих звуковых колебаний, а за последние десятилетия охватила и колебания, лежащие за пределами слышимости (ультраакустика). При этом она широко пользуется разнообразными методами превращения механические колебания, электрические и обратно. Применительно к звуковым колебаниям, число задач физической акустики входит и изучение физических явлений, обуславливающих те или иные качества звука, различимые на слух.

Электроакустика, или техническая акустика, занимается получением, передачи, приемом и записью звуков при помощи электрических приборов.

Архитектурная акустика изучает распространение звука в помещениях, влияние на звук размеров и формы помещений, свойств материалов, покрывающих стены и потолки и т. д. При этом имеется в виду слуховое восприятие звука.

Музыкальная акустика исследует природу музыкальных звуков, а также музыкальные настройки и системы. Мы различаем, например, музыкальные звуки (пение, свист, звон, звучание струн) и шумы (треск, стук, скрип, шипение, гром). Музыкальные звуки более простые, чем шумы. Комбинация музыкальных звуков может вызвать ощущение шума, но никакая комбинация не даст музыкального звука.

Гидроакустика (морская акустика) занимается изучением явлений, происходящих в водной среде, связанных с излучением, приемом и распространением акустических волн. Она включает вопросы разработки и создания акустических приборов, предназначенных для использования в водной среде.

Атмосферная акустика изучает звуковые процессы в атмосфере, в частности распространение звуковых волн, условие сверхдальнего распространения звука.

Физиологическая акустика исследует возможности органов слуха, их устройство и действие. Она изучает образование звуков органами речи и восприятие звуков органами слуха, а также вопросы анализа и синтеза речи. Создание систем; способных анализировать человеческую речь - важный этап на пути проектирования машин, в особенности роботов-манипуляторов и электронно-вычислительных машин, послушным устным распоряжениям оператора.

Биологическая акустика рассматривает вопросы звукового и ультразвукового общения животных и изучает механизм локации, которым они пользуются, исследует так же проблемы шумов, вибрации и борьбы с ними за оздоровление окружающей среды.

Все разделы и виды акустики неразрывно связаны с акустическими измерениями.

Акустические измерения - измерения величин, характеризующих звуки и шумы по их интенсивности и по различным качественным признакам (по спектру, по нарастанию и спадаанию звука во времени и др.). Главные величины, которые измеряют в акустике: *звуковое давление, интенсивность звука, скорость распространения, спектральный состав* и др.

Наиболее важная характеристика звука — звуковое давление; это связано с тем, что человеческое ухо в звуковой волне воспринимает именно это давление.

Акустические измерения охватывают все без исключения разделы акустики: атмосферная акустика, гидроакустика, музыкальная акустика и т.д. Акустические измерения охватывают практически все сферы техники: измерения характеристик параметров шумов различного происхождения, создание и испытание акустических приборов связи и вещания — передатчиков и приёмников звука, гидроакустическая аппаратура, бытовая радиоэлектронная аппаратура и многих других областях.

Важным разделом акустических измерений являются измерения в строительной и архитектурной акустике — измерения звукоизоляции перегородок и перекрытий и параметров звукопоглощения строительных перегородок покрытий (штукатурок, обивок, полов и т. д.).

Особую и значительную группу акустических измерений составляет физиологическая акустика: субъективные измерения чувствительности слуха людей, а также отклонений от нормы (*аудиометрия*).

Акустические измерения тесно переплетаются с электрическими измерениями и проводятся главным образом электронной измерительной аппаратурой.

Акустические измерения – это наука, стоящая на службе охраны здоровья и удовлетворения потребностей человека.

Ключевые слова: акустика, физическая акустика, техническая акустика, атмосферная акустика, электроакустика, музыкальная акустика, архитектурная акустика, строительная акустика, биологическая акустика, физиологическая акустика.

Введение: из истории акустики

Звуки – наши неизменные спутники. Они по разному воздействуют на человека: радуют и раздражают, успокаивают и пугают своей неожиданностью.

В глубокой древности звук казался людям удивительным, таинственным порождением сверхъестественных сил. Они верили, что звуки могут укрощать диких животных, сдвигать скалы и горы, преграждать путь воде, вызывать дождь, творить другие чудеса.

Жрецы Древнего Египта, зная удивительное воздействие музыки на человека, использовали ее в своих целях. Ни один праздник не обходился без ритуальных песнопений. Позже музыка пришла в христианские храмы.

Древние индийцы раньше других овладели высокой музыкальной культурой. Они разработали и широко использовали нотную грамоту задолго до того, как она появилась в Европе. Их музыкальная гамма также состояла из семи нот, но названия у них были другие: «са», «ре», «га», «ма», «па», «дха», «ни». Считалось, что каждая из них отражает определенное духовное состояние: «са» и «ма»- спокойствие и умиротворение, «га» и «дха»- торжественность, «ре»- гнев, «па»- радость, «ни»- печаль.

Понять и изучить звук люди стремились с незапамятных времен. Греческий ученый и философ Пифагор, живший две с половиной тысячи лет назад, ставил различные опыты со звуками. Он впервые доказал, что низкие тона в музыкальных инструментах присуще длинным струнам. При укорочении струны в двое звук ее повысится на целую октаву. Выявленные Пифагором и его учениками гармонические сочетания звуков легли в основу более поздних представлений о так называемой гармонии Вселенной. Открытия ифагора положило начало науки акустики.

Первые звуковые приборы были созданы в театрах Древней Греции и Рима: актеры вставляли в свои маски маленькие рупоры для усиления звука. Известно также применение звуковых приборов в египетских храмах, где были «шепчущие» статуи богов.

Существует так называемые вихревые звуки: свист ветра в проводах, такелажа кораблей, ветвях деревьев, завывание в трубах, на гребнях скал, в расщелинах и узких оврагах. Люди издавна пользовались ими - на охоте, в быту. В Древнем Китае существовал обычай выпускать голубей с привязанными к их хвостам маленькие бамбуковые палочки. Воздушный поток, проходивший через трубочку, вызывал нежное посвистывание. Подобные звуки издает и тростниковая дудочка, которая была прообразом зародившейся в Древнем Египте флейты. Позже ее стали называть флейтой Пана - в честь древнегреческого бога лесов.

Легенда гласит, что в Иерусалиме когда-то находилась «стозвучная» двурога труба. Во время жертвоприношения разжигали костер, теплый воздух от которого устремлялся в трубу, заставляя ее выть. Мощные воющие звуки возникали также, когда в нее врывались вихри от пламени пожаров при осаде города.

В 1831 году в Пятигорске была построена беседка, названная Эоловой арфой. Внутри нее находились две арфы, которые с помощью флюгера разворачивались против ветра и под действием воздушного потока издавала гармонические звуки.

В Лондоне в кафедральном соборе святого Павла есть большой, диаметром почти 50 метров, круглый зал. Человек, находящийся на одной стороне, может говорить шепотом и его превосходно услышат на другой стороне. Ученые после тщательных исследований дали научное объяснение этому явлению. Оказывается, что при радиусе закругления стенки, равном 25 метров, звук распространяется вдоль нее, как бы стелясь и доходит до слушателя почти без потерь. При этом звук не отражается в сторону.

В некоторых музеях хранятся вазы античной работы, основное назначение которых - не художественное украшение, а отражение, усиление и сосредоточение звука. Сделанные из алебаstra, такие вазы устанавливались в больших залах, театрах, собраниях и даже на площадях. Ораторам не надо было напрягать голос: слушатели воспринимали речь на всем, пространстве достаточно далеко.

В 17 веке строители вместо ваз применяли звукопроводы в виде труб из цемента. В частности, подобные звукопроводы можно найти в сооружениях, возведенных по проектам Растрелли. Так собор Смольного монастыря весь в звукопроводах. Предполагается, что они есть и в залах Зимнего дворца.

Подобные хитроумные акустические устройства были известны и в древности. Легенда наделила Сиракузского тирана Дионисия способностью слышать в своем дворце даже легкий шепот. В это нетрудно поверить, если допустить, что во дворце были керамические звукособиратели и усилители.

С конца 17 до начала 20 веков создаётся общая теория механических колебаний, излучения и распространения звуковых (упругих) волн в газообразной, жидкой и твердой средах; разрабатываются методы измерения характеристик звука (звуковое давление, импульса, энергии и потока звуковой энергии волн, скорости распространения звука).

С 20-х годов 20 века начался новый этап развития акустики, появляются новые области применения акустики связанные с развитием техники: звуковая локация самолетов в воздухе, гидролокация подводных объектов, акустическая навигация, определение места, времени и характера взрывов, глушение шумов и вибрации в авиации, в промышленности, на транспорте. Изучение влияния структуры среды на распространение звука создало возможность применения звука для зондирования воздушной и водной среды, что привело к развитию гидроакустики и атмосферной акустики. Проблемы городского строительства привели к развитию архитектурной и строительной акустики.

Примерно с середины 20-го века чрезвычайно большое значение приобрели исследования ультразвука (УЗ): УЗ дефектоскопия материалов и изделий; УЗ диагностика в медицине, исследования структуры вещества УЗ методами (молекулярная акустика) и другие направления.

Мощный УЗ оказался не только средством исследования, но и орудием воздействия на вещество, что и послужило основой развития УЗ технологий: ускорение ряда процессов тепло и массообмена; получение более мелкокристаллической и однородной структуры металла; очистка от загрязнения как мелких (часовой производство, приборостроение, электронная техника), так и крупных производственных деталей; пайка алюминиевых изделий; сварка пластмассовых деталей, соединение полимерных пленок и синтетических тканей; обработка крупных деталей, а также деталей сложной конфигурации.

В 60-70-х гг. возникли акустоэлектроника и акустооптика.

В середине 20-го века начинается быстрое развитие психофизиологической акустики, создаются теории слуха, развивается применение акустических методов в биологии, медицине, охране труда и экологии.

Современная акустика охватывает широкий круг вопросов, тесно смыкающихся с рядом других областей науки и техники: теория колебаний и волн; кристаллоакустика, акустооптика, нелинейная акустика, физическая акустика, в том числе молекулярная и квантовая акустика, акустоэлектроника, атмосферная акустика, геоакустика и гидроакустика, электроакустика, музыкальная акустика, архитектурная и строительная акустика, психологическая и физиологическая акустика, а также весьма большой раздел, связанный с изучением шума, вибраций и борьбой с ними и т.п. Все эти разделы акустики возникли и развиваются на основе акустических измерений.

Ключевые слова: акустика, измерение, диапазон, звук, волны, колебания, кристаллоакустика, акустооптика, нелинейная акустика, физическая акустика, квантовая акустика, акустоэлектроника, атмосферная акустика, геоакустика, гидроакустика, электроакустика, музыкальная акустика, архитектурная акустика, строительная акустика, психологическая акустика, физиологическая акустика, излучение шума, вибрация.

Глава 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЗВУКА

Вопросы теории звука имеют ключевое значение как для понимания сути акустических измерений, так и для правильного выполнения измерений. Ввиду чрезвычайной обширности сведений из теории акустики, ниже приведен лишь минимально необходимый объем самых общих сведений, включающий вопросы распространения звуковых волн, акустических явлений в воздухе и в воде, акустических величин и единиц измерений, акустических сигналов и шумов, акустических спектров, человеческого восприятия звука, сведения из гидроакустики.

1.1. Звуковые волны

Звук - это распространяющиеся в упругих средах: газах, жидкостях и твердых телах - механические колебания, воспринимаемые органами слуха.

Как уже говорилось, звуковые волны могут распространяться в воздухе, газах, жидкостях и твердых телах. В безвоздушном пространстве волны не возникают. В этом легко убедиться на простом опыте. Если электрический звонок поместить под воздухонепроницаемый колпак, из которого откачен воздух, мы никакого звука не услышим. Но как только колпак наполнится воздухом, возникает звук.

Диапазон звуковых волн охватывает как область инфразвука (до 16 Гц), так и ультразвук (свыше 20 кГц). Механические колебания в упругих средах с диапазоном частот $F=10^9 \dots 10^{13}$ Гц - гиперзвуковые частоты — используют в технике физического эксперимента и др.

Инфразвук - это акустические колебания с частотой ниже 20 Гц. Инфразвук возникает за счет тех же процессов, что и слышимый шум: резонанс, пульсация, возвратно-поступательное движение и т.п.

Источником инфразвука являются машины, имеющие поверхности больших размеров, совершающие низкочастотные колебания. Инфразвук имеет большую амплитуду колебаний, распространяется на большие расстояния, вызывает вибрацию крупных объектов.

У человека инфразвук вызывает неприятные ощущения, изменения в ЦНС, сердечно-сосудистой и дыхательной системах. Предельно допустимые нормы установлены "Гигиеническими нормами инфразвука на рабочих местах" 2274-80. Общий уровень звукового давления не должен превышать 110 дБ Лин.

Ультразвук. Ультразвук (УЗ) – упругие колебания и волны, частота которых превышает 15 – 20 кГц. Нижняя граница области УЗ-вых частот, отделяющая ее от области слышимого звука, определяется субъективными свойствами человеческого слуха и является условной, так как верхняя граница слухового восприятия у каждого человека своя. Верхняя граница УЗ-вых частот обусловлена физической природой упругих волн, которые могут распространяться лишь в материальной среде, т.е. при условии, что длина волны значительно больше длины свободного пробега молекул в газе или межатомных расстояний в жидкостях и твердых телах.

В газах при нормальном давлении верхняя граница частот УЗ составляет $\approx 10^9$ Гц, в жидкостях и твердых телах граничная частота достигает $10^{12} - 10^{13}$ Гц.

В зависимости от длины волны и частоты УЗ обладает различными специфическими особенностями излучения, приема, распространения и применения, поэтому область УЗ-вых частот подразделяют на три области:

- низкие УЗ-вые частоты ($1,5 \cdot 10^4 - 10^5$ Гц);
- средние ($10^5 - 10^7$ Гц);
- высокие ($10^7 - 10^9$ Гц).

В природе УЗ встречается как в качестве компоненты многих естественных шумов (в шуме ветра, водопада, дождя, в шуме гальки, перекачиваемой морским прибоем, в звуках, сопровождающих грозовые разряды, и т.д.), так и среди звуков животного мира. Некоторые животные пользуются УЗ-выми волнами для обнаружения препятствий, ориентировки в пространстве.

Ультразвуковые колебания подчиняются тем же закономерностям, что и звуковые. Вместе с тем, хотя физическая природа УЗ и определяющие его распространение основные законы те же, что и для звуковых волн любого диапазона частот, он обладает рядом специфических особенностей. Эти особенности обусловлены относительно высокими частотами УЗ.

Особенностью ультразвука является возможность получать фокусированный пучок большой энергии. Фокусировка УЗ позволяет не только получать звуковые изображения (системы звуковидения и акустической голографии), но и *концентрировать* звуковую энергию. С помощью УЗ-вых фокусирующих систем можно формировать заданные *характеристики направленности* излучателей и управлять ими.

Ультразвук, особенно высокочастотный, практически не распространяется в воздухе. В твердых и жидких средах ультразвук вызывает механические и химические эффекты: явление кавитации в среде "жидкость-газ". В твердом теле ультразвук вызывает вибрацию его частиц.

Ультразвук широко используется в технологических процессах: очистка деталей, коагуляция частиц, механическая обработка сверхтвердых материалов и т.п.

Длительное воздействие ультразвука на человека плохо влияет на его здоровье. Под действием локального ультразвука при непосредственном контакте с ультразвуковым инструментом возникает явление вегетативного полиневрита рук (ног). Длительное воздействие низкочастотного ультразвука через воздух вызывает изменения нервной, сердечно-сосудистой системы. Нормирование ультразвука производится согласно ГОСТ 12.1.001-89.

Гиперзвуком принято называть упругие волны с частотами $10^9 - 10^{13}$ Гц.

Ключевые слова: волны, звук, инфразвук, ультразвук, гиперзвук, интерференция, дифракция.

Контрольные вопросы

1. Укажите диапазоны звуковых волн.
2. Что такое инфразвук?
3. Что такое ультразвук?
4. Что такое гиперзвук?

1.2. Акустические явления

Акустических явления лежат в основе любых акустических измерений. Правильное понимание акустических явлений является залогом правильной постановки измерительных экспериментов, так же как и неверная оценка акустических явлений является одним из источников ошибок при акустических измерениях.

В основе всех без исключения акустических явлений лежат физические законы, к важнейшим из которых относятся законы отражения и преломления звука на границах различных сред, интерференция и дифракция звука, эффект Доплера и многие другие. Соответственно действие этих законов как порознь, так и в совокупности порождает соответ-

ствующие акустические явления, такие как эхо, рефракция звука, реверберация звука, диффузное звуковое поле и ряд других. Рассмотрим вкратце лишь некоторые из них.

Эхо (от имени нимфы Эхо в древнегреческой мифологии). Причиной отражения звуковых волн от любой пространственной границы двух сред является неравенство (несогласованность) их волновых акустических сопротивлений.

Волна (акустическая, электромагнитная и др.), отражённая от какого-либо препятствия и принятая наблюдателем. Акустическое эхо можно наблюдать, например, при отражении звукового импульса (стука, короткого отрывистого крика и т. д.) от хорошо отражающих поверхностей.

Эхо различимо на слух, если принятый и посланный импульсы разделены интервалом времени $t = 50\text{—}60$ мсек. Эхо становится многократным, если имеется несколько отражающих поверхностей (вблизи группы зданий, в горах и т. д.), звук от которых приходит к наблюдателю в моменты времени, различающиеся на интервалы $t = 50\text{—}60$ мсек. Гармоническое эхо возникает при рассеянии звука с широким спектром частот на препятствиях, размеры которых малы по сравнению с длинами волн составляющих спектра. В помещении отдельные многочисленные эхо сливаются в сплошной отзвук - это называется *реверберацией*.

Эхо может служить средством измерения расстояния r от источника сигнала до отражающего объекта: $r = ct/2$, где t — промежуток времени между посылкой сигнала и возвращением эхо, а c — скорость распространения волн в среде. На этом принципе основаны различные применения эхо-сигналов.

Акустическое эхо применяется в *гидролокации*, а также в навигации, где для измерения глубины дна применяют *эхолоты*. Упругие волны, распространяющиеся в земной коре, отражаясь от слоев различных горных пород, образуют сейсмическое эхо, этим пользуются для поиска месторождений ископаемых. При помощи эхо измеряется глубина буровых скважин («эхометрирование» скважин), высота уровня жидкости в баках (ультразвуковые уровнемеры). Эхо-методы широко применяются в ультразвуковой дефектоскопии.

Акустическое эхо для некоторых животных (летучих мышей, дельфинов, китов и др.) служит средством ориентировки и поиска добычи.

Рефракция звука - искривление звуковых лучей в неоднородной среде (атмосфера, океан), скорость звука в которой зависит от координат. Звуковые лучи поворачивают всегда к слою с меньшей скоростью звука, и рефракция выражена тем сильнее, чем больше градиент скорости звука.

Рефракция звука в атмосфере обусловлена пространственными изменениями температуры воздуха, скорости и направления ветра. С высотой температура обычно понижается (до высот 15—20 км) и скорость звука уменьшается, поэтому лучи от источника звука, находящегося вблизи земной поверхности, загибаются кверху и звук, начиная с некоторого расстояния, перестаёт быть слышен. Если же температура воздуха с высотой увеличивается (температурная инверсия, часто возникающая ночью), то лучи загибаются книзу и звук распространяется на большие расстояния. При распространении звука против ветра лучи загибаются кверху, а при распространении по ветру — к земной поверхности, что существенно улучшает слышимость звука во втором случае. Рефракция звука в верхних слоях атмосферы может привести к образованию *зон молчания* и зон аномальной слышимости.

Рефракция звука в океане связана с пространственными изменениями температуры, солёности и гидростатического давления. Рефракция в океане обуславливает сверхдальнее распространение звука, образование зон тени, фокусировку звука и ряд других особенностей распространения звука.

Зона молчания в акустике (зона акустической тени) область, в которой звук удалённых мощных источников (орудийная стрельба, взрыв и т.д.) не слышен, в то время как на больших расстояниях он снова появляется («зона аномальной слышимости»). Зоны молчания

обычно имеют на земной поверхности форму неправильного кольца, окружающего источник звука. Иногда наблюдается две и даже три зоны молчания, разделённые зонами аномальной слышимости. Внутренний радиус 1-й зоны молчания обычно равен 20—80 км, иногда он достигает 150 км; внешний радиус может достигать 150—400 км.

Причиной образования зон молчания является рефракция звука в атмосфере: т. к. температура в нижних слоях атмосферы убывает с высотой (до минус 50—75°C на высоте 15—20 км), звуковые лучи отклоняются вверх, уходя от поверхности Земли. На высоте 40—60 км температура снова повышается (до 0—30°C), лучи загибаются книзу и, огибая сверху зону молчания, возвращаются на земную поверхность, образуя зону аномальной слышимости, 2-я и 3-я зоны аномальной слышимости возникают вследствие 1- и 2-кратного отражения звуковых лучей от земной поверхности. Ветер изменяет форму звуковых лучей, что может привести к значительному искажению кольцеобразной формы зоны молчания и даже разомкнуть кольцо. Исследование аномального распространения звука является одним из методов определения температур в средней атмосфере. Аналогичное явление наблюдается часто и при распространении звука (ультразвука) в океане.

Реверберация звука. Реверберация (позднелат. *reverberatio* — отражение, от лат. *reverbero* — отбрасываю) - процесс постепенного затухания звука в закрытых помещениях после выключения его источника. В больших помещениях со слабым звукопоглощением стен наблюдается явление послезвучания. После прекращения действия источника звук исчезает не мгновенно, а постепенно замирая. Явление послезвучания называется *реверберацией*, время замирания звука – временем реверберации.

Воздушный объём помещения представляет собой колебательную систему с очень большим числом собственных частот. Каждое из собственных колебаний характеризуется своим коэффициентом затухания, зависящим от поглощения звука при его отражении от ограничивающих поверхностей и при его распространении. Поэтому возбуждённые источником собственные колебания различных частот затухают неодновременно.

Реверберация оказывает значительное влияние на слышимость речи и музыки в помещении, т.к. слушатели воспринимают прямой звук на фоне ранее возбуждённых колебаний воздушного объёма, спектры которых изменяются во времени в результате постепенного затухания составляющих собственных колебаний. Влияние реверберации тем более значительно, чем медленнее они затухают. В помещениях, размеры которых велики по сравнению с длинами волн, спектр собственных колебаний можно считать непрерывным и представлять реверберацию как результат сложения прямого звука и ряда запаздывающих и убывающих по амплитуде его повторений, обусловленных отражением от ограничивающих поверхностей.

Длительность реверберации характеризуется временем реверберации, т. е. временем, в течение которого интенсивность звука уменьшается в 10^6 раз, а его уровень на 60 дБ. Время реверберации — важнейший фактор, определяющий акустическое качество помещения. Оно тем больше, чем больше объём помещения (или время свободного пробега звука) и чем меньше поглощение на ограничивающих поверхностях. Измеряют время реверберации, записывая процесс убывания уровня звука после выключения его источника.

Реверберацией называется также послезвучание, наблюдаемое в море в результате отражения и рассеяния исходного звука от дна (донная реверберация), взволнованной поверхности (поверхностная реверберация) и неоднородностей водной среды, рыб и др. биологических объектов (объёмная реверберация).

Явление реверберации звука лежит в основе работы реверберационных камер, отличительной особенностью которых является наличие в них так называемого диффузного поля.

Диффузное звуковое поле. Звуковое поле помещения в каждой точке пространства можно представить как совокупность волн, приходящих непосредственно от источника и

волн, попадающих в данную точку после нескольких отражений. При изменении соотношений между длиной волны и размерами помещения, структурой и формой отражающих поверхностей, характер звукового поля, направления потоков поверхности изменяются.

При условии что: 1) размеры помещения значительно превышают среднюю длину волны, 2) стены не сильно поглощают звуковую энергию, то через произвольный элемент объема при непрерывном источнике звука в каждый момент времени будет проходить большое число отдельных волн. В результате этого звуковое поле будет иметь *свойства изотропии* (направления потоков энергии волн равновероятны) и *однородности* (плотность акустической энергии поля по всему объему помещения постоянна).

Изотропное и однородное звуковое поле называется диффузным. Диффузное звуковое поле обладает тем свойством, что все элементарные волны этого поля некогерентны. Это означает отсутствие устойчивых явлений интерференции, что позволяет широко использовать свойства диффузного поля при акустических измерениях в реверберационных камерах.

Интерференция звука. Интерференция звука – это результат сложения двух или нескольких когерентных колебаний, воздействующих на одну и ту же точку пространства.

Явления интерференции существенным образом влияют на характер акустического поля в реальных условиях, определяют направленность распространения звука и могут серьезно изменить результаты акустических измерений. За счет интерференции в результате измерений могут быть внесены систематические ошибки, а также отсутствовать повторяемость результатов.

Наиболее сильно на результат измерений влияют используемые при измерениях синусоидальные сигналы. Это объясняется тем, что при общем источнике все синусоидальные звуковые волны (преломленные, отраженные, рассеянные) оказываются в определенной степени когерентными между собой. Поэтому непрерывные синусоидальные колебания не используют, за исключением случаев, когда можно убедиться, что в точке приема присутствует только одно колебание.

Недостаточная диффузность реверберационных камер объясняется в большинстве случаев интерференционными явлениями. Это объясняется тем, что при многократном отражении сигналов, приходящих с разных направлений со случайными фазами, из-за коррелированности фаз падающих и отраженных волн вблизи отражающих поверхностей возникают пространственные интерференционные картины.

Для повышения диффузности строят камеры непараллельными поверхностями, применяют рассеиватели (диффузоры), придают отражающим поверхностям формы нерегулярной неоднородности, изогнутости, используют сложные сигналы и т.д.

Дифракция звука. Явление дифракции широко распространено в акустике. Оно связано с тем, что в случае наличия в среде препятствий с размерами, соизмеримыми с длиной звуковой волны, уже нельзя рассматривать распространение звука на основе лучевых представлений. Необходимо рассматривать звук как волновое явление, так как звук может огибать препятствия, создавая акустическое поле там, куда не проникает прямолинейный луч от источника.

Существенную роль при этом играет соотношение между длиной волны звука λ и геометрическим размером D – размером источника звука или препятствия на пути волны, размером неоднородностей среды. При $D \gg \lambda$ распространение звука вблизи препятствий происходит в основном по законам геометрической акустики (можно пользоваться законами отражения и преломления). Степень отклонения от геометрической картины распростране-

ния и необходимость учета дифракционных явлений определяются параметром $P = \frac{\sqrt{\lambda r}}{D}$,

где r – расстояние от точки наблюдения до объекта, вызывающего дифракцию.

При акустических измерениях отчетливое представление о роли дифракции совершенно необходимо. В противном случае могут быть допущены серьезные ошибки как методического характера, так и при оценке результатов измерений. Например, при измерении звукоизоляции материалов дифракционные явления зависят от соотношения между размерами пластины испытываемого материала, длиной волны звука, акустическими характеристиками образца, от характера звукового поля, вида препятствия, взаимного расположения точки измерения и препятствия и т.д. Для уменьшения влияния дифракционных явлений существует различные способы, зависящие от конкретного вида измерения.

На практике явления дифракции и интерференции взаимно связаны и существуют одновременно, что является причиной сложной картины звукового поля при измерениях..

Ключевые слова: волны, звук, инфразвук, ультразвук, гиперзвук, интерференция, дифракция.

Контрольные вопросы

1. Укажите диапазон звуковых волн.
2. Что такое инфразвук?
3. Что такое ультразвук?
4. Что такое гиперзвук?
5. Охарактеризуйте явление интерференции звука.
6. Охарактеризуйте явление дифракции звука.

1.2. Акустические величины и единицы измерений

Звуковые волны характеризуются скоростью распространения, звуковым давлением, интенсивностью, спектральным составом и рядом других величин.

Для образования единиц акустики, как и механики, достаточно трех основных единиц: длины L , массы M и времени T . Как правило, в акустике используется система единиц СИ. Вместе с тем на практике используются также и внесистемные единицы (децибел, фон, октава, атмосфера и др.) Перечислим здесь лишь некоторые из часто употребляемых акустических величин.

Скорость звука – фазовая скорость звуковых волн в упругой среде, обычно одинакова для всех частотных составляющих звука. Выражается в метрах в секунду ($м/с$). Скорость звука в воздухе при температуре 0^0 С и давлении 1 атм (101325 Па) равна 331 м/с.

Звуковое давление p - переменная часть давления, возникающая при прохождении звуковой волны в среде. Распространяясь в среде, звуковая волна образует ее сгущения и разрежения, которые создают добавочные изменения давления по отношению к его средним значениям в среде.

Звуковое давление представляет собой переменную часть давления, т. е. колебания давления относительно среднего значения, частота которых соответствует частоте звуковой волны. *Звуковое давление — основная количественная характеристика звука.*

Звуковое давление, как и всякое давление, измеряется в паскалях ($1 Па = 1$ ньютон на $м^2$) и имеет размерность $L^{-1}MT^{-2}$. Иногда для характеристики звука применяется уровень звукового давления — выраженное в $дБ$ отношение величины данного звукового давления p к пороговому значению звукового давления $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} н/м^2$. При этом число децибел $N = 20 \lg (p/p_0)$.

Звуковое давление в воздухе изменяется в широких пределах — от 10^{-5} н/м² вблизи порога слышимости до 10^3 н/м² при самых громких звуках, например шумах реактивных самолётов.

При значительном звуковом давлении наблюдается явление разрыва сплошности жидкости — *кавитация*.

Звуковое давление следует отличать от *радиационного давления звука*.

Звуковое давление является наиболее важной характеристикой звука, потому что из всех акустических величин человеческое ухо воспринимает, в первую очередь, именно звуковое давление.

Акустическое радиационное давление (давление звукового излучения) - постоянное давление, испытываемое телом, находящимся в стационарном звуковом поле. Радиационное давление звука не следует смешивать со *звуковым давлением*, представляющим собой периодически меняющееся давление в среде, в которой распространяется звуковая волна.

Давление звука пропорционально плотности звуковой энергии и, следовательно, квадрату звукового давления. Оно мало по сравнению со *звуковым давлением*; так, например, в звуковом поле в воздухе, в котором звуковое давление равно 10^2 н/м², при нормальном падении звуковой волны на полностью отражающее звуку препятствие Давление звука приблизительно равно $0,1$ н/м². Измерение радиационного давления звука производится *радиометром*. Зная величину давления звука, можно определить абсолютное значение *интенсивности звука* в данной среде.

Звуковая энергия W — энергия колебательного движения частиц упругой среды, заполняющей область звукового поля. Как и любая другая энергия, звуковая энергия выражается в джоулях (дж) и имеет размерность $L^2 MT^{-2}$.

Плотность звуковой энергии $w=dW/dV$ имеет размерность $L^{-1} MT^{-2}$ и единицу измерения дж/м³.

Поток звуковой энергии $P=dW/dt$, также как и **звуковая мощность** $P=dW/dt$ — все эти энергетические величины выражаются в ваттах (Вт) и имеет размерность $L^2 MT^{-3}$.

Интенсивность звука (плотность звуковой мощности), называемая также силой звука, - средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны в единицу времени: $I=dP/dS$, имеет размерность MT^{-3} .

Для плоской синусоидальной бегущей волны интенсивность звука

$$I = pv/2 = p^2/2rc,$$

где p — амплитуда звукового давления, v — амплитуда *колебательной скорости*, r — плотность среды, c — скорость звука в ней. В сферической бегущей волне интенсивность звука обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника. В стоячей волне $I = 0$, т. е. потока звуковой энергии в среднем нет.

Интенсивность звука измеряется в системе единиц СИ в $вт/м^2$. Интенсивность звука оценивается также уровнем интенсивности по шкале децибел; число децибел $N = 10 \lg (I/I_0)$, где I — интенсивность данного звука, $I_0 = 10^{-12}$ $вт/м^2$.

Интенсивность звука и выражается в ваттах на квадратный метр ($Вт/м^2$).

Акустическое сопротивление — физическая величина, аналогичная сопротивлению электрической цепи. Имеет размерность $L^{-4} MT^{-1}$ и выражается в паскаль-секундах на кубический метр.

Спектр звука — частотная характеристика звука, описывающая его спектральный состав по отношению к какой-либо акустической величине (обычно звуковому давлению силе

звука и т.д.). Как правило, в акустической практике приходится иметь дело со сплошными спектрами, когда энергия звуковых колебаний распределяется непрерывно в определенном диапазоне частот. Вместе с тем, при решении определенных задач (градуировка, прием-передача калибровочных сигналов и т.д.) возникает необходимость в использовании линейчатых – дискретных частотных составляющих спектра.

Некоторые акустические величины, связанные с восприятием звука человеком (интенсивность звука, звуковое давление, затухание звуковых волн и др.), имеют экспоненциальный характер изменения и вследствие этого могут изменяться по величине в очень широких пределах - на несколько порядков.

В свою очередь, человеческое ухо обладает огромным диапазоном восприимчивости: оно улавливает тишайший шелест листы и одновременно выдерживает сотрясающие удары грома. Эта способность слухового восприятия человека описана в эмпирическом психофизиологическом законе Вебера-Фехнера следующим образом: ощущение пропорционально логарифму раздражения.

Если воздействие возрастает в 10 раз, его десятичный логарифм увеличивается на единицу и ощущение возрастает также на некоторую единицу. А при росте воздействия в миллион раз его логарифм, а вместе с тем и ощущение возрастают всего лишь на шесть тех же единиц. Из этого факта следует важный вывод: психофизиологический закон обуславливает изменение амплитуды и частоты воспринимаемых звуков в столь широких пределах, что использовать линейные шкалы практически невозможно и необходимо прибегать к логарифмическому масштабу. Но этот же закон делает применение в акустике логарифмических величин и их единиц вполне естественным.

Относительный уровень акустической величины с использованием логарифмического масштаба определяется как логарифм отношения данного значения X величины к пороговому (исходному) значению X_0 этой величины, принятому за начало отсчета:

$$\text{уровень величины} = \lg X/X_0 .$$

Например, уровень интенсивности звука – это десятичный логарифм отношения данного значения интенсивности звука I к пороговому значению I_0 интенсивности звука.

Относительный уровень обозначают буквой L с индексом, указывающим на вид акустической величины, например L_p – уровень звукового давления. В качестве исходных уровней принимают следующие:

- уровень звукового давления - 20 мкПа;
- уровень звуковой мощности - 10^{-12} Вт;
- уровень интенсивности звука - 0,01 Вт/м².

При необходимости указать исходную величину ее значение помещают в скобках после обозначения логарифмической величины и букв *re* (начальные буквы слова *referens*). Например, для уровня звукового давления L_p (*re* 20 мкПа)=20 дБ.

При использовании логарифмических величин для уровня величины указываются основание логарифмов (десять, корень квадратный из десяти, два и т.д.), пороговое значение величины и сам параметр (уровень звукового давления, уровень интенсивности звука и т.д.). Для количественной оценки уровней и других логарифмических величин применяются единицы бел и децибел.

Бел имеет два разных значения: одно – с основанием логарифма, равным десяти, а второе – с основанием, равным корню квадратному из десяти. Десятичное основание логарифма применяется для энергетических величин, а основание $\sqrt{10}$ - для силовых величин.

Бел (Б) есть возрастание энергетической величины (звуковой мощности P , энергии W , интенсивности I или другой энергетической величины) в 10 раз:

$$1 \text{ бел} = \lg(P_2/P_1) \text{ при } P_2 = 10 P_1. \quad (1.2.1)$$

Поскольку энергетические величины пропорциональны квадратам силовых величин (звукового давления, электрического тока и т.п.), бел также представляет возрастание силовой величины в $\sqrt{10} = 3,162$ раза. Однако на практике наибольшее распространение получил не бел, а его дольная единица – децибел (дБ): $1 \text{ дБ} = 0,1 \text{ Б}$.

Децибел соответствует изменению энергетической величины в $10^{0,1} = \sqrt[10]{10} = 1,259$ раза или силовой величины в $\sqrt[20]{10} = 1,121$ раза. Существует также самостоятельное определение децибела: децибел – уровень звукового давления p , для которого выполняется соотношение $20 \lg(p/p_0) = 1$, где p_0 – пороговое звуковое давление, равное 20 мкПа.

МЭК рекомендует следующие применения логарифмических величин.

Звуковая мощность - это количество звуковой энергии, излучаемой в единицу времени в ваттах.

Уровень звуковой мощности – логарифм отношения данной звуковой мощности к исходной звуковой мощности. Уровень звуковой мощности в децибелах равен десятикратному логарифму при основании, равном десяти от этого отношения:

$$L_p = 10 \lg(P/P_0),$$

где P звуковая мощность, Вт, P_0 пороговая звуковая мощность, $P_0 = 10^{-12}$ Вт = 1 пВт, если нет другого указания.

Так как мощность акустического сигнала пропорциональна квадрату его амплитуды (мощность звука пропорциональна квадрату амплитуды звукового давления), то усилению амплитуды сигнала в один бел соответствует величина

$$\lg[A(\omega)]^2 = 2 \lg[A(\omega)].$$

Один децибел, соответствующий изменению амплитуды в у 10 раз, представляет сравнительно малую величину. Поэтому в децибелах

$$\lg[A(\omega)]^2 = 20 \lg[A(\omega)]. \quad (1.2.2)$$

Если бы $A(\omega)$ было отношением мощностей, то перед логарифмом в правой части (1.2.2) должен был бы стоять множитель 10. Так как $A(\omega)$ представляет собой отношение не мощностей, а выходной и входной величин (перемещений, скоростей, напряжений, токов и т. п.), то увеличение этого отношения в десять раз будет соответствовать увеличению отношения мощностей в сто раз, что соответствует двум белам или двадцати децибелам. Поэтому в правой части (1.2.2) стоит множитель 20.

Уровень интенсивности звука (уровень плотности потока звукового давления) – логарифм отношения данной интенсивности звука в указанном направлении к исходной интенсивности. Уровень интенсивности в децибелах равен десятикратному логарифму при основании, равном десяти от этого отношения. Если нет другого указания, за исходную интенсивность звука принимают 1 пВт/м².

Уровень звукового давления – логарифм отношения данного звукового давления к исходному звуковому давлению. Уровень звукового давления в децибелах равен двадцати логарифмам этого отношения при основании, равном десяти. Если нет другого указания, тот за исходное звуковое давление в воздухе принимают 20 мкПа и 1 мкПа в других средах и предполагается, что звуковые давления выражены через средние квадратичные значения.

Помимо объективных акустических характеристик существуют также субъективные характеристики звука, характеризующие слуховое восприятие звуков человеком. К ним относятся: громкость звука, порог слышимости, порог болевого ощущения и другие.

Громкость звука – величина, характеризующая уровень слухового ощущения звука. Громкость звука сложным образом зависит от звукового давления (интенсивности звука), от частоты и формы звуковых колебаний. При неизменной частоте и форме колебаний громкость звука растет с увеличением звукового давления. Наибольшей чувствительностью человек обладает к звукам в интервале частот 1 – 5 кГц.

Громкость звука данной частоты оценивают, сравнивая ее с громкостью чистого тона частотой 1000 Гц, вводя для этого логарифмическую величину «уровень громкости». Уровень громкости оценивают в фонах.

Фон есть уровень громкости, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука стандартного чистого тона с частотой 1000 Гц равен 1 дБ. Для стандартного тона уровень громкости в фонах совпадает с уровнем звукового давления в децибелах.

Порог слышимости – звуковое давление, при котором слышны самые слабые звуки данной частоты. Наименьший порог слышимости соответствует частотам в интервале 1 – 5 Г кГц.

Порог болевого ощущения – звуковое давление, при котором нормальное слуховое ощущение переходит в болезненное раздражение органов слуха. В диапазоне частот 1 – 5 кГц порог болевого ощущения составляет около 120 дБ.

Ключевые слова: скорость звука, звуковое давление, плотность звуковой энергии, поток звуковой энергии, интенсивность звука, акустическое сопротивление, спектр звука, психофизиологический закон, уровень акустической величины, логарифмическая величина, логарифм, бел, децибел, громкость, порог слышимости, порог болевого ощущения.

Контрольные вопросы

1. Укажите диапазон звуковых волн.
2. Перечислите акустические величины и укажите единицу измерения.
3. Что такое спектр звука?
4. В чем состоит психофизиологический закон Вебера-Фехнера?
5. Почему в акустике целесообразно использовать логарифмические величины?
6. Что такое относительный уровень акустической величины?
7. Что такое бел?
8. Что такое децибел и как он связан с белом?
9. Дайте определение уровня звуковой мощности, уровня интенсивности звука, уровня звукового давления.
10. Что такое громкость звука?
11. Что такое порог слышимости?
12. Что такое порог болевого ощущения?

1.3. Акустические сигналы

Под акустическим сигналом обычно понимаются сигналы, проходящие через электроакустический преобразователь как в режиме приема, так и в режиме излучения звука. Если считать в первом приближении электроакустический тракт преобразования акустического сигнала, включающий в себя электроакустический преобразователь и связанные с ним элект-

тронные компоненты, линейным звеном, то вполне допустимо считать зависимость между звуком и соответствующим ему электрическим сигналом линейной. Такое предположение, вполне обоснованное с технической точки зрения, позволяет отождествить звуковой и соответствующий ему электрический сигнал с единым понятием акустического сигнала.

Акустические сигналы отличаются большим разнообразием сообразно существующему разнообразию звуков, с одной стороны, и разнообразию видов электрических сигналов, - с другой. В теории обработки сигналов в общем случае все существующее разнообразие сигналов принято разделять на детерминированные и случайные.

Детерминированные сигналы, генерируемые электроакустической аппаратурой, определяются назначением и проектными конструкторскими решениями используемой аппаратуры. Детерминированные сигналы в зависимости от классификационного признака подразделяются на:

- периодические и непериодические;
- непрерывные и импульсные;
- модулированные и немодулированные и по многим другим признакам.

Периодические сигналы можно разделить на гармонические и периодические сигналы сложной формы, имеющие спектр из ряда дискретных частотных составляющих. Гармонические сигналы чрезвычайно широко используются в акустике для описания различных акустических явлений, включая спектры звуковых сигналов, интерференцию и дифракцию звука, распространения звука в различных средах и многих других приложениях. С другой стороны, гармонические сигналы чрезвычайно широко используются и в акустической измерительной аппаратуре для характеристики спектров электрических сигналов, частотных характеристик и многих других параметров электроакустических устройств и систем.

Периодические сигналы сложной формы используются в электронной аппаратуре как рабочие сигналы, а также являются одной из разновидностей измеряемых акустических сигналов.

Непрерывные сигналы представляют собой широко распространенный тип измеряемого акустического сигнала и охватывают собой очень широкий круг как детерминированных, так и случайных сигналов.

Импульсные сигналы наиболее широко используются в звуколокационной аппаратуре, работа которой основана на посылке и приеме отраженного акустического импульса.

В электронных трактах акустической аппаратуры весьма распространено использование модулированных электрических сигналов. При этом используются следующие виды модуляции: амплитудная, частотная, фазовая, широтно-импульсная, амплитудно-импульсная и другие виды модуляции. Модулированные сигналы находят применение в акустической аппаратуре благодаря тому, что позволяют обеспечить помехоустойчивость при приеме отраженных акустических сигналов.

Случайные сигналы классифицируются в теории случайных процессов на стационарные и нестационарные, эргодические и неэргодические и т.д. Теория случайных процессов находит в акустических измерениях чрезвычайно широко применение как при обработке акустических сигналов, так и при проектировании акустической аппаратуры и обработке результатов измерений. Методы корреляционного и спектрального анализа являются обычным рабочим инструментом при обработке акустических сигналов.

Выбор того или иного сигнала связан, прежде всего, с построением моделей акустических сигналов, описывающих различные звуки и акустические явления. Так, например, гармонические сигналы используются при анализе вибраций производственных машин, случайные сигналы типа белого или окрашенного шума используются при анализе сложных акустических шумов, нестационарные сигналы описывают изменяющиеся во времени звуковые

явления и процессы однократного действия, импульсные сигналы находят применение при измерении акустических сигналов импульсного характера и т.д.

При акустических измерениях тип и параметры излучаемого сигнала выбирают также исходя из условия **минимальности влияния отраженных сигналов на результаты измерений**. В первую очередь, это обусловлено интерференционными явлениями, связанными со сложением прямых и отраженных волн.

На практике применяют гармонический, частотно-модулированный (воющий тон), случайный сигнал типа полос белого шума и импульсные акустические сигналы. Ниже рассматриваются допустимые условия их применения в излучателе звука в предположении, что измерения проводят в открытом пространстве при наличии только одной полностью отражающей плоскости.

В случае использования гармонического сигнала разница между прямым и отраженным сигналами должна составлять не менее 20дБ, т.е. соответствовать соотношению амплитуд прямого и отраженного сигналов не менее 10:1. Условие пренебрежения отраженным сигналом выражается равенством

$$r_2 \approx 5,5 r_1,$$

где r_2 – расстояние между излучателем и отражающей плоскостью, r_1 – расстояние излучатель – приемник.

Для излучаемого некогерентного сигнала типа белого шума разница между прямым и отраженным сигналами должна составлять не менее 10 дБ, т.е. соответствовать уменьшению отраженного сигнала по отношению к прямому не менее чем в 3.16 раза. Условие пренебрежения отраженным сигналом выражается равенством

$$r_2 = 2 r_1,$$

Как видно, применение некогерентного излучения приводит к увеличению зоны измерений по отношению к отражающей поверхности.

Для импульсного сигнала получение узкой спектральной области выражается через обеспечение минимальной длительности импульса, равной

$$\tau_{\text{имп}} = \frac{6 \div 10}{f_0}$$

где f_0 – частота следования импульсов.

Влияние отраженных сигналов устраняется разделением во времени этих сигналов. Условие разделения имеет вид (c – скорость света):

$$\tau_{\text{имп}} = \frac{2(r_2 - r_1)}{c}$$

Наилучшие условия измерений, при которых влияние звукового поля сведено к минимуму, создаются в свободном поле, когда можно пренебречь влиянием отраженных волн. На практике же трудно избежать влияния шумов, поэтому для проведения точных акустических измерений в свободном поле применяют специально оборудованные измерительные помещения – глухие (заглушенные) и гулкие (реверберационные) камеры.

Практика показала, что для ряда типовых акустических измерений существуют сигналы, с которыми можно получить надежные и устойчивые результаты [1].

Поглощение материалов в реверберационных камерах лучше всего измерять полосами белого шума, акустические характеристики в трубах – с помощью импульсных сигналов, в некоторых случаях с помощью стоячих волн, т.е. гармонических сигналов. Частотно-модулированные сигналы используют в автоматизированных установках для получения частотной характеристики акустических устройств. Резонансные характеристики и электрические характеристики элементов акустических устройств определяют при помощи гармонических колебаний.

Ключевые слова: акустические сигналы, детерминированный, периодический, непериодический, импульсный, модулированный, случайный, гармонический, частотно-модулированный.

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику детерминированным сигналам.
2. Дайте характеристику случайным сигналам.
3. Объясните условия минимальности влияния отраженных сигналов на результаты измерений.

1.4. Акустические шумы

Акустические шумы – беспорядочные колебания частиц среды, в частности воздуха, отличающиеся сложностью временной и спектральной структурой. Источниками акустического слышимого и неслышимого шума, как и источником любого звука, могут быть любые колебания в твердых, жидких и газообразных средах.

Практически во всех отраслях производства шум является ним из основных вредных факторов. По данным статистики профессиональное заболевание "снижение слуха" занимает первое место среди всех профессиональных заболеваний

Характер шума зависит от вида источника. Различают:

1. **Механический шум**, возникающие в результате движения отдельных деталей и узлов машин или механизмов с неуравновешенными массами, особенно сильный в неисправных системах;
2. **Ударный шум**, возникающий при некоторых технологических процессах;
3. **Аэродинамический шум**, возникающий при больших скоростях движения газообразных сред;
4. **Взрывной** или **импульсный шум**, возникающий при работе двигателей внутреннего сгорания.

Шум может характеризоваться физическими и физиологическими параметрами. С физической стороны шум характеризуется *звуковым давлением, интенсивностью (силой) звука, плотностью звуковой энергии, уровнем звукового давления, частотой и плотностью дискретных составляющих* и другими параметрами.

Шум, как физиологическое явление, характеризуется *высотой, громкостью, областью возбужденных частот* или *тембром* и *продолжительностью действия*.

Для анализа шума, его нормирования используют **спектр шума**. Частотный спектр шума - это зависимость уровня звукового давления от частоты. Спектр разбивается на активные полосы - октавы, так что отношение верхней границы частоты полосы к нижней равно 2, т.е.

$$f_2/f_1 = f_3/f_2 = \dots = f_{n-1}/f_n = 2$$

Характеристикой частоты в активной полосе принимается средняя геометрическая частота

$$f_{cr} = \sqrt{f_{n-1} \cdot f_n}.$$

В зависимости от характера шума его спектр может быть *линейчатым* или *дискретным, непрерывным* или *сплошным, смешанным* или *линейчато-непрерывным*.

По характеру спектра шум делится на:

широкополосный с непрерывным спектром шириной более одной октавы;

тональный, в спектре которого имеются выраженные дискретные тона, т.е. уровень звукового давления в одной треть октавной полосе превышает над соседними не менее чем на 10 дБ.

По временным характеристикам шум следует подразделять на:

постоянный, уровень звука которого за рабочую смену (8-часовой день) изменяется во времени не более чем на 5 дБА при измерениях на временной характеристике «медленно» шумомера, в противном случае шум считается непостоянным;

непостоянный шум, который, в свою очередь, подразделяют на:

колеблющийся во времени, уровень звука которого непрерывно изменяются во времени;

прерывистый, уровень звука которого ступенчато изменяется, причем длительность интервалов, в течение которых уровень остается постоянным, составляет 1 с и более;

импульсный, состоящий из одного или нескольких звуковых сигналов, каждый длительностью менее 1 с, при этом уровни звука, измеренные на временных характеристиках «импульс» (в дБАУ) и «медленно» (в дБА) шумолора отличаются не менее чем на 7 дБ.

По вероятностно-статистическим характеристикам шумы подразделяются на *статистически стационарные* и *нестационарные*. Практически наблюдаемый шум, возникающий в результате множества отдельных независимых источников, является *квазистационарным*. Шум с медленно меняющимися параметрами или длящийся короткие промежутки времени (меньше чем время усреднения в измерительных средствах) является нестационарным.

Акустические шумы представляют как научный, так и практический интерес, например, шумолокация и шумопеленгация (определение координат источника шума); диагностика машин и механизмов по изменению характера их шума, воздействующего на человека в условиях труда и отдыха.

Шум является общебиологическим раздражителем, влияет не только на слуховой анализатор, но и на структуры головного мозга, вызывает сдвиги в различных функциональных системах организма, нарушение периферического кровообращения, изменение артериального давления. Шум способствует развитию утомления, снижению производительности труда, появлению шумовой патологии тугоухости. Развитие тугоухости длительный и постепенный процесс. При действии интенсивного шума изменения со стороны нервной системы значительно более выражены, чем развитие тугоухости.

Характеристикой постоянного шума является **уровень звукового давления** L (дБ) в октавных полосах

$$L = 20 \lg (P/P_0),$$

где P - среднее квадратическое значение звукового давления, Па; P_0 - пороговое значение звукового давления $P = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Для **непостоянного шума** характеристикой является эквивалентный уровень звука в дБ (А), измеренный по шкале шумомера. В качестве характеристики непостоянного шума допускается использовать **дозу шума**, т.е. интегральную величину, учитывающую акустическую энергию, которая воздействует на человека за определенный период времени и измеряется в $\text{Па}^2 \cdot \text{ч}$. Для непостоянного шума может использоваться относительная доза шума (%).

$$D_{\text{отн}} = D \cdot 100\% / D_{\text{доп}},$$

где $D_{\text{доп}}$ допустимая доза, $\text{Па}^2 \cdot \text{ч}$.

Допустимый уровень **постоянного шума** на рабочих местах задается предельным спектром, т.е. в каждой активной полосе спектра задается допустимый уровень звукового давления. Причем для тонального и импульсивного шума допустимые уровни уменьшаются на 5 дБ. Шум от кондиционеров, вентиляции, воздушного отопления должен быть меньше допустимого на 5 дБ. В любом случае максимальный уровень звука непостоянного шума на рабочих местах не должен превышать 110 дБ (А), а импульсного шума 125 дБ (А).

Основной мерой по снижению производственного шума является гигиеническое нормирование. На каждый агрегат, являющийся источником шума, в технической документации указываются уровень звуковой мощности и фактор направленности, характеризующий уровень звукового давления. Допустимый уровень шума устанавливается с учетом характера работы, характера шума и продолжительности действия.

Регламентация шума определяется "Санитарными нормами допустимых уровней шума" 3223-85, ГОСТ ССБТ 12.1.003-83. Требования к шумовым характеристикам машин определяется ГОСТ ССБТ 12.1.023-80. Измерение шума должно производиться по ГОСТ ССБТ 12.1.050-86 с помощью шумомера.

Ключевые слова: шум, постоянный, широкополосный шум, дискретный, узкополосный, спектр, гигиеническое нормирование, допустимый уровень, измерение шума .

Контрольные вопросы

1. Что такое шум?
2. Опишите характер шума в зависимости от источника.
3. Охарактеризуйте шум как физиологическое явление.
4. Что такое спектр шума, дайте его характеристики.
5. Охарактеризуйте временные характеристики шума.
6. Какими документами регламентируется уровень шума?

1.5. Акустические спектры

Акустический сигнал от каждого из первичных источников звука, используемых в системах вещания и связи, как правило, имеет непрерывно изменяющуюся форму и состав спектра. Спектры могут быть высоко- и низкочастотными, дискретными и сплошными.

У каждого источника звука, даже того же самого типа (например, скрипка в оркестре), спектры имеют индивидуальные особенности, что придает звучанию характерную окраску. Эту окраску называют **тембром**. Существуют понятия тембра скрипки, тромбона, органа и т. п., а также тембра голоса: звонкий, когда подчеркнуты высокочастотные составляющие; глухой, когда они подавлены.

Гармоническое звуковое колебание некоторой частоты в восприятии характеризуется понятием *тон*. Разрешающая способность различения слухом соседних частот относительно друг друга в пределах слышимого диапазона частот (от 16 ... 20 Гц до 20 кГц) неодинакова. В области низких частот, ниже 500 Гц, она едва превышает 1%, в области высоких частот— около 0,5% и лишь на средних частотах составляет 0,2 ... 0,3%.

В музыкальной акустике принято делить частотный диапазон на октавы и доли октавы. Этими же понятиями пользуются и в акустических измерениях. Помимо октавы в акустических измерениях используется также понятие декады.

Понятие *октава* соответствует изменению частоты F в два раза; весь диапазон звуковых частот охватывается 10 октавами. Музыкальная шкала октавы подразделяется на 12 полутонов, что соответствует приращению частоты $\Delta F = \sqrt[12]{2} = 1,054$ или тонам звуков двух смежных клавиш рояля. Выбирая частотные интервалы для измерения спектров сигналов, часто пользуются промежуточными значениями интервалов частот — третьоктавных $\Delta F = \sqrt[3]{2}$ и полуоктавных $\Delta F = \sqrt{2}$.

Декада — это частотный интервал с отношением крайних частот, равным 10. Одна декада включает в себя 3,32 октавы.

Если звуковое колебание сложнее гармонического, но также периодическое, то его следует рассматривать как сумму гармонических колебаний, представляемых рядом Фурье:

$$s(t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos(k\omega t - \varphi_k),$$

где b_k —амплитуда; ω —частота; k —номер спектральных составляющих звучания; φ_k —их фаза. В этом случае звучание характеризуется основным, наиболее низкочастотным, колебанием, соотношение же между основным тоном и обертонами — высшими гармониками — определяет при восприятии тембр звучания, его тональную окраску.

Исследования показывают, что тембральное различие голосов определяется формой спектрального распределения энергии звука, обычно обладающего несколькими максимумами и минимумами в области средних и высоких частот в пределах значительной части звукового диапазона. Максимальные значения такого распределения называют формантами, минимальные—антиформантами. По тембру можно отличить один музыкальный инструмент от другого, узнать голос певца, характер шума.

В первую очередь представляют интерес средний спектр для источников звука каждого типа, а для оценки искажений сигнала—спектр, усредненный за длительный интервал времени (15 с для информационных сигналов и 1 мин для художественных). Усредненный спектр может быть, как правило, сплошной и достаточно сглаженный по форме.

Сплошные спектры характеризуются зависимостью *спектральной плотности* от частоты (эту зависимость называют энергетическим спектром). Спектральной плотностью называется интенсивность звука в полосе частот шириной, равной единице частоты. Для акустики эту полосу берут равной 1 Гц. Спектральная плотность $J = I_{\Delta f} / \Delta f$, где $I_{\Delta f}$ — интенсивность, измеренная в узкой полосе частот Δf с помощью узкополосных фильтров.

Для удобства оценки введена логарифмическая мера плотности спектра аналогично уровню интенсивности. Эту меру называют *уровнем спектральной плотности* или *спектральным уровнем*. Спектральный уровень равен

$$B = 10 \lg(J/I_0),$$

где $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м²—интенсивность, соответствующая нулевому уровню, как и для оценки уровня интенсивности.

Очень часто для характеристики спектра вместо спектральной плотности используют интенсивности и уровни интенсивности, измеренные в октавной, полуоктавной или третьоктавной полосе частот. Нетрудно установить связь между спектральным уровнем и уровнем в **октавной** (полуоктавной или третьоктавной) **полосе**.

Спектральный уровень равен

$$B = 10 \lg(I_{\Delta f_{окт}} / \Delta f_{окт} I_0),$$

а уровень в октавной полосе определяется выражением

$$L_{окт} = 10 \lg(I_{\Delta f_{окт}} / I_0),$$

где $\Delta f_{окт}$ —ширина соответствующей октавной полосы.

Вычитая второе из первого, находим

$$L_{окт} - B = 10 \lg \Delta f_{окт}.$$

При известном спектре сигнала можно определить его суммарную интенсивность. Так, если спектр задан в уровнях интенсивности для третьоктавных полос, то достаточно перевести эти уровни (в каждой из полос) в интенсивности $I_{окт} = I_0 \cdot 10^{0,1L_{окт}}$ и затем просуммировать все интенсивности. Сумма всех $I_{окт}$ дает суммарную интенсивность $I_{сум}$ для всего спектра.

Суммарный уровень находится по формуле

$$L_{сум} = 10 \lg(I_{сум} / I_0).$$

Если спектр задан в спектральных уровнях, то, исходя из их определения, для всего спектра точный, суммарный уровень равен

$$L_{сум} = 10 \lg \int_{f_n}^{f_g} 10^{0,1B} df,$$

где f_g и f_n — верхняя и нижняя границы частотного диапазона. Приближенно суммарный уровень можно найти делением частотного диапазона на n полосок шириною Δf_k , в пределах которых спектральный уровень B_k примерно постоянен. Суммарный уровень определяется выражением

$$L_{сум} \approx 10 \lg \sum_{k=1}^n 10^{0,1B_k} \Delta f_k.$$

Частотный диапазон акустического сигнала определяют из частотной зависимости спектральных уровней. Это определение можно сделать или по спаду спектральных уровней или приближенно, на слух. Субъективными границами считают заметность ограничения диапазона для 75% слушателей.

На рис.1.1 приведены спектры трех типов шумов: *белого, розового и речевого*. Термин «белые» относится к шумам, имеющим одинаковую спектральную плотность во всем частотном диапазоне, «розовые» — к шумам с тенденцией спада плотности на 3 дБ/окт. в сторону высоких частот. Речевые шумы — шумы, создаваемые одновременным разговором нескольких человек.

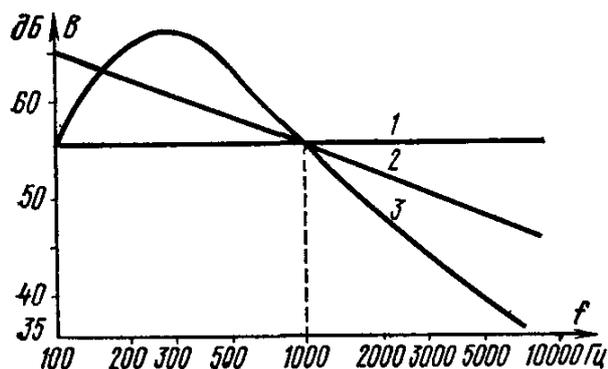


Рис.1.1. Спектральные уровни шумов:
1 — белого; 2 — розового; 3 — речевого

Приведем частотные диапазоны для ряда первичных источников акустического сигнала, Гц:

Таблица 1.1

речь	70–7000
скрипка	250–15000
треугольник	1000–16000
бас-труба	50–6000
орган	20–15000
симфонический оркестр	30–15000

Если спектры имеют плавный спад в ту или иную сторону, то их еще оценивают тенденцией, т.е. средним наклоном спектральных уровней в сторону низких или высоких частот. Например, речевой спектр имеет тенденцию, равную — 6 дБ/окт. (спад в сторону высоких частот).

Ключевые слова: спектр, тон, спектральная плотность, спектральный уровень, октавная полоса, частотный диапазон.

Контрольные вопросы

1. Что такое тембр?
2. Что такое тон?
3. Объясните понятия октавы, полуоктавы, третьоктавы.
4. Что такое спектр акустического сигнала?

5. Объясните понятие спектральной плотности и спектрального уровня.

1.6. Звук и слух

Человек живет в мире звуков. Звук – это то, что слышит ухо. Мы слышим голоса людей, пение птиц, звуки музыкальных инструментов, шум леса, гром во время грозы. Звучат работающие машины, движущийся транспорт и т.д.

Диапазон частот акустических колебаний F , слышимых человеком, простирается примерно от 16 ... 25 Гц до 18 ... 20 кГц в зависимости от индивидуальных особенностей слушателя. С нижней границей звукового диапазона граничит диапазон инфразвуковых частот, воздействие которых на человека считают вредным, так как они могут вызывать неприятные ощущения с серьезными последствиями. В природе инфразвуковые колебания могут возникать при волнениях в море, колебаниях земной среды и пр.

Выше звукового диапазона располагается диапазон ультразвуковых механических колебаний. Ультразвук для человека неслышим, но широко используется в технике.

Услышав какой-то звук, мы обычно можем установить, что он дошел до нас от какого-то источника. Рассматривая этот источник, мы всегда найдем в нем что-то колеблющееся. Если, например, звук исходит от репродуктора, то в нем колеблется мембрана - легкий диск, закрепленный по его окружности. Если звук издает музыкальный инструмент, то источник звука – это колеблющийся столб воздуха и другие.

Основные физические характеристики любого колебательного движения - период и амплитуды колебания, а применительно к звуку - частота и интенсивность колебаний.

Периодом колебания называется время, в течение которого совершается полное колебание. Частота колебаний - это число полных колебаний (периодов) за одну секунду. Такую единицу называют герц (Гц). Частота - одна из основных характеристик, по которой мы различаем звуки. Чем больше частота колебаний, тем более высокий тон.

При восприятии различных звуков человеческое ухо оценивает их прежде всего по уровню громкости, зависящего от потока энергии или интенсивности звуковой волны. Воздействие звуковой волны на барабанную перепонку зависит от **звукового давления**, т.е. амплитуды p_0 колебаний давления в волне.

Человеческое ухо является совершенным созданием Природы, способным воспринимать звуки в огромном диапазоне интенсивностей: от слабого писка комара до грохота вулкана. Область слышимых звуков ограничена двумя порогами: нижний **порог слышимости** и **болевого порога**. Порог слышимости соответствует значению p_0 порядка 10^{-10} атм., т.е. 10^{-5} Па. Болевой порог соответствует значению p_0 порядка 10^{-4} атм. или 200 Па. Уровень звукового давления 140 дБ - это порог переносимости интенсивных звуков.

Таким образом, человеческое ухо способно воспринимать волны, в которых звуковое давление изменяется в 10^7 раз. Так как интенсивность звука пропорциональна квадрату звукового давления, то диапазон интенсивностей оказывается порядка 10^{12} ! Такой огромный диапазон человеческого уха эквивалентен использованию одного и того же прибора для измерения диаметра атома и размеров футбольного поля.

Для сравнения укажем, что при обычных разговорах людей в комнате интенсивность звука приблизительно в 10^6 раз превышает порог слышимости, а интенсивность звука при рок-концерте приближается к болевому порогу.

Еще одной характеристикой звуковых волн, определяющей их слуховое восприятие, является **высота звука**. Колебания в гармонической звуковой волне воспринимаются человеческим ухом как музыкальный тон. Колебания высокой частоты воспринимаются как звуки высокого тона, колебания низкой частоты - как звук низкого тона.

Звуки, издаваемые музыкальными инструментами, а также звуки человеческого голоса могут сильно различаться по высоте тона и по диапазону частот. Так, например, диапазон наиболее низкого мужского голоса - баса - простирается приблизительно от 80 до 400 Гц, а диапазон высокого женского голоса - сопрано - от 250 до 1050 Гц.

Человеческое ухо наиболее чувствительно к звукам с частотой от 1000 до 3000 Гц. Наибольшая острота слуха наблюдается в возрасте 15-20 лет. С возрастом слух ухудшается. У человека до 40 лет наибольшая чувствительность находится в области 3000 Гц, от 40 до 60 лет - 2000 Гц, старше 60 лет - 1000 Гц.

В пределах до 500 Гц мы способны различить понижение или повышение частоты даже 1 Гц. На более высоких частотах наш слуховой аппарат становится менее восприимчивым к такому незначительному изменению частоты. Так, после 2000 Гц мы можем отличить один звук от другого только, когда разница в частоте будет не менее 5 Гц. При меньшей разнице звуки нам будут казаться одинаковыми. Однако правил без исключения почти не бывает. Есть люди, обладающие необычайно тонким слухом. Одаренный музыкант может уловить изменение звука всего на какую-то долю колебаний.

С периодом и частотой связано понятие о длине волны, т.е. в расстоянии между двумя гребнями (или впадинами). Наглядное представление об этом понятии дают волны, распространяющиеся по поверхности воды.

Звуки могут отличаться один от другого и по **тембру**. Это значит, что одинаковые звуки по высоте тона могут звучать по-разному, потому что основной тон звука сопровождается, как правило, второстепенными тонами, которые всегда выше по частоте. Они придают основному звуку дополнительную окраску и называются обертонами. Иными словами, тембром является характеристика звука. Чем больше обертонов налагается на основной тон, тем «богаче» звук в музыкальном отношении. Если основной звук сопровождается близкими к нему по высоте обертонами, то сам звук будет мягким, «бархатным». Когда же обертоны значительно выше основного тона, появляется «металличность» в голосе или звуке.

Органы слуха благодаря своему замечательному устройству легко отличают одно колебание от другого, голос близкого или знакомого человека от голосов других людей. Потому, как говорит человек, мы судим о его настроении, состоянии, переживаниях. Радость, боль, гнев, испуг, страх перед опасностью - все это можно услышать, даже не видя кому принадлежит голос.

Амплитудой колебания называется наибольшее отклонение от положения равновесия при гармонических колебаниях. Амплитуда колебания определяет интенсивность (силу) звука. С интенсивностью звука связана громкость. Чем больше интенсивность звука, тем он громче. Однако понятия о громкости и интенсивности не равнозначны. Громкость звука - это мера силы слухового ощущения, вызываемого звуком.

Область слышимых звуков ограничивается не только определенными частотами (20-20000 Гц), но и определенными значениями звуковых давлений и их уровней. Звук одинаковой интенсивности может создавать у различных людей неодинаковые по своей громкости слуховые восприятия.

Так, например, звуки, одинаковые по интенсивности, но различающиеся по высоте, воспринимаются ухом с разной громкостью в зависимости от особенностей слухового аппарата. Мы не воспринимаем как очень слабые, так и очень сильные звуки - каждый человек обладает так называемым порогом слышимости, который определяется наименьшей интенсивностью звука, необходимой для того, чтобы звук был услышан.

Звуки, наиболее хорошо воспринимаемые по частоте, лучше различаются и по громкости. При частоте 32 Гц по громкости различаются три звука, при частоте 125 Гц - 94 звука, а при частоте 1000 Гц - 374. Увеличение это не беспредельно. Начиная с частоты 8000 Гц число

различимых звуков по громкости уменьшается. Например, при частоте 16000 Гц человек может различить только 16 звуков.

Звуки очень большой интенсивности человек перестает слышать и воспринимает их как ощущение давления или боли. Такую силу звука называют порогом болевого ощущения. Исследования показали, что интенсивность, при которой звуки разной частоты вызывают болевое ощущение, различна.

Если силу звука увеличить в миллион раз, громкость возрастает только в несколько сотен раз. Выяснилось, что ухо преобразует силу звука в громкость, по сложному логарифмическому закону, ограждая свои внутренние части от чрезмерных воздействий.

Имеется еще одна особенность человеческого уха. Если к звуку определенной громкости добавить звук той же или близкой к ней частоты, то общая громкость окажется меньше математической суммы тех же громкостей. Одновременно звучащие звуки как бы компенсируют или маскируют друг друга. А звуки, далеко отстоящие по частоте, не влияют друг на друга, и их громкость оказывается максимальной. Эту закономерность композиторы используют для достижения наибольшей мощности звучания оркестра.

Ключевые слова: звук, слух, диапазон частот, звуковое давление, высота звука, громкость звука, порог слышимости, болевой порог, период колебания, амплитуда колебания.

Контрольные вопросы

1. Назовите диапазон звуковых частот, воспринимаемых человеком.
2. К каким параметрам звуковых волн чувствителен слух?
3. Что такое порог слышимости?
4. Что такое болевой порог?
5. Что такое тембр звука?

1.7. Гидроакустика

Гидроакустика (от *гидро...* и *акустика*), раздел акустики, изучающий распространение звуковых волн в реальной водной среде (в океанах, морях, озёрах и т.д.) для целей подводной локации, связи и т.п. Существенная особенность подводных звуков — их малое затухание, вследствие чего под водой звуки могут распространяться на значительно большие расстояния, чем, например, в воздухе.

Так, в области слышимых звуков для диапазона частот 500—2000 *гц* дальность распространения под водой звуков средней интенсивности достигает 15—20 *км*, а в области ультразвука — 3—5 *км*. Если исходить из величин затухания звука, наблюдаемых в лабораторных условиях в малых объёмах воды, то можно было бы ожидать значительно больших дальностей. Однако в естественных условиях, кроме затухания, обусловленного свойствами самой воды (т. н. вязкого затухания), сказываются ещё рефракция звука и его рассеяние и поглощение различными неоднородностями среды.

Рефракция звука, или искривление пути звукового луча, вызывается неоднородностью свойств воды, главным образом по вертикали, вследствие трёх основных причин: изменения гидростатического давления с глубиной, изменения солёности и изменения температуры вследствие неодинакового прогрева массы воды солнечными лучами. В результате совокупного действия этих причин скорость распространения звука, составляющая около 1450 *м/сек* для пресной воды и около 1500 *м/сек* для морской, изменяется с глубиной, причём закон изменения зависит от времени года, времени дня, глубины водоёма и ряда др. причин.

Звуковые лучи, вышедшие из источника под некоторым углом к горизонту, изгибаются, причём направление изгиба зависит от распределения скоростей звука в среде.

Летом, когда верхние слои теплее нижних, лучи изгибаются книзу и в большинстве своём отражаются от дна, теряя при этом значительную долю своей энергии. Наоборот, зимой, когда нижние слои воды сохраняют свою температуру, между тем как верхние слои охлаждаются, лучи изгибаются вверх и претерпевают многократные отражения от поверхности воды, при которых теряется значительно меньше энергии. Поэтому зимой дальность распространения звука больше, чем летом. Вследствие рефракции образуются т. н. мёртвые зоны (зоны тени), т. е. области, расположенные недалеко от источника, в которых слышимость отсутствует.

Наличие рефракции, однако, может приводить к увеличению дальности распространения звука — явлению сверхдальнего распространения звуков под водой. На некоторой глубине под поверхностью воды находится слой, в котором звук распространяется с наименьшей скоростью; выше этой глубины скорость звука увеличивается из-за повышения температуры, а ниже — вследствие увеличения гидростатического давления с глубиной. Этот слой представляет собой своеобразный подводный звуковой канал. Луч, отклонившийся от оси канала вверх или вниз, вследствие рефракции всегда стремится попасть в него обратно (рис. 1.2).

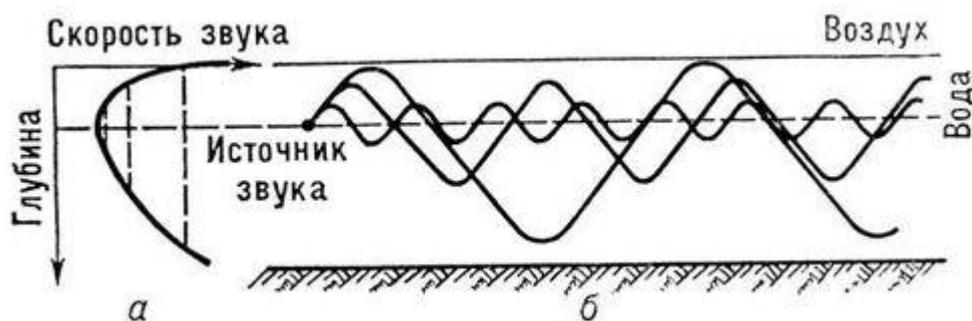


Рис. 1.2. Распространение звука в подводном звуковом канале: а — изменение скорости звука с глубиной; б — ход лучей в звуковом канале.

Если поместить источник и приёмник звука в этом слое, то даже звуки средней интенсивности (например, взрывы небольших зарядов в 1—2 кг) могут быть зарегистрированы на расстояниях в сотни и тысячи км. Существенное увеличение дальности распространения звука при наличии подводного звукового канала может наблюдаться при расположении источника и приёмника звука не обязательно вблизи оси канала, а, например, у поверхности. В этом случае лучи, рефрагируя книзу, заходят в глубоководные слои, где они отклоняются вверх и выходят снова к поверхности на расстоянии в несколько десятков км от источника.

Далее картина распространения лучей повторяется и в результате образуется последовательность т. н. вторичных освещенных зон, которые обычно прослеживаются до расстояний в несколько сотен км. Явление сверхдальнего распространения звука в море было открыто независимо американскими учёными М. Ивингом и Дж. Ворцелем (1944) и советскими учёными Л. М. Бреховских и Л. Д. Розенбергом (1946).

На распространение звуков высокой частоты, в частности ультразвуков, когда длины волн очень малы, оказывают влияние мелкие неоднородности, обычно имеющиеся в естественных водоёмах: микроорганизмы, пузырьки газов и т.д. Эти неоднородности действуют

двояким образом: они поглощают и рассеивают энергию звуковых волн. В результате с повышением частоты звуковых колебаний дальность их распространения сокращается. Особенно сильно этот эффект заметен в поверхностном слое воды, где больше всего неоднородностей.

Рассеяние звука неоднородностями, а также неровностями поверхности воды и дна вызывает явление подводной *реверберации*, сопровождающей посылку звукового импульса: звуковые волны, отражаясь от совокупности неоднородностей и сливаясь, дают затягивание звукового импульса, продолжающееся после его окончания, подобно реверберации, наблюдающейся в закрытых помещениях. Подводная реверберация — довольно значительная помеха для ряда практических применений гидроакустики, в частности для *гидролокации*.

Пределы дальности распространения подводных звуков лимитируются ещё и т. н. собственными шумами моря, имеющими двойное происхождение. Часть шумов возникает от ударов волн на поверхности воды, от морского прибоя, от шума перекачиваемой гальки и т.п. Другая часть связана с морской фауной; сюда относятся звуки, производимые рыбами и др. морскими животными.

Гидроакустика получила широкое практическое применение, т.к. никакие виды электромагнитных волн, включая и световые, не распространяются в воде (вследствие её электропроводности) на сколько-нибудь значительном расстоянии, и звук поэтому является единственным возможным средством связи под водой. Для этих целей пользуются как звуковыми частотами от 300 до 10000 *гц*, так и ультразвуками от 10000 *гц* и выше.

Ключевые слова: гидроакустика, рефракция, звуковой канал, сверхдальнее распространение звука, реверберация, гидролокация.

Контрольные вопросы

1. Чем занимается гидроакустика?
2. Объясните явление рефракции звука в воде.
3. В чем заключается явление сверхдальнего распространения звука?
4. Чем вызывается подводная реверберация?

Глава 2. АКУСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Акустические средства измерений можно условно разделить на несколько групп:

- 1) излучатели звука;
- 2) приемники звука связи;
- 3) акустические камеры;
- 4) акустические приборы и системы;

Условность такого разделения объясняется тем, что, например, разделение на приемники и излучатели звука для некоторых (обратимых) электроакустических преобразователей носит условный характер, ибо один и тот же преобразователь может работать как в режиме излучения, так и в режиме приема звука. Кроме того, акустические приборы и системы обычно включают в себя излучатели и приемники звука, а при постановке измерительных экспериментов и акустические камеры связи.

К излучателям звука относятся электроакустические преобразователи, работающие в режиме излучения звука: громкоговорители, образцовые источники шума, гидрофоны и т.п.

К приемникам звука относятся микрофоны и гидрофоны.

К акустическим камерам связи относятся заглушенные камеры, реверберационные камеры и камеры малого объема.

Акустические приборы и системы составляют наиболее многообразную группу измерительных средств. Сюда относятся метрологические акустические средства: акустические трубы, акустический радиометр, пистонфон, установки для поверки, калибровки и градуировки акустических приборов и т.п. В эту же группу входят измерительные установки, включающие в себя акустические камеры связи и разнообразные акустические приборы. Отдельную многочисленную группу составляют гидроакустические измерительные средства: эхолоты, лаги, гидролокаторы, шумопеленгаторы и т.д.

Кроме того существуют многочисленные акустические средства измерений в различных сопрягающихся с акустикой прикладных областях, как, например, акустооптика, акустоэлектроника, ультразвуковая диагностика и т.д.

Ниже рассматриваются лишь некоторые наиболее важные для акустических измерений приборы и устройства.

2.1. Электроакустические преобразователи

Вся современная техническая акустика основывается на процессах преобразования энергии электрических колебаний в энергию звуковых или механических колебаний и обратно. Устройства, применяемые для возбуждения и приема звука (упругих колебаний и волн) в газообразных, жидких и твердых средах называют акустическими преобразователями или в отдельности излучателями и приемниками звука. Излучатели звука преобразуют в энергию звукового поля энергию какого-либо другого вида, а приемники осуществляют обратное, т.е. преобразуют энергию звукового поля в другую энергию.

Существует множество различных видов преобразователей упругих колебаний и волн. Наибольшее распространение в качестве преобразователей получили **электроакустические преобразователи (ЭП)** - устройства, преобразующие электрическую энергию в акустическую и обратно.

ЭП можно разделить на два класса: **обратимые и необратимые** (вентильные).

Типичным примером вентильного приемника является угольный микрофон.

К наиболее распространенным обратимым электромеханическим преобразователям относятся **пьезоэлектрические, магнитострикционные, электродинамические, электростатические преобразователи.**

В преобразователях предназначенных для излучения монохромного сигнала используется явление резонанса: они работают на одном собственных колебаниях механической системы, на частоту которых настраивается генератор электрических колебаний, возбуждающий преобразователь.

К основным характеристикам ЭП относятся:

- диапазон рабочих частот;
- динамический диапазон;
- номинальная мощность;
- чувствительность;
- нелинейные искажения;
- диаграмма направленности излучения;
- электроакустический к.п.д.;
- электрические параметры (импеданс, емкость и т.д.);
- габариты и эксплуатационные особенности.

Для резонансных электроакустических преобразователей рабочей частотой является собственная частота f_0 и ширина полосы пропускания $\Delta f = \frac{f_0}{Q}$, где Q - добротность. Обратимые преобразователи в режиме приема акустического сигнала позволяет воспроизводить временную форму сигнала и, следовательно, получить сведения о его фазе, частоте и спектре.

ЭП в основном линейны, т.е. удовлетворяют требованию неискаженной передачи сигнала, и обратимы, т.е. могут работать и как излучатели, и как приемники и подчиняются принципу взаимности.

В большинстве случаев преобладает преобразование в механическую энергию либо энергию электрического или магнитного поля (и обратно), соответственно чему обратимые ЭП могут быть разбиты на две основные группы. К первой группе ЭП относятся электродинамические, электростатические и пьезоэлектрические преобразователи, ко второй - электромагнитные и магнитострикционные.

Принцип действия **электродинамических излучателей** основан на взаимодействии переменного электрического тока с магнитным полем. Основа конструкции электродинамического излучателя - помещенный в постоянное магнитное поле проводник (в виде витка или катушки), по которому протекает переменный ток (ток возбуждения). Переменная сила, возникающая при этом, вызывает колебания с частотой тока подвижной системы излучателя. В подвижную систему, помимо проводника с током входит связанное с ним излучающее устройство в виде диафрагмы или твердого тела какой-либо другой формы, например, в виде бумажного диффузора в громкоговорителях или металлической мембраны в рупорных громкоговорителях.

Электродинамические приемники основаны на электромагнитной индукции. При этом в катушке, связанной с колеблющейся под действием звука диафрагмой (или непосредственно с твердым телом, в котором распространяется упругая волна), вследствие эффекта электромагнитной индукции находится электродвижущая сила.

Действие электростатических преобразователей основано на изменении заряда или напряжения (следовательно, емкости) при относительном перемещении обкладок конденсатора (в режиме приема) или изменения силы притяжения обкладок с напряжением (в режиме излучения). Для преобразования (измерения) изменений емкости в электрический сигнал к

неподвижному электроду электростатического проводника обычно подводится постоянное напряжение $U_0=100-200$ В и переменное электрическое напряжение U_1 , пропорциональное смещению подвижного электрода, снимается с включенного последовательно с конденсатором нагрузочного сопротивления.

Пьезоэлектрические преобразователи основаны на прямом (в пьезоэлектрических приемниках) и обратном (в излучателях) пьезоэлектрическом эффекте.

Основой пьезоэлектрического преобразователя является пьезоэлемент, изготовленный из пьезоэлектрического материала, - деталь простой геометрической формы (пластина, диск, стержень, цилиндр и т.п.) с нанесенными на ее поверхность электродами. С электродов пьезоэлемента снимается электрический заряд, образующийся при прямом пьезоэффекте (режим приемника), или к ним подводится электрическое напряжение для создания деформации в результате обратного пьезоэффекта (режим излучателя). Пьезоэлектрические излучатели и приемники конструктивно идентичны.

В зависимости от назначения и диапазона рабочих частот используются различные пьезоэлектрические материалы. Наиболее широкое распространение получила пьезокерамика.

В зависимости от диапазона частот, назначения и условий работы применяются различные геометрические формы пьезоэлементов.

Действие электромагнитных преобразователей основано на взаимодействии магнитного поля катушки, по обмоткам которой протекает ток возбуждения (в режиме излучателя) с ферромагнитным сердечником.

Магнитострикционные преобразователи действуют на эффекте **магнитострикции** (деформирование тел при изменении их магнитного состояния). Магнитострикционный преобразователь представляет собой сердечник из магнитострикционных материалов (ферриты и ферромонетики) с нанесенной на него обмоткой. В излучателе такого типа энергия переменного магнитного поля, создаваемого в сердечнике протекающим по обмотке переменным электрическим током, преобразуется в энергию упругих колебаний сердечника.

В приемнике энергия упругих колебаний, возбуждаемых действующей на сердечник внешней переменной силой, преобразуется в энергию магнитного поля, наводящего электродвижущую силу в обмотке. Материалом для таких преобразователей в ультразвуковой технике обычно служит никель, пермендюр, никель-кобальтовые и железоникелевые сплавы, а также керамические вещества на основе феррита никеля.

Для возбуждения и приема упругих колебаний и волн используются также другие типы преобразователей, например, термические и оптические приемники, лазерный метод возбуждения, механические (газоструйные и гидродинамические) излучатели

Выбор тех или иных видов преобразователей осуществляется в зависимости от поставленной задачи частотного диапазона, необходимой мощности, к.п.д. преобразователя и т.п. Приведем основные характеристики некоторых типов электроакустических преобразователей.

Преобразователь	Частотный, диапазон, Гц	к.п.д., %	Удельная мощность, Вт/см ²
Электродинамический	$10-10^4$	10	1
Пьезоэлектрический	10^2-10^9	40-70	10
Магнитострикционный	10^4-10^5	50	20

Как видим, для возбуждения и приема ультразвуковых колебаний в диапазоне частот свыше 10^5 гц пригодны только пьезоэлектрические преобразователи, а ниже 100 Гц - элек-

тродинамические. Для получения максимальной удельной мощности целесообразно использовать магнитострикционные преобразователи.

При определении физико-механических свойств твердых тел, например, стержня, методом свободных колебаний желательнее применять бесконтактные (например, электростатические или оптические) методы возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний, поскольку в них контакт стержня с любым другим телом, например, преобразователями, приводит к дополнительным потерям, и следовательно, к искажению результатов измерений.

Ключевые слова: электроакустический преобразователь, электродинамический излучатель, электродинамический приемник, электростатический преобразователь, пьезоэлектрический преобразователь, электромагнитный преобразователь, магнитострикционный преобразователь.

Контрольные вопросы

1. Перечислите виды преобразователей упругих колебаний и волн?
2. Какую энергию преобразовывают в акустическую и обратно электроакустические преобразователи?
3. В чем заключается прямой и обратный пьезоэлектрический эффект?
4. Какую энергию преобразовывают в акустическую и обратно электростатические и пьезоэлектрические преобразователи?
5. Какую энергию преобразовывают в акустическую и обратно электродинамические, электромагнитные и магнитострикционные преобразователи?
6. Принцип действия электростатических, пьезоэлектрических электродинамических, электромагнитных и магнитострикционных преобразователей.
7. Какой вид преобразователей имеет наибольший КПД?
8. Какой вид преобразователей имеет наибольшую удельную мощность?
9. Какие преобразователи преимущественно используются на мегагерцовом диапазоне частот?

2.2. Микрофоны

Микрофон (от *микро...* и греч. *ρῆσις* — звук), электроакустический прибор для преобразования звуковых колебаний в электрические. Применяется в телефонии, радиовещании, телевидении, системах звукоусиления и звукозаписи.

Микрофон должен иметь достаточную чувствительность при выполнении измерений, малые нелинейные искажения в измерительном тракте и стабильную чувствительность. При внесении в звуковое поле микрофон должен мало искажать его. Испытания микрофонов регламентированы ГОСТ 16123 - 70. «Микрофоны. Методы электроакустических испытаний».

На рис. 2.1 приведена классификация микрофонов по принципу электромеханического преобразования.

По направленности действия микрофоны подразделяются на ненаправленные, односторонне направленные (кардиоидные), двусторонне направленные и сложной формы направленности, а по характеру измеряемого параметра колебательного процесса - приемники давления, градиента давления и комбинированные.

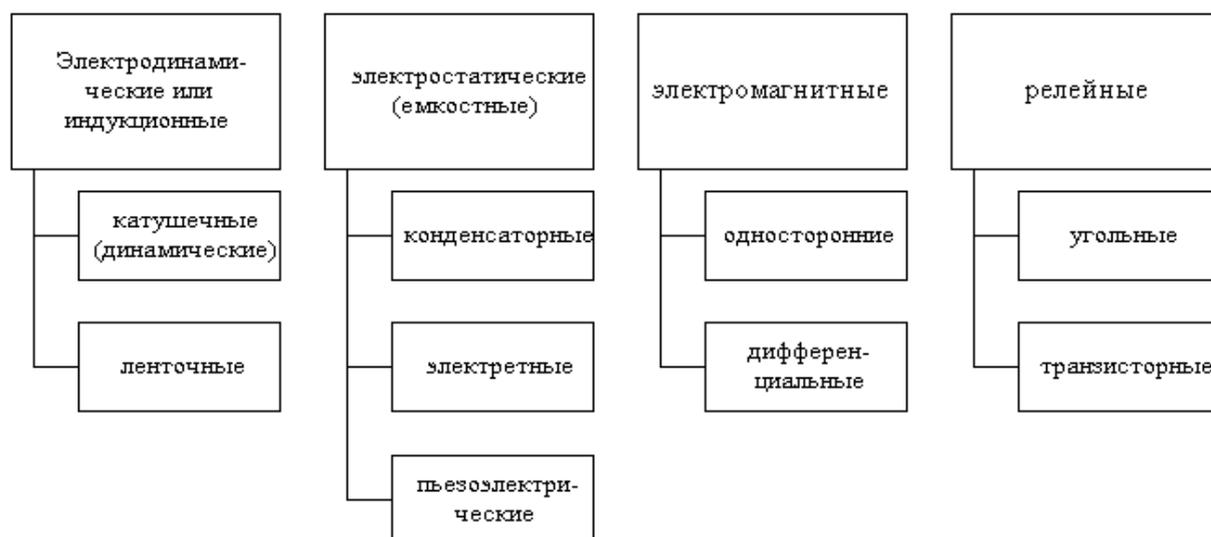


Рис. 2.1. Классификация микрофонов по принципу электромеханического преобразования

Микрофон характеризуется следующими параметрами:

1) осевой чувствительностью, т.е. отношением эффективных значений развиваемого микрофоном напряжения и звукового давления в свободном поле при падении гармонической волны по направлению акустической оси микрофона;

2) направленностью, т.е. распределением чувствительности микрофона при падении звуковой волны под различными углами и отнесенной к его осевой чувствительности; приемники звука (аналогично акустическим излучателям) обладают направленностью, если их размеры соизмеримы или превышают длину звуковой волны;

Характеристики направленности микрофонов имеют вид (рис. 2.2.).

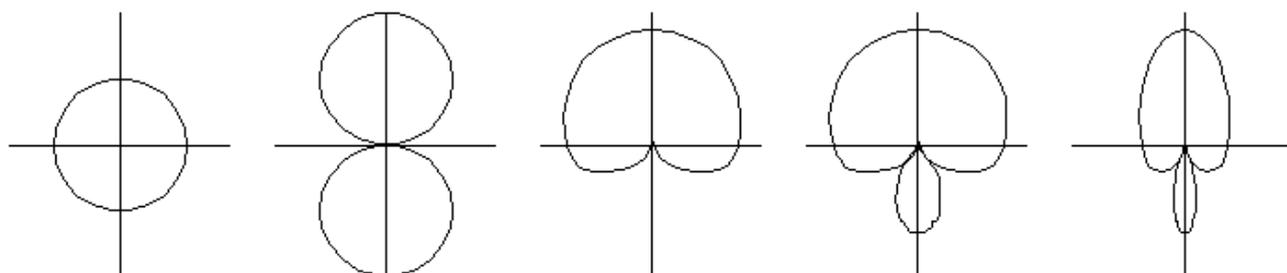


Рис. 2.2. Характеристики направленности микрофонов

В конструкции приемника давления звуковые волны воздействуют только с одной стороны (рис. 2.3)

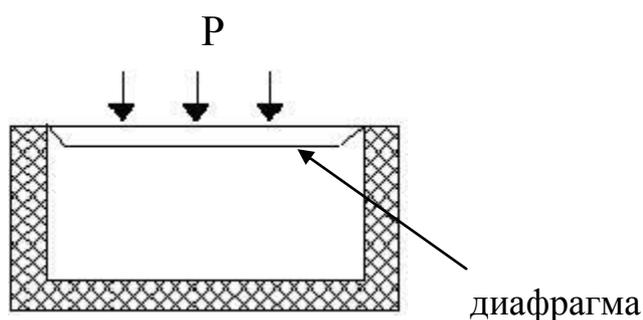


Рис. 2.3. Конструкция приемника давления

В конструкции приемника градиента давления механическая система открыта с двух сторон (рис. 2.4.).

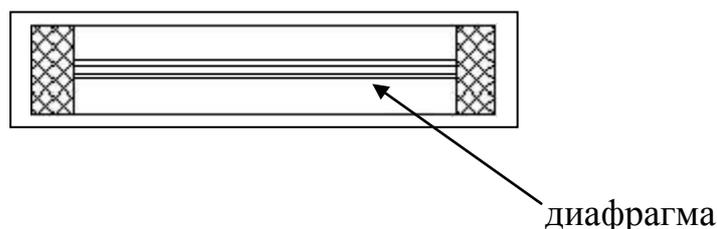


Рис. 2.4. Конструкция приемника градиента давления

Благодаря одинаковому давлению шума с обеих сторон происходит его компенсация, вследствие чего достигается эффект шумозащищённости.

3) коэффициентом направленности, которым является энергетическая характеристика, оценивающая суммарную характеристику направленности сравнительно с ненаправленным микрофоном;

4) уровнем собственных шумов микрофона N_m , определяемым относительно эффективного напряжения U_0 (при звуковом давлении 0,1 Па), возникающего под воздействием сигнала:

$$N_m = 20 \cdot \lg(U_0 / U_m),$$

где U_m - напряжение помех при отсутствии полезного сигнала.

Зависимость указанных параметров от частоты определяет соответствующие частотные характеристики микрофона.

Ниже в таблице приведены усреднённые значения основных параметров отдельных видов микрофонов (в скобках указаны классы качества: Вк — высший, 1к — первый, 2к — второй, 3к — третий).

Тип микрофона	Параметры		
	Диапазон воспроизводимых частот, Гц	Неравномерность частотной характеристики, дБ	Осевая чувствительность на частоте 1000 гц, мв·м ² /н
Угольный	300 – 3 400 (3к)	20	1000
Электродинамический катушечного типа	100 – 10 000 (1к)	12	0,5
	30 – 15 000 (Вк)		1,0
Электродинамический ленточного типа	50 – 10 000 (1к)	10	1,0

	70 – 15 000 (Вк)		1,5
Конденсаторный	30 – 15 000 (Вк)	5	5
Пьезоэлектрический	100 – 5 000 (2к)	15	50
Электромагнитный	300 – 5 000	20	5

Электродинамический катушечный микрофон. Изобретен американскими учёными Э. Венте и А. Терас в 1931. Принцип действия микрофона основан на использовании явления электромагнитной индукции, т. е. возбуждение ЭДС при движении проводника в постоянном магнитном поле.

В конструкции микрофона имеется диафрагма из тонкой полистирольной плёнки или алюминиевой фольги, жестко связанная с катушкой из тонкой проволоки, находящейся в кольцевом зазоре магнитной системы (рис. 2.5). Катушка жестко связана с диафрагмой, которая закреплена на верхнем фланце с помощью гофрированного гибкого подвеса и может колебаться в зазоре только вдоль оси. Для создания постоянного магнитного поля используется кольцевой магнит и магнитопровод (верхний, нижний, фланец и керн) из мягких материалов (Ni, Fe).

При колебаниях диафрагмы под действием звуковой волны витки катушки пересекают магнитные силовые линии и в катушке наводится э.д.с., создающая переменное напряжение на её зажимах.

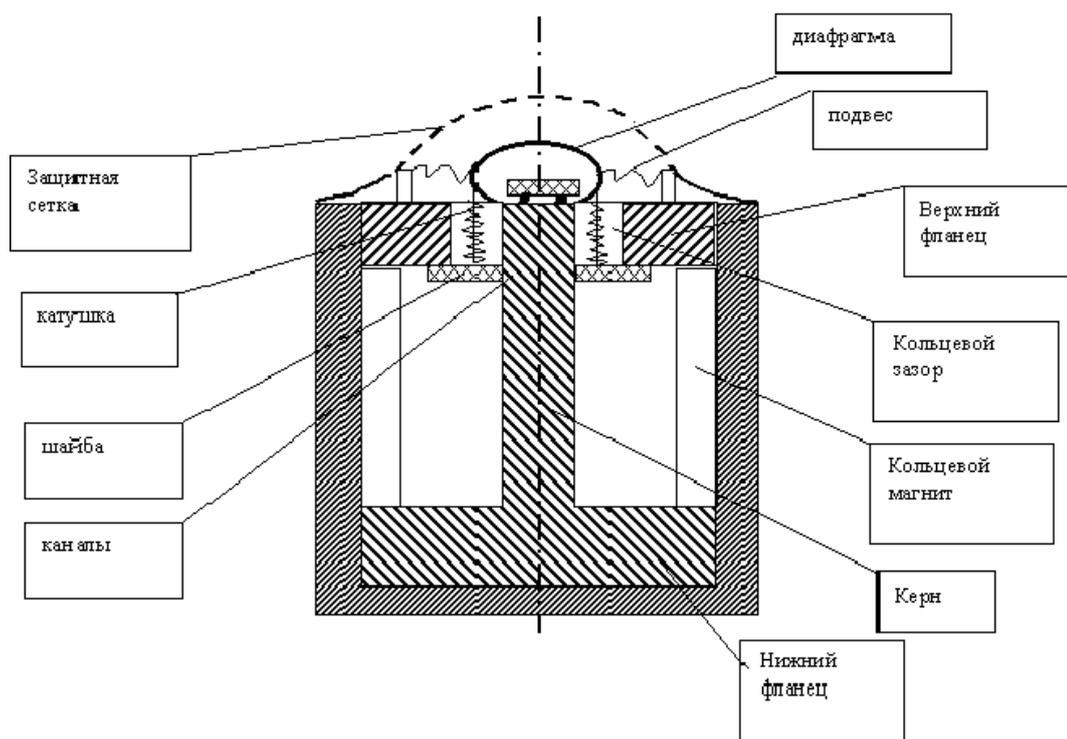


Рис. 2.5. Электродинамический катушечный микрофон

Развиваемое микрофоном напряжение повышается малогабаритным трансформатором, конструктивно объединенным с микрофоном. Чувствительность микрофона определяется:

B - индукцией в зазоре;

S - действующей поверхностью диафрагмы;

R_n - сопротивлением, шунтирующее обмотку входного трансформатора;

ℓ, s - длиной и поперечным сечением проводника звуковой катушки;

δ - удельным сопротивлением проводника;

ω_r - частотой;

M - массой подвижной системы.

Нижняя граница частотной характеристики ограничена увеличением массы катушки и увеличением гибкости подвеса. Для расширения полосы частот в конструкцию микрофона вводят дополнительный резонатор, размещенный в магнитопроводе (трубочка). При этом нижняя граница расширяется до 100 - 50 Гц, а верхняя граница – до 8000 - 10000 Гц. С использованием специальных материалов магнита и магнитопровода верхняя граница достигает до 15000 Гц.

Электродинамические микрофоны широко распространены благодаря достаточно широкому диапазону частот (при неравномерности 4 дБ), низкому уровню шума и незначительным нелинейным искажениям. Благодаря этим качествам динамический диапазон микрофона находится в пределах 15-140 дБ. У электродинамических микрофонов небольшое внутреннее сопротивление, поэтому кабель, соединяющий микрофон с усилителем, не вносит заметных искажений в частотную характеристику. Катушечный микрофон прост по конструкции, имеет небольшие габариты, надёжен в эксплуатации.

К недостаткам микрофона относятся его восприимчивость к внешним магнитным полям, индуктирующим э.д.с. в катушке, способность притягивать мелкую стальную пыль и ограниченный интервал температуры и влажности, в пределах которых характеристики микрофона остаются неизменными.

Электродинамический ленточный микрофон. Изобретён немецкими учёными Э. Герлахом и В. Шотки в 1924. Роль диафрагмы выполняет проводник в виде тонкой гофрированной ленточки из очень тонкой (порядка 2 мкм) алюминиевой фольги, которая колеблется в постоянном магнитном поле. Ленточка может подвергаться воздействию звука как с одной, так и с обеих сторон. В первом случае – приемник давления, во втором – приемник градиента давления.

Конструкция ленточного микрофона (рис. 2.6) состоит из:

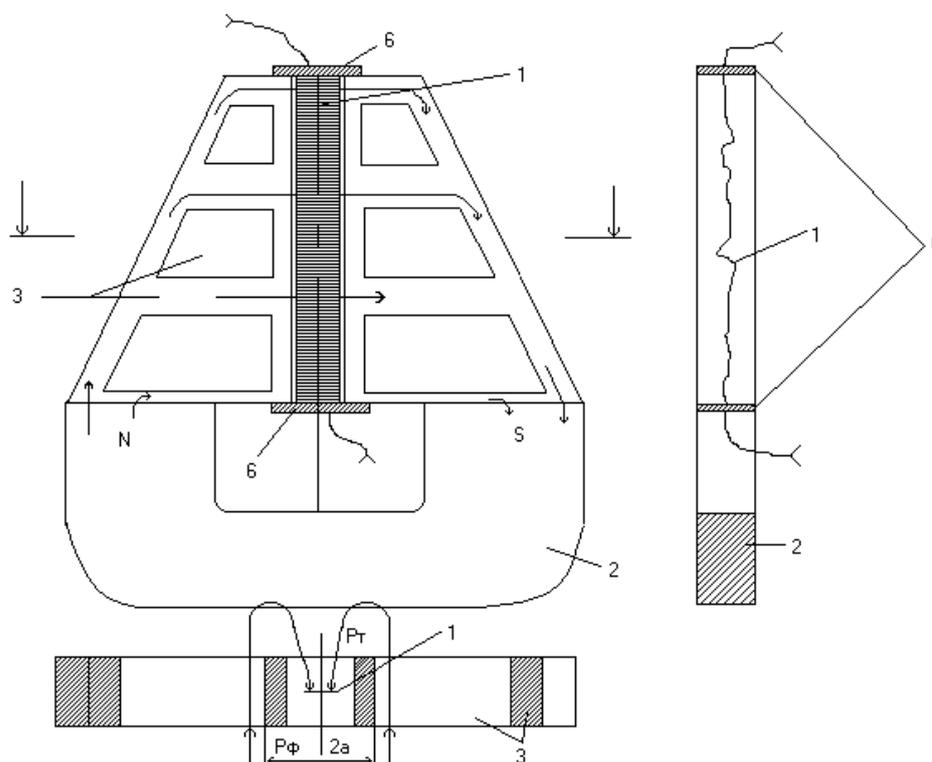


Рис. 2.6. Электродинамический ленточный микрофон

- 1) диафрагмы – ленточки 1 (алюминий гофрированный, резонансная частота 30 Гц; длина 5–10 см; сопротивление 1/10 Ом);
- 2) постоянного магнита 2 (индукция в зазоре $B=1$ Тл.);
- 3) полюсного наконечника 3 с окнами;
- 4) камеры;
- 5) лабиринта (длинная трубка, соединенная с камерой, свернутая в спираль или другим образом, заполненная поглощающим материалом (комки пощипанных нитей шелка), представляет собой акустический фильтр низких частот.
- 6) изоляционных планок 6, к которым крепится ленточка.

Обычно используется приемник градиента давления – под действием разности звуковых давлений ленточка колеблется в магнитном поле, силовые линии которого идут вскользь по ширине ленточки.

Полюсные наконечники образуют щель, в которой размещается ленточка. В них сделан ряд окон (отверстий), чтобы уменьшилась разность хода звуковых волн, действующую на ленточку с обеих сторон. Расстояние между отверстиями вместе с ленточкой $2a$ не превышает 1,7 см, что обеспечивает линейность чувствительности до 15 кГц.

Поскольку электрическое сопротивление ленточки мало (доли Ома), то для согласования с внешней цепью используется трансформатор с сопротивлением выходной обмотки 125 – 250 Ом. Стандартный уровень чувствительности – 57 дБ. Частотный диапазон микрофона составляет 50-16000 Гц. Неравномерность частотной характеристики - не более 8дБ. Характеристика направленности микрофона – кардиоида.

Уязвимое место микрофона – ленточка, рвётся от сильного дуновения ветра. Поэтому микрофон применяется, главным образом, в помещениях (музыкальные студии и т.д.)

Конденсаторный микрофон. Изобретён американским учёным Э. Венте в 1917. Является лучшим среди других по своим качественным показателям..

Конструкция конденсаторного микрофона (рис.2.7) представляет собой конденсатор, один из электродов которого массивный - 3, а второй тонкая натянутая мембрана – 1.

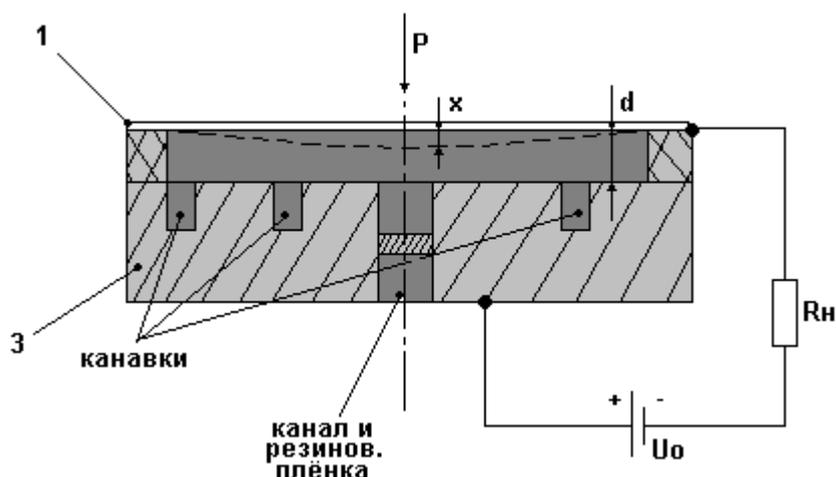


Рис. 2.7. Измерительный конденсаторный микрофон.

Диафрагма помещена над неподвижным плоским электродом, так что зазор – d между ними весьма мал. Диафрагма электрически соединена с корпусом микрофона и сильно натянута. Диафрагма, обладающая высокой упругостью, изготавливается либо из стальной фольги, покрытой слоем золота, либо из металлизированной полимерной плёнки и имеет толщину $20 \div 30$ мкм. Зазор d составляет $20 \div 40$ мкм.

Неподвижный электрод 3 изолирован от корпуса высококачественным изолятором (янтарь, кварц). Электроды через нагрузочное сопротивление R_n соединены с источником поляризирующего постоянного напряжения U_0 .

При колебаниях диафрагмы под действием внешнего акустического поля изменяется ёмкость C_0 между диафрагмой и неподвижным электродом. А так заряд q остаётся постоянным из-за большой постоянной времени $\tau = C_0 R_n$, то изменяется напряжение на нём ΔU , равное э.д.с. от действия звукового давления на диафрагму. В результате изменения реактивного сопротивления цепи напряжение на выходе изменяется пропорционально смещению мембраны.

Особенностью микрофона является расположение усилителя в непосредственной близости от капсулы микрофона (C_0 мало).

Область использования конденсаторного микрофона:

1) измерительные микрофоны с диапазоном частот Δf от $20 \div 30$ Гц до $30 \div 40$ кГц при неравномерности частотной характеристики до 1дБ в диапазоне до 10 кГц и 6дБ свыше 10 кГц;

2) высококачественные системы звукозаписи и звукопередачи в диапазоне частот $\Delta f = 20 \div 20000$ Гц при неравномерности частотной характеристики 6дБ;

3) комбинированные приёмники с диапазоном частот $\Delta f = 50 \div 15000$ Гц при неравномерности частотной характеристики 6дБ.

Выражение для чувствительности имеет вид:

$$E \approx 4\pi C_0 C_1 U_0,$$

где C_0 - ёмкость конденсатора мембрана - неподвижный электрод;

C_1 - результирующая гибкость;

U_0 - поляризующее напряжение.

Наружные диаметры эталонных микрофонов 23,77; 13,2 и 7 мм. Они обеспечивают преобразование звуковых волн в диапазоне частот от 2 Гц до 100 кГц.

Для конденсаторных микрофонов характерны постоянная чувствительность в широком диапазоне частот, малый уровень шума и незначительная зависимость чувствительности от температуры. Они являются точными измерительными приборами, поэтому с ними надо бережно обращаться. Наиболее уязвимой частью микрофона является мембрана, изготовленная электролитическим методом, толщиной порядка 2 - 6 мкм .

Для калибровки измерительных микрофонов применяют вспомогательные устройства - электростатический возбудитель, пистонфон - калибратор, шариковый и тональный калибратор и др.

Технические требования к измерительным микрофонам изложены в государственном стандарте, в котором предусмотрена стандартизация характеристик измерительных микрофонов, методов их градуирования и областей применения ГОСТ 8.153.

Недостатки микрофона: микрофон чувствителен к сильному перепаду температур, со временем ослабевает натяжение мембраны, слабеет изоляция, появляется треск.

Электретный микрофон. Изобретённым японским учёным Ёгути в начале 20-х гг. 20 в. По принципу действия и конструкции схож с конденсаторным.

Роль неподвижной обкладки конденсатора и источника постоянного напряжения играет пластина из электрета. Поляризующее напряжение образовано предварительной электризацией одного из электродов, изготавливаемого из полимеров или керамических поляризующихся материалов. Такой электрод имеет металлическое покрытие, которое является электродом конденсатора, а электрет служит источником поляризующего напряжения.

Частотный диапазон микрофона – $50 \div 15000$ Гц при неравномерности частотной характеристики $10 \div 15$ дБ, уровень собственного шума - $27 \div 38$ дБ. Механические, акустические характеристики аналогичны конденсаторному микрофону.

Недостаток микрофона - старение электрета.

Пьезоэлектрический микрофон. Впервые сконструирован советскими учёными С. Н. Ржевкиным и А. И. Яковлевым в 1925. Также широко используются в акустических измерениях. Они прочнее конденсаторных, имеют малый вес и обладают более равномерной частотной характеристикой, чем электродинамические микрофоны, они дешевле микрофонов других типов.

В пьезоэлектрическом микрофоне используется явление пьезоэффекта: звуковые волны воздействуют на пластинку из пьезокристалла (например из сегнетовой соли), вызывая на её поверхности появление электрических зарядов – прямой пьезоэффект.

Существует две разновидности конструкции микрофона: ячейковая (рис. 2.8) и мембранная (рис. 2.10).

В конструкции ячейкового пьезомикрофона внутри прямоугольной рамки 1 (текстолит) размещают два биморфных элемента 2, разделённых прокладками 3 из вязкого материала (висколоид). На верхние и нижние поверхности рамки и пьезоэлементов наклеивается парафиновая бумага для механического скрепления и изоляции объёма 4.

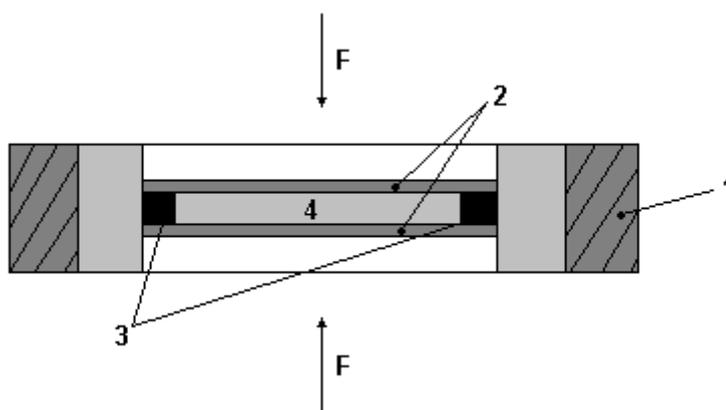


Рис. 2.8. Ячейковый пьезомикрофон

Две пластинки биморфного элемента (рис. 2.9) склеиваются так, что электрическая поляризация противоположна. Если подать напряжения, то одна пластинка стремится растянуться, а другая сжаться. Но так как они склеены и не могут двигаться одна относительно другой, то совершаются колебания изгиба. Материалом для биморфных элементов служит пьезокерамика ТБК-3, ЦТС-19 и других материалов.

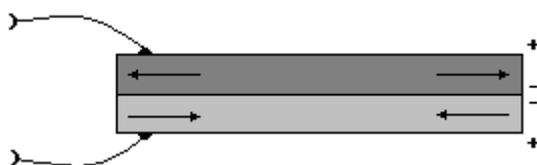


Рис. 2.9. Биморфный элемент

Частотный диапазон микрофона – $50 \div (7000 \div 8000)$ Гц при неравномерности частотной характеристики 6 дБ.

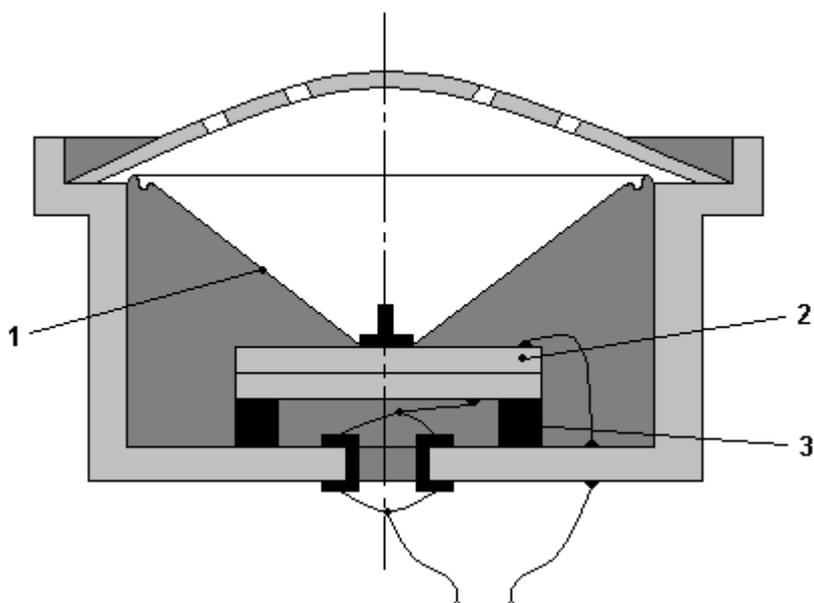
В конструкции мембранного пьезомикрофона (рис. 2.10) лёгкая коническая диафрагма 1 бумага, соединена вершиной конуса с биморфом 2, концы которого закреплены на опорах 3. Так как в механическую систему добавилась диафрагма, то частота механического резонанса системы ниже, чем у ячейкового микрофона.

Современные пьезоэлектрические микрофоны обладают диапазоном частот $3 \dots 20000$ Гц и могут работать в интервале температур от -10 до $+70$ °С.

Пьезоэлектрические микрофоны имеют широкий круг применения и, в частности, используются в портативных шумомерах.

Недостатки пьезомикрофона:

- 1) старение пьезоматериала;
- 2) зависимость характеристик от температуры;
- 3) высокое собственное ёмкостное сопротивление, дающее неравномерность частотной характеристики;
- 4) хрупкость;
- 5) сложность механической системы.



2.10. Мембранный пьезомикрофон.

Электромагнитный микрофон. В электромагнитном микрофоне конструкции приемника давления (рис. 2.11) звуковые волны воздействуют на диафрагму 3.

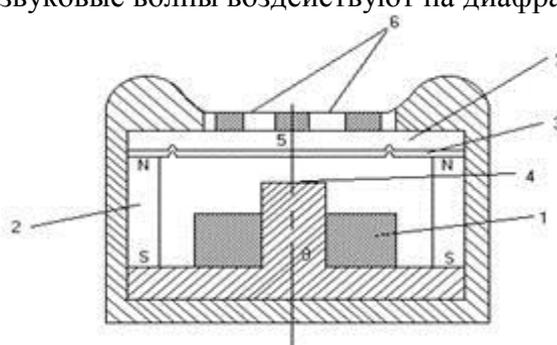


Рис. 2.11. Электромагнитный микрофон конструкции приемника давления

При колебании диафрагмы изменяется воздушный зазор 5 в магнитной цепи между диафрагмой 3 и полюсным наконечником керна 4. Изменение этого зазора приводит к модуляции магнитного потока, который создается постоянным магнитом 2, сделанным из высококоэрцитивных материалов (сплавы Al и Ni). Магнитный поток проходит через сердечник катушки, полюсный наконечник, воздушный зазор и диафрагму. Сердечник и диафрагму изготавливают из мягкого магнитного материала (FeNi сплавы). При изменении магнитного потока, протекающего через сердечник 8, в катушке 1 возникает э.д.с.

В конструкции микрофона имеется также резонатор Гельмгольца, включающий в себя отверстия в амбушуре 6 и надмембранный объем 7.

Частотная характеристика микрофона равномерна до частоты 1000 Гц. Неравномерность частотной характеристики составляет около 4 дБ/окт., уровень чувствительности – 45 дБ, диапазон частот – 250 ÷ 5000 Гц.

Помимо конструкции приемника давления находит также применение конструкция приемника градиента давления (рис.2.12).

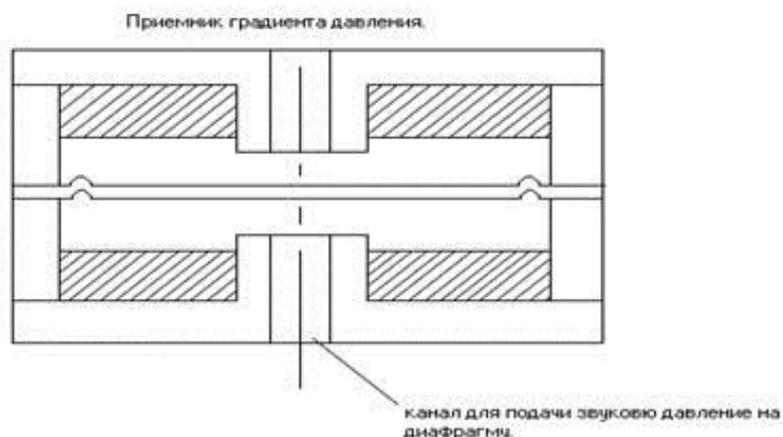


Рис. 2.12. Конструкция приемника градиента давления

Электромагнитный микрофон используют, как правило, для передачи речи. При этом микрофон располагают вблизи говорящего 2-2,5 см, на оси рта, чтобы отсутствовали завихрения при произношении взрывных звуков речи.

Электромагнитные микрофоны применяются главным образом в радиоловительских устройствах и слуховых аппаратах.

Порошковый угольный микрофон. Впервые сконструирован русскими изобретателями М.Махальским в 1878 и независимо от него П.Голубицким в 1883.

Принцип действия микрофона (рис. 2.13)

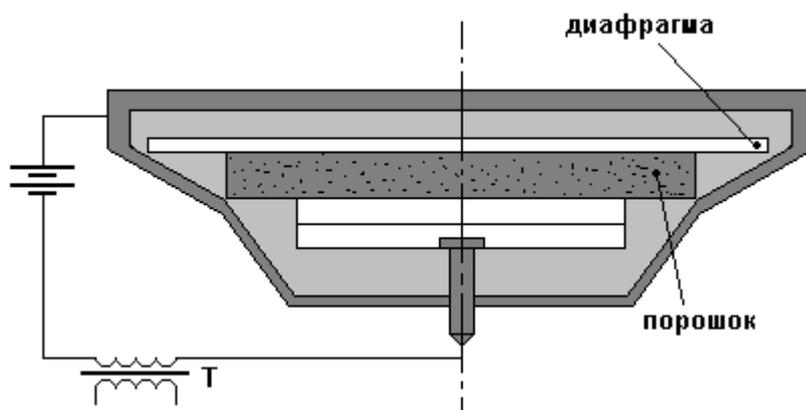


Рис. 2.13. Порошковый угольный микрофон

основан на свойстве угольного порошка изменять своё сопротивление в зависимости от силы сжатия зёрен, составляющих порошок. В микрофоне токопроводящая угольная или металлическая *диафрагма* (мембрана) под действием звуковых волн колеблется, изменяя плотность и, следовательно, электрическое сопротивление находящегося в капсуле и прилегающего к мембране угольного порошка.

Вследствие этого сила тока, протекающего через микрофон, также изменяется. Образуется пульсирующий ток, который в простейшем случае, протекая по проводной линии к *телефону*, вызывает колебания мембраны последнего, соответствующие колебаниям мембраны микрофона.

Полоса частот микрофона составляет $\Delta f = 300 \div 3400$ Гц, а коэффициент нелинейных искажений - $15 \div 20\%$. Управляющий параметр – плотность засыпки порошка: с увеличением плотности - уменьшается ток и улучшается частотная характеристика, чем меньше плотность

– тем больше ток, но частотная характеристика ухудшается. Шум обусловлен трением между зёрнами.

В результате многолетнего улучшения конструкции и электрических параметров микрофона с угольным порошком был создан микрофон капсюльного типа, широко применяемый в телефонии.

Ключевые слова: микрофон, диаграмма направленности, приемник давления, приемник градиента давления, измерительный, электродинамический катушечный, электродинамический ленточный, конденсаторный, электретный, пьезоэлектрический, электромагнитный, угольный.

Контрольные вопросы

1. Как называются приемники звука в воздушной среде?
2. Для чего применяются микрофоны?
3. Чем отличаются измерительные конденсаторные микрофоны от других микрофонов?
4. По способу преобразования звука на какие группы делятся микрофоны?
5. Перечислите и объясните основные параметры (характеристики) микрофонов.
6. Объясните работу электродинамического катушечного микрофона.
7. Объясните работу электродинамического ленточного микрофона.
8. Объясните работу конденсаторного микрофона.
9. Объясните работу электретного микрофона.
10. Объясните работу пьезоэлектрического микрофона.
11. Объясните работу электромагнитного микрофона.
12. Объясните работу угольного порошкового микрофона.

2.3. Образцовый источник шума

Образцовый источник шума должен излучать постоянный широкополосный шум без дискретных и узкополосных составляющих в диапазоне от 100 до 10000 Гц. Показатель направленности не должен превышать \pm 6дБ. Он должен иметь размеры, не превышающие 0,5 м и должен быть установлен на виброизолирующих прокладках. Отклонение уровней звуковой мощности образцового источника шума из-за изменений условий его работы не должен быть более \pm 0,5 ... \pm 1,0 дБ.

В паспорте образцового источника шума должны быть указаны:

- уровни звуковой мощности (L_{PR} , дБ) в октавных и треть октавных полосах частот;
- скорректированный уровень звуковой мощности L_{PAR} ;
- показатель направленности излучения в треть октавных полосах частот в вертикальной и горизонтальной плоскостях, G, дБ;
- уровень звука в контрольной точке измерения;
- координаты контрольной точки измерения относительно образцового источника шума.

Эти характеристики источника должны быть определены точным методом при его установке на звукоотражающей плоскости.

Уровни звукового давления на всех октавных полосах должны быть достаточно велики, чтобы превосходить уровни помех на 10 дБ и более. Источник шума модель А-2, разработанный во ВНИИФТРИ, действует в диапазоне частот 125 Гц - 3 кГц. На расстоянии 1 м из-

лучатель обеспечивает уровни 85 - 90 дБ относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па. В излучателе использован аэродинамический шум, создаваемый при вращении барабана с лопастями.

Проверка образцового источника шума осуществляется согласно МИ 305 .

Ключевые слова: образцовый источник шума.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен образцовый источник шума?
2. Какие требования предъявляются к образцовым источникам шума?
3. Какие метрологические характеристики должны быть указаны в паспорте образцового источника шума?
4. Каким должен быть уровень звукового давления в источниках шума?

2.4. Громкоговорители

Громкоговоритель – это преобразователь электрических низкочастотных колебаний в звук для излучения звука в окружающее воздушное пространство. Громкоговоритель, как правило, является частью акустической системы.

Акустической системой называется акустическое устройство, содержащее один или несколько громкоговорителей, акустическое оформление и электрические устройства (фильтры, трансформаторы и др.), и предназначенное для использования в качестве функционального звена в бытовой радиоэлектронной аппаратуре.

Сердцевиной громкоговорителя является его головка. Головка громкоговорителя – это электроакустический преобразователь, предназначенный для преобразования электрических сигналов звуковой частоты в акустические колебания. Головка громкоговорителя является одним из важнейших ключевых звеньев электроакустического тракта, т.к. её свойства оказывают большое влияние на работу тракта в целом.

Классификация головок громкоговорителей может быть проведена по ряду признаков.

1. По принципу действия электроакустического преобразователя головки подразделяются на четыре группы: индукционные, емкостные, пневматические и ионные (рис. 2.14).

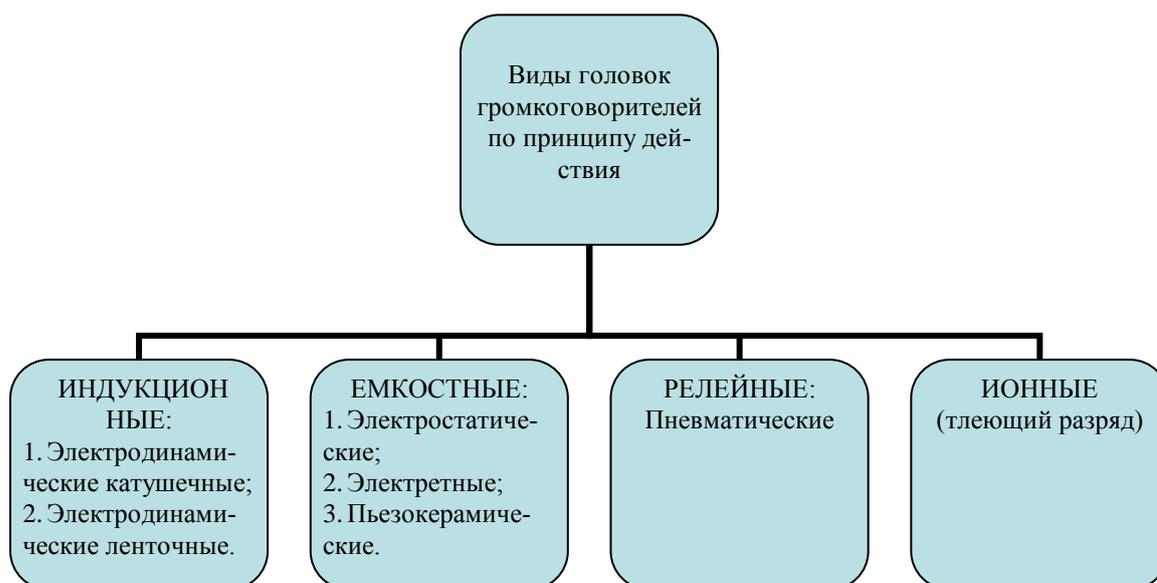


Рис. 2.14. Классификация головок громкоговорителей по принципу действия

Об индукционных и емкостных преобразователях было подробно рассказано в разделах 2.1 – 2.2.

Принцип действия пневматических преобразователей основан на модуляции потока воздуха с помощью колеблющейся заслонки, приводимой в движение электродинамическим излучателем.

Принцип действия ионных преобразователей основан на использовании ламп тлеющего разряда. Ионные головки являются оптимальными с точки зрения согласования с рабочей средой, благодаря отсутствию механических элементов и высокому качеству воспроизведения без искажений.

2. По способу трансформации акустической энергии различают головки
 - прямого излучения (диффузорные), в которых поверхность диафрагмы излучает звук непосредственно в окружающую среду;
 - рупорные, в которых диафрагма излучает звук в предрупорную камеру, где происходит усиление звукового давления.
3. По полосе передаваемых частот различают головки
 - широкополосные от $40 \div 125$ до $7100 \div 8000$ Гц и более;
 - низкочастотные от $20 \div 80$ до 5000 Гц;
 - среднечастотные от 200 до $4000 \div 7000$ Гц;
 - высокочастотные от $1000 \div 5000$ Гц до $12500 \div 20000$ Гц.
4. По форме диафрагмы головки бывают конусные, купольные и плоские.
5. По типу акустического оформления головки бывают
 - для открытых акустических систем;
 - для закрытых акустических систем;
 - с фазоинвертором;
 - для акустических систем с пассивным излучателем и другие.
6. По области применения головки предназначены
 - для переносной радиоэлектронной аппаратуры;
 - для стационарной радиоэлектронной аппаратуры;
 - для высококачественных бытовых акустических систем;
 - для студийной, концертной аппаратуры;
 - для абонентских громкоговорителей и других применений.

Технические характеристики головок громкоговорителей включают в себя:

- 1) эффективный рабочий диапазон частот;
- 2) неравномерность частотной характеристики;
- 3) уровень характеристической чувствительности

$$\beta = 20 \lg \frac{P}{\beta_0}$$

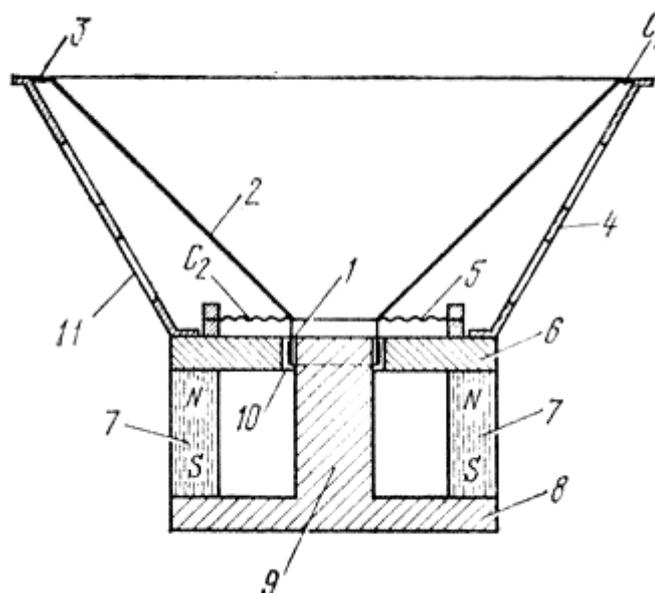
где $\beta_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па·Вт, P – среднее звуковое давление

- 4) номинальное среднее звуковое давление;
- 5) полный коэффициент гармонических искажений при номинальной мощности;
- 6) номинальное электрическое сопротивление;
- 7) номинальная мощность, при которой нелинейные искажения не превышают требуемых;
- 8) предельная шумовая мощность, при которой головка может длительное время работать без механических и тепловых повреждений;
- 9) максимальная долговременная мощность;
- 10) частота основного резонанса;
- 11) полная добротность и другие.

Общие технические условия на головки громкоговорителей приведены в ГОСТ 4.383.001-85. «Головки громкоговорителей динамические: общие технические условия».

Динамический диффузионный громкоговоритель (рис. 2.15). Принцип действия обратен принципу действия электродинамического микрофона. Механическая подвижная система

ит из
фузо-
ка-
кой и
ле-



состо-
дит из
диф-
фуз-
ора с
туш-
крепле-
ний.

Рис. 2.15. Динамический диффузорный громкоговоритель:

- 1 – звуковая катушка; 2 – диффузор; 3 – подвес диффузора; 4 – корпус; 5 – шайба; 6 и 8 – фланцы; 7 – магниты; 9 – сердечник; 10 – кольцевой зазор; 11 – отверстия для тыльного излучения.

Катушка с проводом 1 находится в радиальном магнитном поле, создаваемым постоянным магнитом 2 и магнитопроводом, состоящим из фланцев 3,4 и керна 5. При пропускании через нее переменного тока она испытывает действие электромагнитной силы, которая приводит в движение диффузор 6, жестко определенный с катушкой 1 и подвешенный к корпусу 7 по внешнему краю 8 и центрируемый гибким подвесом (шайбой) 9. Вследствие этого диффузор является поршневым излучателем и имеет одну степень свободы колебаний (по осевому направлению).

Ключевые слова: громкоговоритель, акустическая система, головка, электроакустический преобразователь, частотная характеристика, диффузор.

Контрольные вопросы

1. Что такое громкоговоритель?
2. Что такое акустическая система?
3. Что такое головка громкоговорителя?
4. Дайте классификацию головок по принципу действия.
5. Перечислите технические характеристики головок громкоговорителей.
6. Объясните принцип действия динамического диффузионного громкоговорителя.

2.5. Шумомеры и анализаторы спектра

Для измерения характеристик шума используются шумомеры, анализаторы и измерительные тракты, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 17187-81(СТ СЭВ 1351-78), а также полосовые фильтры по ГОСТ 17168-82 (СТ СЭВ 1807-79).

Устройство шумомеров. Измерения уровня звукового давления - воздушного шума, производятся с помощью специальных приборов - шумомеров. Общая схема шумомера выбрана так, чтобы его свойства приближались к свойствам человеческого уха. Чувствительность уха зависит от частоты звука, а вид этой зависимости изменяется с изменением интенсивности измеряемого шума (звука).

Шумомер содержит ненаправленный измерительный микрофон, усилитель, корректирующие RC-фильтры, детектор и стрелочный прибор — индикатор. Шкала прибора градуируется в децибелах относительно среднеквадратического уровня звукового давления $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Шумомер снабжен ступенчатым делителем (через 10 или 20 дБ) напряжения - аттенуатором. Иногда применяют два аттенуатора для предотвращения перегрузок. Это позволяет использовать шумомер в динамическом диапазоне от 20 до 140 дБ. Обычно питание шумомеров осуществляется от батарей.

Измеряемый уровень звукового давления определяется суммированием показаний аттенуаторов и индикатора. Для оценки пульсирующих шумов шумомер имеет регулировку демпфирования стрелочного индикатора - "Быстро" и "Медленно".

Коэффициент усилительных устройств шумомера должен быть постоянным. В современных шумомерах имеется устройство для калибровки усиления электрического тракта.

Для единообразия и идентичности измерений требования к параметрам шумомеров обычного применения и прецизионных шумомеров регламентированы стандартами ГОСТ 17187-81 и Международной электротехнической комиссией (МЭК) МЭК 651 и МЭК 804. Требования МЭК регламентируют три частотные характеристики А, В и С для шумомеров, а также величину допусков на эти характеристики.

В шумомере имеются 3 комплекта фильтров, обеспечивающих нужную форму частотной характеристики: А - при малой громкости ~40 фон (используется в диапазоне 20—55 фон), В — средней громкости ~70 фон (55—85 фон) и С — большой громкости (85—140 фон). Характеристика при большой громкости равномерна в полосе частот 30—8000 гц.

Шкала А применяется также для измерения уровня громкости, выраженного в единицах — децибел с пометкой А, т. е. дб (А), при любой громкости. Величиной уровня звука в дб (А) пользуются при нормировании громкости шума в промышленности, жилых домах и на транспорте. Переключение фильтров производится вручную в зависимости от громкости измеряемого звука (шума).

Выпрямленный квадратичным детектором сигнал усредняется за время, соответствующее постоянной времени уха 50—60 мсек (промежуток времени, в течение которого ухо вследствие своей инерционности воспринимает два отд. звуковых сигнала как один слитный). Шкала выходного прибора градуируется в децибелах относительно среднеквадратичного уровня звукового давления ($2 \cdot 10^{-5}$ н/м²) по одной из трех шкал — А, В или С.

Современный шумомер представляет собой компактный портативный прибор, питание которого осуществляется при помощи находящихся внутри сухих батарей. Микрофон, электронная схема и индикатор шумомера должны быть предельно устойчивы по отношению к изменениям температуры, влажности, барометрического давления, а также стабильны во времени.

Калибровка шумомеров. Перед измерением шумомер необходимо откалибровать с помощью специального акустического шумового или тонального калибратора или пистонфона, то есть установить номинальный коэффициент усиления измерительного тракта. Шумомеры калибруются следующим образом.

Регулятор калибровки шумомера устанавливается на значение, совпадающее со значением создаваемого пистонфоном уровня давления. По возможности калибровку следует проводить при частотном приведении LINEAR (линейно) шумомера.

Приборы, в которых не предусмотрено такое частотное приведение, требуют согласования создаваемого пистонфоном уровня звукового давления путём использования корректирующего значения $\Delta L(f)$. Для стандартных кривых приведения А, В, С и D действует:

$$L_{A,B,C,D} = L_{LIN} + \Delta L(f)_{A,B,C,D}$$

При калибровке шумомеров, позволяющих измерять с приведением частоты, надо учитывать допуски кривых частотного приведения. Эти допуски входят в дополнительные погрешности.

В конструкциях современных шумомеров, как правило, предусматривается как измерение параметров шума, так и его спектральный анализ с использованием анализатора спектра.

Анализаторы спектра. Анализ периодических процессов осуществляется анализаторами гармоник, которые позволяют определить величину амплитуд колебаний, составляющих спектр и ширину полосы частот спектра.

Непериодические процессы, анализируются спектрометрами, позволяющими определить огибающую спектра и его интенсивность в пределах заданной полосы частот.

Любой анализатор спектра состоит из датчика, частотно-избирательной системы и индикатора. В качестве частотно-избирательной системы используются электрические и электромеханические резонансные устройства (колебательный контур, кварц, камертон, фильтр и т.п.). Индикатором спектра служат стрелочный прибор, электронно-лучевая трубка и т.д.

В панорамных анализаторах спектр регистрируется на электронно-лучевой трубке. В панорамных спектрометрах применяют как последовательный, так и одновременный частотный анализ.

Сущность одновременного частотного анализа заключается в том, что все частотные составляющие в определённой полосе частот выявляются одновременно. Для этого используют большое число резонаторов со смещёнными резонансными частотами, которые одновременно находятся под воздействием исследуемого сигнала. Анализирующие свойства этих приборов характеризуются шириной полосы пропускания частот, коэффициентом передачи, крутизной спада частотной характеристики, разрешающей способностью, динамическим диапазоном и временем анализа.

Применяемые для исследования шума и вибрации анализаторы спектра обычно имеют ширину прозрачности в одну октаву, $\frac{1}{2}$ октавы или $\frac{1}{3}$ октавы. Чем уже полоса пропускания фильтра, тем больше сведений о спектре излучаемого колебательного процесса можно получить с его помощью. Уровень звукового давления в измеряемой частотной полосе относят к среднегеометрической частоте этой полосы.

При измерениях шума и звуковых вибраций исследования проводятся в восьми октавных полосах, охватывающих диапазон от 50 до 8000 Гц (см. табл. 2.1)

Таблица 2.1

Номер октавы	1	2	3	4	5	6	7	8
Среднегеометрические частоты октавных полос в Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000

Современные шумомеры.

Шумомер-анализатор спектра ОКТАВА-101АМ предназначен для измерений звука, воздействующего на человека на производстве, в транспорте, в жилых и общественных зданиях и т.д. Прибор также может использоваться для измерения шумовых характеристик машин, измерения звукоизоляции, определения звуковой мощности, аттестации помещений. По дополнительному заказу прибор может оснащаться опциями «Инфразвук», «Общая вибрация», «Локальная вибрация», «Ультразвук», «Мониторинг шума».



ОКТАВА-101АМ является шумомером 1 класса по ГОСТ 17187, МЭК 60651/60804 и МЭК 61672-1. Встроенные октавные и 1/3-октавные фильтры прибора удовлетворяют 1-му классу по ГОСТ 17168 и МЭК 61260.

Прибор может одновременно работать в режиме шумомера и анализатора спектра и позволяет за один сеанс измерить все многочисленные параметры, предписанные стандартами и санитарными нормами. Характеристики прибора:

Диапазон измерений 15*-146 дБА.

Цифровая обработка сигнала.

Одновременное измерение спектров уровней звукового давления в октавных и третьоктавных полосах частот, скорректированных уровней звука, в том числе эквивалентных, большой динамический диапазон и т.д.

Все текущие результаты измерений можно записать в память прибора одним нажатием кнопки.

Прибор может соединяться с USB портом персонального компьютера типовым USB-кабелем.

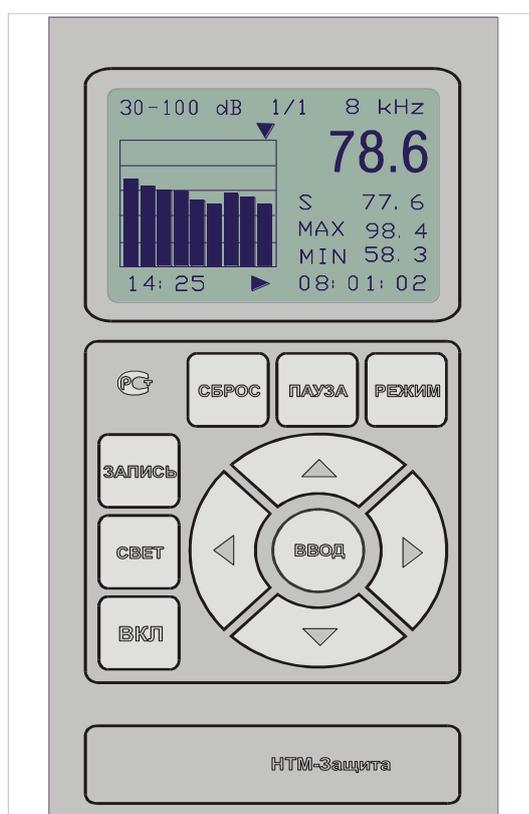
Шумомер интегрирующий ШИ-01 предназначен для измерений уровней звука с частотными характеристиками А, С, общего уровня звукового давления звукового и инфразвукового диапазонов с частотной характеристикой ЛИН, уровней звукового давления в октавных и третьоктавных полосах.

Измеряемые характеристики:

Для частотных коррекций А, С, - уровни звука, для частотной коррекции ЛИН – общий уровень звукового давления (УЗД) звукового и инфразвукового диапазонов. Для всех частотных коррекций одновременно, в реальном времени вычисляются эквивалентные уровни и уровни с СКЗ детекторами медленно (S), быстро (F), импульс (I), максимальные и минимальные значения за время измерения.

Для октавных фильтров с номинальными средними геометрическими частотами 2; 4; 8; 16; 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц - эквивалентные УЗД, УЗД с детектором медленно (S), максимальные и минимальные значения во всех детекторах за время измерения – одновременно во всех полосах в реальном времени.

Для третьооктавных фильтров с номинальными средними геометрическими частотами 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400,0; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000; 5000; 6300; 8000; 10000 Гц - эквивалентные УЗД, максимальные и минимальные значения за время измерения – одновременно во всех полосах одного из трех режимов в реальном времени.



Шумомер может применяться для определения источников и характеристик шума звукового и инфразвукового диапазонов:

на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий, на территории жилой застройки на соответствие требованиям санитарных норм;

при исследовании, испытаниях и эксплуатации машин и механизмов;

при разработке и контроле качества изделий.

Технические характеристики:

Шумомер соответствует требованиям ГОСТ 17187-81, МЭК 651 и МЭК 804 для шумомера 1 класса. Октавные и третьооктавные фильтры анализатора соответствуют требованиям 1 класса МЭК 1260. В шумомере используется микрофон конденсаторный (МК) типа ВМК-205.

Частотный диапазон измерений, Гц.....от 2 до 20000.
 Частотный диапазон измерений анализатора, Гц:.....от 2 до 10000.

Ключевые слова: шумомер, калибровка шумомеров, звуковое давление, градуировка приемников, средняя квадратическая погрешность, излучатель звука, измерительные тракты, анализатор гармоник, анализатор спектра.

Контрольные вопросы

1. Что собой представляет шумомер?
2. Принцип действия шумомера.
3. Как устроен шумомер?
4. Как и с помощью каких средств измерений осуществляют калибровку шумомеров?
5. Перечислите состав аппаратуры для измерения шума.
6. Чем отличаются анализатор гармоник и спектрометр друг от друга?
7. Из каких блоков состоит анализатор спектра?

2.6. Заглушенные камеры

Заглушенная камера. Заглушенные (безэховые) камеры сооружают, чтобы создать условия свободного поля, т. е. звуковое поле, в котором практически отсутствует посторонний шум и отраженный звук. В таком поле звуковое давление обратно пропорционально расстоянию от акустического центра излучения до точки измерения. Это достигается хорошим изолированием камеры от внешних шумов и вибраций помещения, в котором звуковые волны почти полностью поглощаются при падении на заглушенные поверхности камер.

Заглушенная камера имеет самостоятельную строительную коробку с самостоятельным фундаментом, расположенным внутри здания. Ограждающие конструкции не должны быть жестко связаны с конструкциями основного здания. Схема конструкций пола и стен заглушенной камеры показана на рис. 2.16.

Амортизаторы могут быть резиновые или пружинные.

В заглушенной камере проводятся измерения акустической мощности и уровней шумов, создаваемых различными источниками (промышленными агрегатами, электро- и радиоаппаратурой, бытовыми приборами), исследование акустических свойств конструкций в свободном звуковом поле, а также измерение направленности акустических излучателей и микрофонов. Камеры снабжаются координатными, поворотными устройствами для передвижения измерительных микрофонов и автоматизации измерения.

Для обеспечения малого отражения заглушенные поверхности камер должны иметь высокий коэффициент звукопоглощения во всем диапазоне частот измерений, который достигается применением клиновидных, конусных или реде слоистых звукопоглощающих облицовок. Эффективность звукопоглощающей облицовки оценивают по коэффициенту звукопоглощения, который должен быть не менее 0,95 в диапазоне частот 125 Гц и выше и не менее 0,90 в диапазоне частот ниже 125 Гц, а жесткого пола - 0,06.

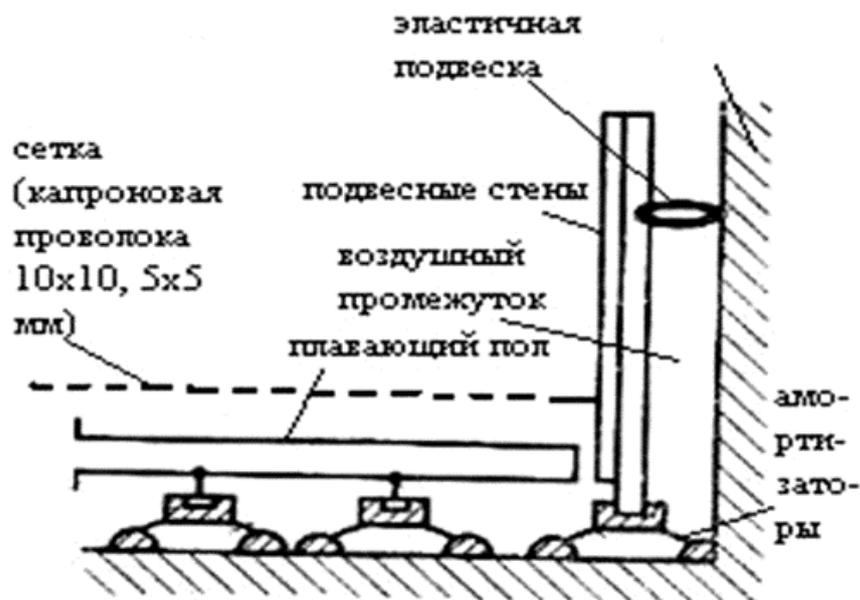


Рис. 2.16. Схема конструкций пола и стен заглушенной камеры

Необходимую толщину покрытия определяют по нижней граничной частоте. Примерная зависимость между нижней граничной частотой измерений f_0 и необходимой толщиной звукопоглощающего покрытия L в виде клиньев из стекловолокна показана на рис. 2.17.

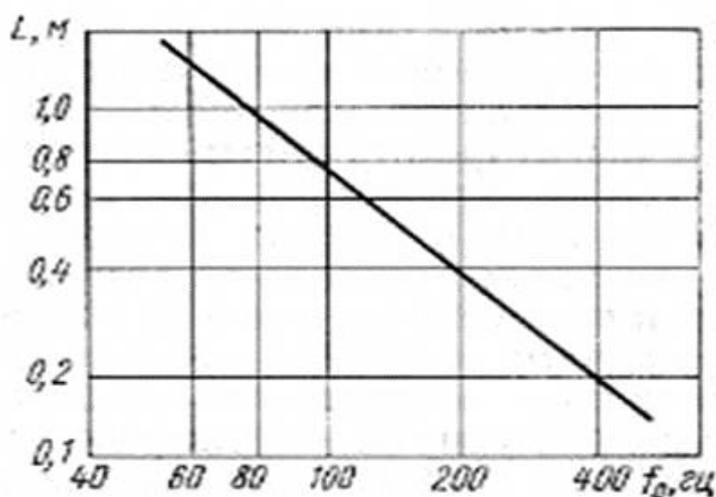


Рис. 2.17. Зависимость между нижней граничной частотой измерений f_0 и толщиной звукопоглощающего покрытия L

Согласно ГОСТ 12.1.024 геометрические (внутренние свободные) размеры $2 \times 1,8 \times 2,8$ м³, объем заглушенной камеры должен быть не менее чем в 200 раз больше объема испытуемого источника шума и не менее чем 100 м³.

При измерениях в заглушенной камере среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерений (S_0) не превышает 0,1...0,2 дБ в диапазоне частот 1...100 кГц, при не исключенной систематической погрешности (Θ_0) 0,2...0,3 дБ. Измерения проводятся при звуковых давлениях 0,05...2 Па.

Обычно камеры снабжаются громкоговорителями, микрофоном, диаметром не более 13 мм, усилителем, генератором чистых тонов, генератором белого шума, самописцем уровня, координатными, поворотными столиками и устройствами для передвижения измерительных микрофонов и автоматизации измерений.

Пригодность заглушенных камер для измерения определяют путем их аттестации и выдачей соответствующего свидетельства. При аттестации заглушенных камер исследуют звуковое поле в камере и определяют его неравномерность.

Проверка звукового поля заглушенной камеры. Для проверки звукового поля в заглушенных камерах громкоговорители должны излучать чистые тона на частотах 63, 80, 100, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 5000, 6300, 8000, 12500, 16000 Гц или полосы белого шума шириной в одну или треть октавы.

Микрофон равномерно перемещают по восьми направлениям от источника шума, т.е. от громкоговорителей. Четыре направления должны проходить из центра излучения к углам камеры, а остальные - выбраны случайно, но не слишком близко по высоте к звукоотражающему полу камеры. В период перемещения микрофона на самописце уровня следует записывать изменение уровней звукового давления с увеличением расстояния от источника по каждому из направлений на каждой частоте. Полученные спады уровней звукового давления следует сравнить с рассчитанными спадами, определяемыми по закону обратно-пропорциональной зависимости (6 дБ при удвоении расстояния от источника шума).

Если разности между измеренными и рассчитанными спадами уровней для каждого направления и каждой части не превышают следующих величин, приведенных в табл. 2.2, то заглушенная камера удовлетворяет требованиям ГОСТ 12.1.024, а в противном случае следует определять постоянную K , учитывающую влияние отраженного звука на результат измерений согласно ГОСТ 12.1.026.

Определение постоянной K . Постоянная K , учитывающая влияние отраженного звука на результат измерений, согласно ГОСТ 12.1.026-80 определяют методом образцового источника шума, либо относительным или ориентировочным методами.

Метод образцового источника шума. Постоянную K в дБ или дБА вычисляют по формуле

$$K = L_p - L_{PR} ,$$

где L_{PR} - уровень звуковой мощности образцового источника шума в полосах частот (по паспорту).

Таблица 2.2

Вид заглушенной камеры	Среднегеометрические частоты треть октавных полос, Гц	Допустимая разность спадов уровней, дБ
Со звукоотражающим (жестким) полом	500	±2,5
	1000 5000	±2,0
	5000	±3,0
со звукопоглощающим полом	500	±1,5
	1000 5000	±1,0
	5000	±1,5

Ключевые слова: акустические камеры связи, камеры малого объема, заглушенные камеры, проверка звукового поля, постоянная K .

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены заглушённые камеры?
2. Что из себя представляет заглушённая камера?
3. Как осуществляется проверка звукового поля в заглушённой камере?
4. Как определяется постоянная K ?

2.7. Реверберационные камеры

Реверберационной камерой называют звуко- и виброизолированное помещение объемом от 60 до 1000 м³, в котором создаются условия отражённого (диффузного) звукового поля.

Реверберационные камеры предназначены для измерения звукоизоляции различных типов ограждающих конструкций от воздушного и ударного шумов, коэффициентов звукопоглощения различных материалов и конструкций и для измерения мощности громкоговорителей.

Важнейшим фактором при конструировании реверберационных камер является обеспечение весьма малого коэффициента звукопоглощения внутренних ограждающих поверхностей. Для получения хорошего звукового поля в реверберационной камере необходимо учитывать следующие требования:

- 1) минимальный объем камеры зависит от нижней граничной частоты; при его увеличении частота уменьшается;
- 2) средний коэффициент звукопоглощения $\alpha \leq 0,05$;
- 3) распределение нормальных мод колебаний объема камеры по частотам зависит от соотношения размеров камеры.



Для того чтобы звук хорошо распределялся по камере, все стенки реверберационной камеры являются отражающими и непараллельными.

Для выполнения этих требований внутренние противоположные поверхности камеры были непараллельными: под углом $5 \div 10^\circ$ друг к другу. В прямоугольных помещениях отношения размеров должны быть различны. Для того чтобы звук хорошо распределялся по камере, все стенки реверберационной камеры должны хорошо отражать звук, что достигает-

ся нанесением на поверхность кирпичных или железобетонных стен, пола потолка стоя бетона или цементной штукатурки толщиной 1 – 2 см с последующим железнением и окраской масляной или эмалевой краской. Обычно реверберационная камера имеет самостоятельную строительную коробку, располагаемую внутри здания на отдельном фундаменте.

Измерения следует проводить вдали от источника звука и вдали от ограждающих поверхностей. Для соблюдения этих условий точку измерения не следует помещать ближе к источнику звука, чем его наибольший размер и не ближе, чем на расстояние $\sqrt{A/5}$ (A – общая эквивалентная площадь звукопоглощения в реверберационной камере).

Эквивалентная площадь звукопоглощения. Согласно статистической теории реверберации, затухание реверберирующего звука в замкнутом помещении после выключения источника зависит от эквивалентного поглощения A в квадратных метрах, связанного с поглощением звука ограждающими поверхностями, оборудованием и воздухом.

Эквивалентная площадь звукопоглощения A реверберационной камеры вычисляется согласно ГОСТ 12.1.025 по формуле

$$A = 0,16 V / T,$$

где V – объём реверберационной камеры, м³;

T – время реверберации, с.

Эквивалентная площадь звукопоглощения A помещения определяется согласно ГОСТ 12.1.028 по формуле

$$A = \alpha_s S_v$$

где S_v – площадь ограничивающих поверхностей помещения, м²;

α_s – средний коэффициент звукопоглощения.

Объём камеры. Существует минимально допустимый объём реверберационной камеры, ниже которого не удаётся достичь диффузности поля. В рекомендациях ISO № 477 (1962 г.) указано, что измерения в камерах объёмам от 100 до 180 м³ могут проводить только на частотах выше $f_{кр}$, определяемых выражением:

$$f_{кр} = 125(180/V)^{1/3},$$

где $f_{кр}$ – критическая частота, Гц.

Объём реверберационных камер и специальных реверберационных помещений, согласно ГОСТ 12.1.027-80, должен быть в пределах от 100 до 300 м³, а согласно ГОСТ 12.1.025-81 – от 200 до 300 м³. Допускается использовать испытательные помещения объёмом от 70 до 2000 м³. В помещениях и камерах объёмом более 300 м³ допускается проводить измерения в октавной (или треть октавных) полосе частот 63 (от 50 до 80) Гц.

Применение камер меньшего объёма допускается при ограничении частотного диапазона измерений согласно таблице 2.3.

Таблица 2.3

Среднегеометрическая частота треть октавной полосы, Гц, не менее	125	160	200
Минимальный объём камеры, м ³	150	100	70

Отношение наименьшей стороны реверберационных камер и помещений к наибольшей не должно превышать 1:3.

Коэффициент звукопоглощения поверхности камеры, на которой устанавливается или к которой крепится источник шума, должен быть не более 0,06, а в реверберационном помещении средний коэффициент звукопоглощения не должен превышать 0,2 во всем диапазоне частот измерения.

При аттестации реверберационных камер определяют:

1. Уровень помех в камере.
2. Степень диффузности поля.
3. Частотные характеристики времени реверберации.

Оценка степени диффузности поля. Существует несколько методов количественной оценки степени диффузности поля в помещении: метод В.В.Фурдуева, оценка по времени реверберации, способ Р.Тилля, метод С.Г.Гершман и другие [1]. Рассмотрим здесь только два первых метода.

Метод, предложенный В.В. Фурдуевым, заключается в сравнении полярных характеристик направленного микрофона, снятых в свободном пространстве (в поле бегущей волны), степень диффузности которого равна нулю, и в исследуемом помещении при достаточном удалении микрофона от источника звука. Чтобы избежать влияния резонансных явлений помещения, полярную характеристику снимают при воздействии на микрофон сигналом в виде узкой полосы «белого» (равно амплитудного) шума.

В идеальном диффузном поле полярная характеристика любого микрофона должна иметь форму окружности. Площадь круга, ограниченная полярной характеристикой, равна S_0 . Если, например, в свободном пространстве полярная характеристика имеет вид кардиоиды, площадь которой равна S_k , то в исследуемом помещении полярная характеристика $D(\theta)$ того же микрофона может иметь любой промежуточный вид между окружностью и кардиоидой. При площади, ограниченной этой характеристикой, равной S_g , мерой диффузности поля d исследуемого помещения является:

$$d = (S_g - S_k) / (S_0 - S_k)$$

В идеальном диффузном поле $S_g = S_0$ и $d = 1$; в поле бегущей волны $S_g = S_k$ и $d = 0$.

Оценка диффузности по времени реверберации. Акустические свойства реверберационных камер могут быть также оценены по времени стандартной реверберации T – это время, в течение которого звуковая энергия в помещении уменьшается после выключения источника звука в 10^6 раз, т.е. на 60 дБ.

Время реверберации в помещении прямоугольной формы можно оценить также расчетным путем с помощью формулы Эйринга

$$T = \frac{0,07V}{S \lg \frac{1}{1-\alpha}}$$

где V – объем помещения, m^3 ;

S – общая площадь ограждающих поверхностей, m^2 ;

α – средний коэффициент звукопоглощения для данной полосы частот.

Для малых поглощений поверхностей помещения ($\alpha < 0,2$), например, для помещений не облицованных звукопоглощающим покрытием, формула Эйринга принимает вид формулы Сэбина:

$$T = \frac{0,16V}{S \alpha}$$

Для реверберационных камер формула Сэбина имеет вид

$$T = \frac{0,16V}{S\alpha + 4\mu V},$$

где μ – коэффициент поглощения звука в воздухе (зависит от влажности и частоты звука).

Измерение времени реверберации T в реверберационной камере осуществляют согласно ГОСТ 12.1.025-81. Для этого в камере звуковое поле создают одним или несколькими громкоговорителями, направленными в углы помещения и излучающими шумовой сигнал со сплошным спектром. После того, как в камере установится постоянный уровень звукового давления, превышающий уровень помех в октавной полосе, не менее чем на 40 дБ, включают лентопротяжный механизм самописца уровня (включённого на выход шумомера). Источник шума выключают и на ленте записывают спад уровня.

Измерение следует проводить не менее чем в трёх точках камеры. При этом в каждой точке должно быть сделано не менее трёх удовлетворительных записей. Запись считается удовлетворительной, если наклон записи спада уровня в линейной части записи составляет угол 45° . По линейной части записи спада уровня вычисляют время реверберации, которое соответствует времени равномерного спада уровня на 60 дБ.

При проверке диффузности звукового поля в реверберационной камере образцовый источник шума размещают в одном или в нескольких положениях, на расстоянии не менее 1,5 м от стен камеры. Ни одна из поверхностей источника не должна быть ориентирована параллельно ближайшей поверхности камеры. Минимальное расстояние между двумя положениями образцового источника шума должна быть не менее $\lambda/2$, где λ - длина волны самой низкой частоты измерения, м.

Реверберационная камера – удовлетворяет условиям ГОСТ 12.1.025, если полученные в октавных полосах величины среднего квадратического отклонения S_m (по результатам измерений уровней звукового давления в полосах частот в 6 точках при работе образцового источника шума) не превышают величин, приведённых в таблице 2.4.

Реверберационные помещения удовлетворяют условиям ГОСТ 12.1.027, если разность между паспортными и фактически измеренными в этом помещении значениями уровней звуковой мощности в октавных полосах частот образцового источника шума не превышают по абсолютной величине значений, приведённых в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Величины, дБ		Разность уровней звуковой мощности, дБ
	Широкополосный шум	Тональный шум	
125	$\pm 1,5$	$\pm 3,0$	5
250	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	3
500	$\pm 1,0$	$\pm 1,5$	3
1000, 2000	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	3
4000	$\pm 1,0$	$\pm 1,5$	3
8000	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	4

Ключевые слова: акустические камеры связи, реверберационные камеры, объём камеры, эквивалентная площадь звукопоглощения, методы оценки, степень диффузности поля, времени реверберации.

Контрольные вопросы

1. Что из себя представляет реверберационная камера?
2. Для чего предназначены реверберационная камера?
3. Что такое объём и эквивалентная площадь звукопоглощения реверберационной камеры?
4. Какие методы оценки степени диффузности поля знаете?
5. Как осуществляется измерение времени реверберации?
6. Как проверяется звуковое поле реверберационной камеры?

2.8. Средства измерений в области физиологической акустики

Аудиометрия (от лат. *audio* — слышу и *...метрия*), акуметрия (от греч. *akúo* — слышу), измерение остроты слуха. Так как острота слуха определяется главным образом порогом восприятия звука, то аудиометрия сводится к определению наименьшей силы звука, воспринимаемого человеком. Наиболее простыми методами аудиометрии являются обнаружение восприятия звуков различной громкости, производимых человеческой речью или камертонами с разных расстояний.

В основном аудиометрию производят специальными электроакустическими приборами — аудиометрами. При изменении на аудиометре высоты (от 100 до 8000 гц) и силы звука (от 0 до 125 дб) устанавливают их минимальную интенсивность, при которой звук становится едва слышимым (порог восприятия). Результаты аудиометрии записываются в виде аудиограммы — кривой, нанесённой на специальную аудиометрическую сетку. Определив по шкале пороговую интенсивность звука у обследуемого, устанавливают степень снижения слуха. Аудиометры служат также для определения других, более сложных тестов.

Аудиометры. Одна из основных задач измерений в области физиологической акустики заключается в исследовании общего состояния слуха, определении повреждения слуха в диагностических целях и при подборе слуховых протезов. Приборы, применяемые для этой цели, называются аудиометрами.

Различают аудиометры тональные, речевые и сплошного спектра частот. Результаты измерений аудиометром выражают в децибелах относительно порога слышимости при воздушной и костной проводимостях среднего здорового человеческого уха.

В любой аудиометр входят:

1) источник звука (генератор синусоидальных сигналов с телефоном на выходе в тональных аудиометрах; магнитофон, воспроизводящий предварительно записанный текст или речевые колебания, возбуждаемые человеческим голосом в речевых аудиометрах; шумовой генератор с телефоном на выходе, воспроизводящий электрические колебания в диапазоне частот 100 - 5000 Гц в аудиометрах сплошного спектра частот);

2) усилитель - прибор, усиливающий сигнал источника звука и корректирующий частотную характеристику аудиометрического тракта, (генератор, усилитель, аттенюатор, телефон, вибратор) так чтобы она соответствовала характеристике порога слышимости среднего человеческого уха;

3) аттенюатор - устройство, регулирующее интенсивность звукового сигнала;

4) телефон или громкоговоритель - устройство, подводящее звуковой сигнал к внутреннему уху при воздушной проводимости;

5) аудиометрический вибратор - устройство, подводящее звуковой сигнал к внутреннему уху через костную проводимость при нагрузке на сосцевидный на отросток височной кости (мастоид) или лобную кость.

В измерительной практике наибольшее распространение получили аудиометры синусоидального тона (тональные). Их основными техническими характеристиками являются следующие:

1) звуковое давление, развиваемое телефоном и аудиометрическим вибратором в человеческом ухе при любой частоте рабочего диапазона и нулевом положении аттенюатора аудиометра, соответствует порогу слышимости по воздушной и костной проводимости звука;

2) рабочий диапазон частот аудиометра с телефоном составляет 100 - 10000 Гц, с вибратором - 125 - 8000 Гц. Реперные частоты аудиометров с фиксированными частотами равны 125, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000, 8000 и 10000 Гц;

3) динамический диапазон уровней звукового давления, развиваемого телефоном аудиометра в ухе на различных частотах, должен находиться в пределах от - 10 до 100 дБ относительно порогового давления.

Единообразие аудиометрических измерений, проводимых в различных клиниках страны, может быть обеспечено при условии, что все находящиеся в эксплуатации аудиометры будут иметь единый аудиометрический нуль, т. е. соответствующие порогу слышимости по воздушной и костной проводимостям звуковые давления, развиваемые телефоном и вибратором в ухе среднего слушателя.

Результаты субъективных измерений порогов слышимости в значительной степени зависят от условий и методы измерений, количества обследуемых лиц, их возраста, профессии, тренировки и ряда других причин. Так как эти измерения требуют больших затрат труда и времени, то метрологическое хранение и воспроизведение порога слышимости осуществляют при помощи прибора "искусственное ухо" и телефона (при воздушной проводимости звука), прибора "искусственный мастоид" и аудиометрического вибратора (при костной проводимости звука).

Условия испытаний аудиометров должны соответствовать ГОСТ 20790-82 и ГОСТ 27072-86. «Генераторы сигналов диагностические звуковые. Аудиометры. Общие технические требования и методы испытаний».

Прибор "искусственное ухо" предназначен для измерения звукового давления, развиваемого в акустической камере телефонами, применяемыми в аппаратуре связи, радиовещании и аудиометрах. При помощи приборов "искусственное ухо" градуируют (поверяют) измерительные телефоны и телефоны воздушной проводимости аудиометров.

Основными элементами прибора являются: конденсаторный микрофон, усилительно - питающее устройство и камера, образующая с микрофоном и телефоном аудиометра замкнутую воздушную полость объемом 6 см². При помощи микрофона измеряют звуковое давление, развиваемое телефоном в камере, акустическое сопротивление которой, измеренное со стороны телефона, соответствует акустическому сопротивлению статистически среднего человеческого уха.

Предметом метрологического хранения при воздушной проводимости звука являются эквивалентные пороговые уровни звуковых давлений, развиваемые телефоном аудиометра в приборе "искусственное ухо", когда к зажимам телефона подведены пороговые напряжения, т. е. напряжения, измеренные при субъективном определении.

Методы и средства поверки измерительных приборов типа «Ухо искусственное» должны соответствовать ГОСТ 8.154-75. «ГСИ. Приборы измерительные типа «Ухо искусственное». Методы и средства поверки».

Прибор "искусственный мастоид" применяется для градуировки (поверки) аудиометрических вибраторов и приборов костной проводимости.

Основными элементами прибора являются элементы, имитирующие массу головы, податливость черепа, упругие и диссипативные свойства кожи. Механическое устройство является сопротивлением нагрузки для испытываемого вибратора. С помощью чувствительного элемента измеряют амплитуду колебаний вибратора.

Предметом метрологического хранения при костной проводимости являются эквивалентные пороговые амплитуды колебания аудиометрического вибратора, развиваемые при работе на приборе "искусственный мастоид", когда к вибратору приложено пороговое напряжение, т. е. напряжение, измеренное при субъективном определении порога слышимости по костной проводимости.

Проверка аудиометров. Так как коэффициенты усиления усилительного тракта аудиометра, чувствительности телефона и вибратора могут со временем изменяться, то для обеспечения правильности измерений аудиометры необходимо периодически проверять.

Проверка аудиометра включает:

- проверку частотного диапазона;
- проверку аттенюатора;
- определение частотной характеристики телефона;
- определение пороговых напряжений телефона;
- определение частотной характеристики чувствительности вибратора;
- определение пороговых напряжений вибратора.

Частотный диапазон аудиометра проверяют при всех оцифрованных значениях шкалы частот аудиометра методом сравнения с известной частотой по схеме, приведенной на рис. 2.18.

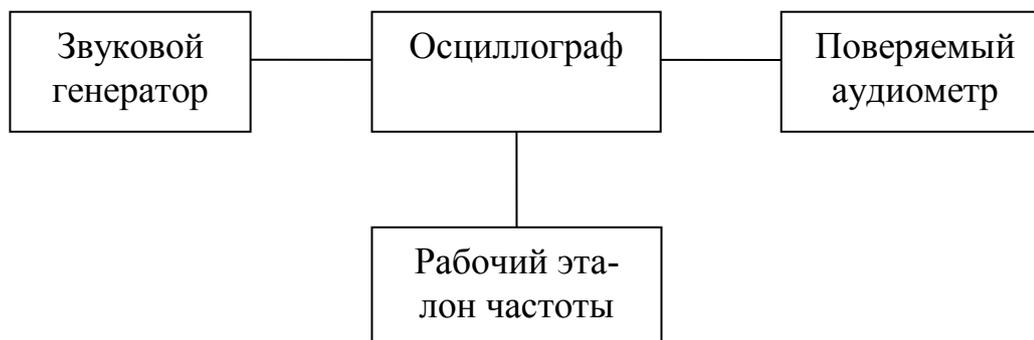


Рис. 2.18. Блок-схема установки для проверки аудиометров

В качестве источника известной частоты применяют звуковой генератор со шкалой плавной расстройки частоты, градуированной в процентах от значения частоты, устанавливаемого по основному лимбу. Наличие шкалы плавной расстройки позволяет определить погрешность аудиометра по частоте непосредственно в процентах.

Частоту генератора сличают с частотой 1000 Гц рабочего эталона частоты с помощью электронного осциллографа по фигурам Лиссажу.

Погрешность аудиометра по частоте не должна превышать $\pm 3\%$. Требования столь высокой точности вызваны большой неравномерностью частотной характеристики телефонов и аудиометрических вибраторов (доходящей до 20 дБ), вследствие чего незначительное отклонение по частоте от оцифрованного значения может вызвать погрешность измерения 6 - 10 дБ.

Аттенюатор аудиометра проверяют при частотах 1000 и 10000 Гц методом сравнения с образцовым делителем по схеме, приведенной на рис. 2.19.



Рис. 2.19. Схема поверки электрических параметров аудиометра

Погрешность аттенюатора не должна превышать $\pm 0,5$ % дБ.

Частотную характеристику чувствительности телефона определяют на образцовом приборе "искусственное ухо". При этом телефон устанавливают на прибор "искусственное ухо" и прижимают с силой 5 Н. Подавая от звукового генератора напряжение U_T к клеммам телефона, измеряют электронным вольтметром напряжение U_y , развиваемое прибором "искусственное ухо" под действием звукового давления, создаваемого телефоном.

Измерения проводят в диапазоне частот 125 - 1000 Гц. Строят частотную характеристику чувствительности телефона.

При выходе из строя телефона, входящего в комплект аудиометра, его нельзя заменить телефоном, неотградуированным предварительно на образцовом приборе "искусственного уха" (под градуировкой телефона понимают определение его частотной характеристики чувствительности).

Пороговые напряжения телефона (эквивалентные пороговые уровни звукового давления) определяют на приборе "искусственное ухо" при частотах 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 6000, 8000 и 10000 Гц.

Непосредственно измерить эквивалентные пороговые уровни звукового давления, развиваемые телефоном аудиометра, выполнить трудно, вследствие относительно большого уровня собственных шумов прибора "искусственного уха", по это их измеряют при положении аттенюатора аудиометра " 60 " дБ.

Результаты измерения экстраполируют к пороговому уровню по формуле:

$$L_0 = L_{60} - K_{60},$$

где L_0 - эквивалентный пороговый уровень звукового давления относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па, соответствующий положению аттенюатора "0" дБ;

L_{60} - измеренный уровень звукового давления, дБ, соответствующий положению аттенюатора "60" дБ;

K_{60} - затухание, дБ, вносимое аттенюатором при переключении его из положения "60" дБ в положение "0" дБ.

Уровни пороговых напряжений телефона при известной чувствительности определяют по формуле:

$$L_{пор} = L_p - L_E$$

где $L_{пор}$ - уровень порогового напряжения телефона относительно напряжения 1 в, дБ;

L_p - уровень звукового давления относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па, дБ;

L_E - чувствительность телефона относительно 1 Па / В, дБ.

Частотную характеристику чувствительности аудиометрического вибратора определяют на приборе "искусственный мастоид". На этот прибор устанавливают вибратор и прижимают его с силой 5 Н. Подводя от звукового генератора напряжение U_b к клеммам вибратора, измеряют электронным вольтметром напряжение U_m , развиваемое при этом "искусственным мастоидом".

Измерения проводят в диапазон частот 125 - 8000 Гц.

Чувствительность аудиометрического вибратора вычисляют на частотах 125, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000 Гц по формуле:

$$E_B = U_M / U_B \cdot E_M$$

где E_M - чувствительность прибора "искусственный мастоид".

Чувствительности и их частотные характеристики различных экземпляров отличаются друг от друга, поэтому один вибратор нельзя заменить другим без предварительного определения частотной характеристики чувствительности.

Пороговые напряжения аудиометрического вибратора (эквивалентные пороговые уровни звукового давления) находят на частотах 125, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000 Гц с помощью прибора "искусственный мастоид" при положении аттенюатора "60" дБ. Полученные результаты экстраполируют к пороговому уровню.

Ключевые слова: аудиометр, порог слышимости, звуковое давление, телефон, вибратор, ухо аттенюатор, костная проводимость, диапазон частот, искусственное ухо, искусственный мастоид.

Контрольные вопросы

1. Какие знаете средства измерений в области физиологической акустики?
2. Что из себя представляет аудиометр?
3. Для чего предназначен аудиометр?
4. Для чего предназначен и из себя представляет прибор «Искусственное ухо»?
5. Для чего предназначен и из себя представляет прибор «Искусственный мастоид»?
6. Объясните схему поверки аудиометров.

2.9. Гидроакустические приборы

В качестве излучателей и приёмников в звуковой области используются электродинамические и пьезоэлектрические излучатели и гидрофоны, а в ультразвуковой — пьезоэлектрические и магнитострикционные. Из наиболее существенных применений гидроакустики следует отметить эхолот, гидролокаторы, которыми пользуются для решения военных задач (поиски подводных лодок противника, бесперископная торпедная атака и т.д.); для мореходных целей (плавание вблизи скал, рифов и др.), рыбопромысловой разведки, поисковых работ и т.д.

Пассивным средством подводного наблюдения служит шумопеленгатор, позволяющий определить направление источника шума, например корабельного винта. Подводные мины снабжаются т. н. акустическими замыкателями (взрывателями), вызывающими взрыв заряда мины в момент прохождения над ней корабля. Самонаводящиеся торпеды могут самонаправляться на корабль по его шуму и т.д.

Гидрофон (от гидро... и греч. phone — звук), гидроакустический звукоприёмник, Гидрофоны являются электроакустическими преобразователями и применяются в гидроакустике для прослушивания подводных сигналов и шумов, для измерительных целей, а также как составные элементы направленных приёмных гидроакустических антенн. Наиболее распространены гидрофоны, основанные на электродинамическом, пьезоэлектрическом и магнитострикционном эффектах. Электродинамические гидрофоны по принципу действия не отличаются от воздушных электродинамических микрофонов, если не считать особенностей конструкции, связанных с изоляцией от воды.

В пьезоэлектрическом гидрофоне используется прямой пьезоэффект некоторых кристаллов (сегнетова соль, кварц, дигидрофосфат аммония, сульфат лития и т.д.), при котором переменная деформация кристалла вызывает появление переменных поверхностных электрических зарядов и соответственно переменной электродвижущей силы на электродах-обкладках. Широко пользуются пьезоэлектрическими керамическими материалами (типа керамики титаната бария, титаната-цирконата свинца и др.). Чувствительные элементы пьезоэлектрических гидрофонов изготавливают в виде пакетов прямоугольной или цилиндрической формы.

Магнитострикционные гидрофоны основаны на обратном магнитострикционном эффекте некоторых ферромагнитных металлов (в основном никеля и его сплавов), при котором деформация вызывает появление переменной магнитной индукции в магнитопроводе и как следствие — переменной ЭДС на обмотке. Чувствительные элементы гидрофона (сердечники) набираются, как правило, из тонких пластин для избежания потерь на токи Фуко.

Гидрофоны, предназначенные для измерительных целей, должны быть ненаправленными и обладать ровной частотной характеристикой во всей области исследуемых частот. Для этой цели удобно пользоваться малыми по сравнению с длиной волны полыми сферическими приёмниками из пьезокерамики, совершающими сферические симметричные колебания.

Одна из важнейших характеристик гидрофонов — чувствительность, представляющая собой отношение электрического напряжения к звуковому давлению в *мкв/бар*; она лежит в пределах от долей *мкв/бар* для малых (диаметром в несколько мм) керамических сферических приёмников до сотен *мкв/бар* для пакетов из пьезоэлектрических кристаллов. Для увеличения чувствительности (а также для устранения шунтирующего действия кабеля) используются гидрофоны с предварительными усилителями, которые монтируются в одном корпусе с приёмником и вместе опускаются в воду.

Эхолот (от *эхо* и *лот*), навигационный прибор для автоматического измерения глубины водоёмов с помощью гидроакустических эхо-сигналов. Обычно в днище судна устанавливается вибратор, к которому периодически подаются от генератора электрические импульсы, преобразуемые им в акустические, распространяющиеся в ограниченном телесном угле вертикально вниз.

Отражённый дном акустический импульс принимается тем же вибратором, который преобразует его в электрический. После усиления импульс поступает на индикатор глубины, отмечающий отрезок времени (в сек) от момента посылки импульса до момента возвращения эхо от дна и преобразующий его в визуальные показания или запись глубины. Длительность импульсов — от 0,05 до 20 *мсек* с частотой заполнения от 10 до 200 *кГц*. Малые длительности и высокие частоты используются при измерениях малых глубин, большие длительности и низкие частоты — при измерении больших глубин.

Вибратором может служить магнитострикционный преобразователь или пьезокерамический. В качестве индикаторов глубин применяются проблесковые указатели с вращающейся неоновой лампочкой, вспыхивающей в момент приёма эхо-сигнала; стрелочные, электроннолучевые и цифровые указатели, а также самописцы, записывающие измеряемые глубины на движущейся бумажной ленте электротермическим или электрохимическим методом.

Эхолоты изготавливаются на разные интервалы глубин, в пределах от 0,1 до 12 000 м и работают при скоростях хода судна до 30 узлов (55 *км/ч*) и даже более. Погрешность Э. от 1% до сотых долей процента. Э. используются также для поиска косяков рыбы, подводных лодок, для исследования звукорассеивающих слоев, определения типа грунта, стратификации донных осадков и др. гидроакустических измерений.

Гидролокация (от *гидро...* и лат. *locatio* — размещение), определение положения подводных объектов при помощи звуковых сигналов, излучаемых самими объектами (пассивная локация) или возникающих в результате отражения от подводных объектов искусственно создаваемых звуковых сигналов (активная локация). Под термином «гидролокация» понимают исключительно звуковую локацию, поскольку звуковые волны являются единственным известным в настоящее время видом волн, распространяющихся в морской среде без значительного ослабления.

Гидролокация имеет большое значение в навигации для обнаружения невидимых подводных препятствий, при рыбной ловле для обнаружения косяков и отдельных крупных рыб, в океанологии как инструмент исследования физических свойств океана, картографирования морского дна, поиска затонувших судов и т.п., а также в военных целях для обнаружения подводных лодок, надводных кораблей и др. и наблюдения за ними, для определения координат целей при применении торпедного и ракетного оружия.

При *пассивной локации (шумопеленгации)* с помощью *шумопеленгатора* определяют направление на источник звука (пеленг источника), пользуясь звуковым полем, создаваемым самим источником. При этом применяют различные методы: поворачивают приёмную акустическую антенну с острой направленностью до положения, в котором принятый сигнал имеет максимальную интенсивность (т. н. максимальный метод пеленгования); измеряют разность фаз между сигналами на выходе двух разнесённых в пространстве антенн (фазовый метод); определяют относительную разницу во времени приёма сигналов двумя разнесёнными антеннами посредством измерения взаимной *корреляции* (корреляционный метод), а также путём комбинации этих методов. Системы пассивной гидролокации применяются главным образом для гидроакустического оснащения подводных лодок и надводных кораблей.

Системы *активной гидролокации* основаны на явлении звукового *эхо* (рис. 2) и различаются методами временной *модуляции* посылаемого сигнала и способами обзора пространства. Для определения дальности объекта чаще всего пользуются импульсной, частотной и шумовой модуляциями сигнала.

Гидролокатор (от *гидро...* и лат. *locos* — помещаю), гидролокационная станция, гидроакустическая станция (прибор) для определения положения подводных объектов при помощи звуковых сигналов. Кроме расстояния до погруженного в воду объекта, некоторые гидролокаторы определяют также его глубину погружения по наклонной дальности и углу направления на объект в вертикальной плоскости..

Работа гидролокатора (рис. 2.20) происходит следующим образом. Импульс электрического напряжения, выработанный генератором, через переключатель «приём — передача» подаётся к электроакустическим преобразователям (вибраторам), излучающим в воду акустический импульс длительностью 10—100 мсек в определенном телесном угле или во всех направлениях.

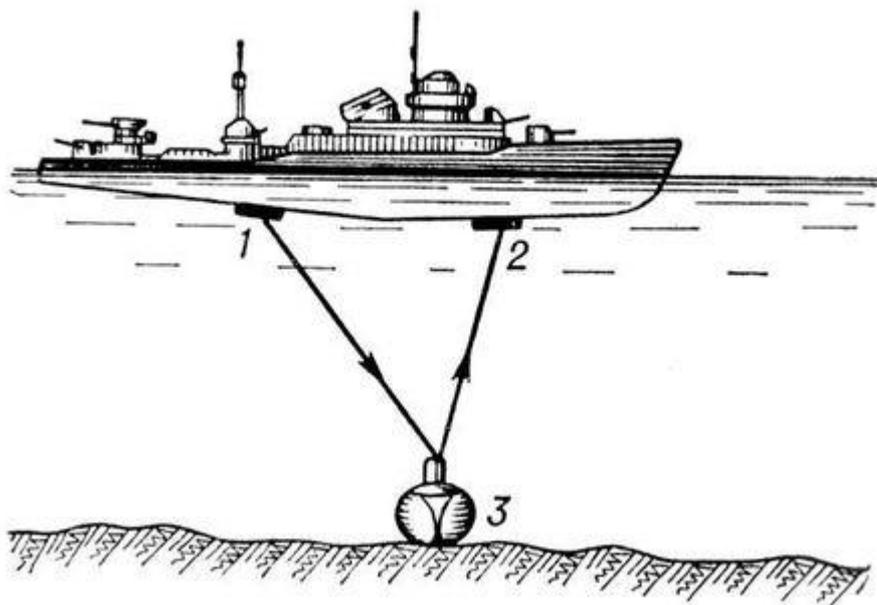


Рис. 2.20. Принцип работы гидролокатора: 1 — излучатель; 2 — приёмник; 3 — отражающее тело.

По окончании излучения вибраторы подключаются к гетеродинному усилителю для приёма и усиления отражённых от объектов импульсных акустических сигналов. Затем сигналы поступают на индикаторные приборы: рекордер, электродинамический громкоговоритель, телефоны, электроннолучевую трубку (дисплей). На рекордере измеряется и регистрируется электрохимическим способом на ленте расстояние (дистанция) до объекта; с помощью телефонов и электродинамического громкоговорителя принятые сигналы прослушиваются на звуковой частоте и классифицируются, по максимуму звучания определяется пеленг; на дисплее высвечивается сигнал от объекта и измеряется дистанция до него и направление (пеленг). Длительность паузы между соседними посылками импульсов составляет несколько сек.

Большинство гидролокаторов работает в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот (4—40 кгц). Это обусловлено необходимостью получения острой направленности антенны (при относительно небольших её размерах) и достижения заданной разрешающей способности.

Основной характеристикой гидролокаторов является дальность обнаружения, которая зависит от мощности излучаемого сигнала, от уровня акустических помех и от условий распространения звука в водной среде.

Наряду с помехами на дальность обнаружения оказывает влияние рефракция, имеющая место в сложных гидрологических условиях. Гидролокаторы различного назначения обладают дальностью действия от сотен метров до десятков километров и обеспечивают точность пеленгования около 1° .

Шумопеленгатор - устройство для обнаружения источника звуковых колебаний или шума и определения направления (пеленга) на него; применяются главным образом в гидролокации. Работают в области звуковых, ультразвуковых и инфразвуковых частот.

Шумопеленгаторы подразделяются на стационарные, которые устанавливаются на дне океана (моря) на специальных опорных конструкциях или на неподвижных (на якорю) буйах, и

подвижные — на подводных лодках, на некоторых типах надводных кораблей, в контейнерах, опускаемых в воду с вертолѐта, на свободно плавающих (дрейфующих) буях.

Шумопеленгатор состоит из приёмника звука, компенсатора, фильтра, усилителя и индикатора. Приёмником звука чаще всего является акустическая антенна, состоящая из нескольких (до сотен штук) *гидрофонов*, обладающая нужной диаграммой направленности. Компенсатор служит для поворота оси диаграммы направленности антенны на шумящий объект и определения её направления. При использовании вращающейся антенны компенсатор в составе шумопеленгатора обычно отсутствует.

Фильтр шумопеленгатора пропускает определённую полосу звуковых частот. Выделение низких частот способствует увеличению дальности действия шумопеленгатора, а высоких — улучшению отношения сигнал/помеха и повышению точности пеленгования. Усилитель увеличивает амплитуду принимаемых сигналов до нужного для индикации уровня. Индикатором может быть телефон, динамик, электроннолучевая трубка, дисплей.

Существуют устройства, сопрягаемые с шумопеленгатором, с помощью которых посредством анализа спектра принимаемого акустического сигнала производится классификация (определение типа) шумящих объектов (подводная лодка, надводный корабль, торпеда и т.п.). Точность пеленгования целей современного шумопеленгатора может достигать долей градуса, а дальность действия — десятков км.

Ключевые слова: гидрофон, эхолот, гидролокация, гидролокатор, шумопеленгатор.

Контрольные вопросы

1. Что такое гидрофон, принцип его устройства и работы.
2. Что такое эхолот, принцип его устройства и работы.
3. Объясните принцип работы гидролокатора.
4. Что такое шумопеленгатор, принцип его устройства и работы.

Глава 3. ИЗМЕРЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Измерение акустических величин характеризуется огромным разнообразием. Чтобы дать некоторое понятие об этом разнообразии приведем некоторые классификационные признаки, характеризующие акустические измерения.

В зависимости от назначения, в первую очередь, акустические измерения можно разделить на метрологические и неметрологические. К метрологическим относятся измерения параметров самих акустических приборов и аппаратуры: поверка, калибровка, градуировка, определение параметров акустических средств измерений и другие. К неметрологическим следует отнести измерения параметров акустических полей, параметров распространения звука в различных средах, параметров акустических шумов и т.д.

В зависимости от среды, в которой проводятся измерения, различают акустические измерения в воздухе и в газах, измерения в воде (гидроакустика) и в жидких средах, измерения в твердых средах.

В зависимости от измеряемого параметра звука различают измерение звукового давления, мощности, скорости и интенсивности звука, акустического сопротивления, спектрального состава звука и многих других параметров.

В зависимости от раздела акустики измерения разделяются по ее видам: физическая акустика, музыкальная акустика, атмосферная акустика, архитектурно-строительная акустика и т.д.

Можно привести также много других классификационных признаков.

Разумеется, охватить это огромное разнообразие в одном учебном пособии просто невозможно. Поэтому ниже рассматриваются лишь некоторые характерные виды акустических измерений.

3.1. Измерение мощности излучателей звука

Измерения мощности излучателей звука можно разделить на две группы: 1) определение мощности электроакустических преобразователей; 2) измерение мощности источников шума.

Измерение мощности электроакустических преобразователей. Обычно для определения акустической мощности излучателей необходимо выполнять ряд вспомогательных измерений, которые сами по себе являются трудоемкими и сложными.

Одним из распространенных методов определения акустической мощности является ее расчет на основании результатов измерений звукового давления p на расстоянии r от излучателя по формуле

$$N_a = \frac{4\pi p^2 r^2}{\rho c \gamma},$$

где ρc – волновое сопротивление среды, в которой распространяются акустические колебания;

γ – коэффициент направленности излучателя.

Метод применим только для измерений в плоской волне. Поэтому эти измерения можно проводить в дальнем поле преобразователя, где обычно волну считают плоской.

Акустическая мощность излучателя, в свою очередь связана с его электрической мощностью через к.п.д. Электроакустические излучатели, как электромеханические преобразователи энергии, характеризуются следующими к.п.д.:

а) электроакустическим к.п.д. $\eta_{эа}$, показывающим, какая часть потребляемой излучателем электрической мощности $N_э$ преобразуется в полезную акустическую мощность $N_а$:

$$N_{эа} = \frac{N_а}{N_э};$$

б) электромеханическим к.п.д. $\eta_{эм}$, показывающим, какую часть потребляемой электрической мощности составляет механическая мощность $N_м$:

$$N_{эб} = \frac{N_м}{N_э};$$

в) акустико-механическим к.п.д. $\eta_{ам}$, определяющим соотношение между излучаемой акустической и механической мощностями:

$$N_{ам} = \frac{N_а}{N_м}.$$

Все эти коэффициенты связаны между собой соотношением

$$\eta_{эа} = \eta_{эм} \cdot \eta_{ам}.$$

К.п.д. излучателей является также важной характеристикой его работы.

Электрическую мощность, подводимую к излучателю, определяют с помощью ваттметра, а акустическую мощность – например, описанным выше методом.

Необходимо отметить, что акустические излучатели имеют невысокий к.п.д. Так, например, к.п.д. громкоговорителей составляет порядка (4 - 5)%, подводных электродинамических излучателей – порядка 9%, магнитострикционных резонансных – порядка (40 – 55)% и ферритовых резонансных – до (60 – 70)%.

В гидроакустических измерениях на высоких частотах широко применяют так называемый ваттметровый метод определения к.п.д. Еще один способ определения к.п.д. основан на измерении частотной характеристики модуля электрического полного сопротивления или проводимости излучателя [1].

Оба этих метода не применяются в тех случаях, когда электромеханический к.п.д. мал, так как при этом нет заметной разницы между потребляемой энергией на резонансе и вне резонанса и тогда, когда декремент затухания преобразователя в воде велик. При этом невозможно отделить электрические потери от механических.

Существуют также различные конструкции акустических ваттметров для измерения энергетических характеристик акустических полей в жидкости [1].

Измерение мощности источников шума. Выполнение измерений мощности источников шума регламентируется группой различных стандартов.

ГОСТ 12.1.024-81. ССБТ регламентирует определение шумовых характеристик источников шума в заглушенной камере точным методом.

ГОСТ 12.1.025-81. ССБТ регламентирует определение шумовых характеристик источников шума в реверберационной камере точным методом.

ГОСТ 12.1.026-81. ССБТ предписывает определение шумовых характеристик источников шума в свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью техническим методом.

ГОСТ 12.1.027-81. ССБТ описывает определение шумовых характеристик источников шума в реверберационной камере техническим методом.

ГОСТ 12.1.028-81. ССБТ регламентирует определение шумовых характеристик источников шума ориентировочным методом.

ГОСТ 27243-87 описывает ориентировочный метод определения уровня звуковой мощности шума машин при помощи образцового источника звука.

Ключевые слова: измерение, мощность излучателя, акустическая мощность, электрическая мощность, механическая мощность, к.п.д., метод определения акустической мощности.

Контрольные вопросы

1. Как определяется акустическая мощность излучателя звука?
2. Что такое акустическая мощность излучателя звука?
3. Как определяется электроакустический к.п.д. излучателя?
4. Какими документами регламентируется измерение мощности источников шума?

3.2. Определение характеристики направленности преобразователей

С помощью характеристики направленности можно рассчитывать акустическую мощность излучателей. Используя ее, можно так поставить эксперимент, что влияние отраженных звуковых сигналов будет минимальным.

Характеристики направленности определяют относительными измерениями. Для некоторых простейших случаев характеристики направленности преобразователя могут быть рассчитаны.

Если размеры излучающей поверхности больше длины звуковой волны, то излучаемая энергия концентрируется преимущественно по одному направлению, совпадающему с направлением нормали к излучающей поверхности.

В общем случае, по мере отклонения лучей от направления нормали амплитуда результирующего колебания может проходить через максимумы и минимумы. Однако для сплошной системы максимумы, получаемые по направлениям, отличным от осевого, никогда не достигают основного максимума.

Эффект направленности принято иллюстрировать *характеристиками направленности*, представляющими собой полярные или прямоугольные диаграммы изменения акустического поля (например, давления, интенсивности) в зависимости от направления.

Для излучателей следует различать характеристику направленности по давлению и по интенсивности.

Характеристика направленности по давлению

$$R_{\alpha p} = P_{\alpha} / P_{\max}$$

где P_{α} - звуковое давление, развиваемое в направлении угла α ;

P_{\max} - звуковое давление, развиваемое в направлении максимальной амплитуды.

Характеристика направленности по интенсивности

$$R_{\alpha I} = I_{\alpha} / I_{\max} = P_{\alpha}^2 / P_{\max}^2 = R_{\alpha p}^2$$

Направленное действие оценивают по остроте направленного действия и остроте главного максимума. Острота направленного действия преобразователя характеризуется углом раствора характеристики направленности. Этот угол охватывает основной максимум характеристики направленности. Вторичные максимумы и другие неравномерности характеристики направленности игнорируют. Такая оценка удобна графического и пространственного представления направленных систем.

Остроту максимума целесообразно оценивать углом, на котором амплитуда характеристики направленности убывает до заданного уровня A_n (обычно до уровня 0,707) от ее максимального значения A_0 . С точки зрения сохранения точности измерений острота максимума должна быть наименьшей.

Другой важной особенностью направленных систем является коэффициент осевой направленности или просто коэффициент направленности преобразователей γ . Коэффициент направленности показывает, во сколько раз интенсивность звука по оси характеристики направленности излучателя направленного действия больше интенсивности направленного излучателя той же мощности. Коэффициент направленности направленных систем всегда больше единицы.

Характеристики направленности громкоговорителей определяют тональным сигналом путем автоматической записи на частоте 100; 200; 500; 650; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 3150; 4000; 8000; 10000; 12500; 16000 и 20000 Гц. Измерения проводят в заглушенной камере или на открытом воздухе. Испытуемый громкоговоритель должен находиться на достаточном расстоянии от микрофона (на оси последнего) на стойке, которая позволяет поворачивать громкоговоритель вокруг оси, находящейся в плоскости, проходящей через центр излучающего отверстия, и отсчитывать углы поворота с точностью не менее 2° .

Характеристики направленности громкоговорителя определяют также шумовым сигналом на тех же частотах и на той же установке, используемых для автоматической записи характеристик направленности. Микрофон устанавливают на расстоянии $1 \text{ м} \pm 2 \text{ см}$ от громкоговорителя (на рабочей оси последнего) на стойке, которая позволяет поворачивать микрофон вокруг вертикальной оси, проходящей через центр к звукопринимающей поверхности микрофона.

Для микрофонов, не обладающих осевой симметрией, характеристику направленности определяют не менее чем в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Углы поворота микрофона должны отсчитывать с погрешностью не более 2° . При испытании остронаправленных микрофонов расстояние между микрофоном и громкоговорителем должно превышать максимальный размер микрофона не менее чем в пять раз.

Характеристики направленности микрофонов также определяют на шумовом сигнале. Кроме того, при их измерении иногда определяют среднюю разность уровней чувствительности направленного микрофона в осевом направлении и под углом 180° к оси.

Методы измерений характеристик направленности для воздушной среды можно распространить и на другие среды.

Так как характеристика направленности зависит от соотношений размером поверхности чувствительного элемента и длины звуковой волны в данной среде, при переносе преобразователя в другую среду его направленные свойства, естественно, будут меняться.

Чтобы снимать характеристики направленности преобразователей звука, необходимо иметь поворотные устройства, обеспечивающие заданную точность отсчета угла поворота.

Поверхность приемных элементов гидрофонов должна быть гладкой, так как ил, грунт и неровности на ней создают благоприятные условия для осаждения воздушных пузырей. Все это может исказить характеристику направленности преобразователя.

Одним из критериев оценки преобразователей является сравнение результатов измерений по направленности с расчетными. Однако расчеты могут быть выполнены только для

простейших видов преобразователей - поршневого, диполя, группового, с линейной базой и др.

Ключевые слова: характеристика направленности преобразователя, метод определения акустической мощности, звуковое давление, испытание источника шума, измерительная поверхность, камера со звукопоглощающим полом, максимальный и минимальный уровень шума, размеры излучающей поверхности, амплитуда результирующего колебания, эффект направленности.

Контрольные вопросы

1. Что вы понимаете под термином характеристика направленности преобразователей?
2. Как определяется характеристика направленности преобразователей?
3. Смысл коэффициента направленности преобразователей.
4. Характеристика направленности громкоговорителей.

3.3. Шумовые характеристики и методы их определения источников шума

Шумовые характеристики источников шума (машин, механизмов, технологического оборудования и др.) регламентируются межгосударственными и государственными стандартами [16 – 20].

1. Шумовые характеристики источников шума. Устанавливаются следующие шумовые характеристики источников шума:

- скорректированный уровень звуковой мощности L_{PA} , дБА;
- уровень звуковой мощности в полосах (октавных или третьоктавных) частот L_p , дБ;
- уровень звука в контрольных точках L_A , дБА;
- уровень звукового давления в полосах частот в контрольных точках L_i , дБ;
- максимальный показатель направленности излучения шума G_{Amax} , дБА, или тоже самый в полосах частот G_{max} , дБ.

Для непостоянных шумов вместо уровней, приведённых выше, должны быть измерены эквивалентные уровни звука $L_{Aэкв}$, дБА, а для импульсных шумов – уровни звука L_{AI} , дБА.

2. Методы определения шумовых характеристик источников шума устанавливаются межгосударственными стандартами и стандартами. Согласно этим стандартам устанавливаются точные, технические и ориентировочные методы.

Точные методы осуществляются в реверберационной (метод 1) и заглушенной (со звукоотражающим (метод 2а) и звукопоглощающим (метод 2б) полом) камерах, **технические методы** – в реверберационном помещении объёмом 70 – 2000 м³ (метод 3) и свободном звуковом поле над звукоотражающей поверхностью в заглушенных камерах с жёстким полом, на открытых площадках и в помещениях (метод 4), а **ориентировочный метод** (метод 5) проводится в помещениях, где установлено испытываемое оборудование и на открытых площадках, над звукоотражающей плоскостью.

Выбор того или другого метода в первую очередь определяется точностью измерений, которую необходимо обеспечить; во вторых – временными и спектральными характеристиками шума; в третьих объёмом (размерами) источника шума; и в четвёртых технологическими особенностями источника шума.

Например, метод 1 или метод 3 выбираются только в том случае, если шум является постоянным. При этом объём источника шума должен быть менее 1 % объёма реверберационной камеры.

Погрешности измерений, оцениваемые средним квадратичным отклонением уровней звуковой мощности, в зависимости от полосы частот должны соответствовать следующим значениям (см. табл. 3.1):

Таблица 3.1

Порядковый номер метода	Погрешность измерений, дБА
Метод 2б	0,5...1,0
Метод 2а	1,0...1,5
Метод 1 и 4	1,5...3
Метод 3	2...5
Метод 5	4...5

Если при измерении не удовлетворяются требования принятого метода, то следует выбрать другой метод из указанных.

Условия установки и режим работы источника шума при испытаниях должны приближаться к обычным условиям и режимам работы источника при эксплуатации.

Определение суммарного уровня шума. Уровень шума, возникающий от нескольких некогерентных источников, работающих одновременно, подсчитываются на основании принципа энергетического суммирования излучений отдельных источников:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \sum_{i=1}^{i=n} 10^{0,2L_i},$$

где L_i – уровень звукового давления i -ого источника шума;

n – количество источников шума.

Суммарный уровень шума от n одинаковых по интенсивности источников шума в равноудаленной от них точке определяется по формуле:

$$L_{\Sigma} = L_1 + 10 \lg n, \text{ дБ},$$

где L_1 – уровень шума одного источника в дБ.

При одновременном действии двух источников с разными уровнями суммарный уровень L_{Σ} определяется по формуле:

$$L_{\Sigma} = L_1 + \Delta L, \text{ дБ},$$

где L_1 – наибольший из двух суммарных уровней шума;

ΔL – добавка в функции разности уровней источников.

Разность уровней в дБ двух источников

$L_1 - L_2$ (при $L_1 > L_2$)	0	1	2,5	4	6	10
ΔL в дБ	3	2,5	2	1,5	1	0,5

При большом числе источников шума суммирование уровней интенсивностей производится последовательно от наибольшего к наименьшему.

Если уровень шума одного источника превышает уровни шума других источников на 8 – 10 дБ, то будет превалировать шум более интенсивного источника, так как добавка к суммарному уровню шума будет пренебрежимо малой. Следовательно, уровень менее громкого источника в этом случае можно не принимать во внимание.

Ключевые слова: шумовые характеристики, звуковое давление, звуковая мощность, направленность излучения шума, уровень звукового давления, источник шума, измерение шума, точный метод, технический метод, ориентировочный метод, реверберационная камера, заглушенная камера, реверберационное помещение, звуковое поле, звукоотражающая плоскость.

Контрольные вопросы

1. Перечислите шумовые характеристики источников шума.
2. Перечислите шумовые характеристики мест нахождения людей.
3. Какие существуют методы определения шумовых характеристик источников шума?
4. В чем сущность точных методов определения шумовых характеристик источников шума?
5. В чем сущность технических методов определения шумовых характеристик источников шума?
6. В чем сущность ориентировочного метода определения шумовых характеристик источников шума?

3.4. Шумовые характеристики и методы их определения мест нахождения людей

Шумовые характеристики мест нахождения людей (рабочие места в промышленности; внутри транспортных средств, включая пассажирские места; в помещениях зданий; вне зданий; на площадках отдыха и т.п.) регламентируются межгосударственными и государственными стандартами.

Определение шумовых характеристик мест нахождения людей проводится с целью охраны здоровья людей путем нормирования шума до предела, определенного техническими возможностями и экономической целесообразностью.

1. Шумовые характеристики мест нахождения людей. Для мест нахождения людей устанавливаются следующие шумовые характеристики:

- уровень звукового давления в октавных или треть октавных полосах частот L , дБ (далее - уровень звукового давления в полосе частот);
- уровень звука L_A , дБА;
- эквивалентный уровень звука $L_{A_{\text{экв}}}$, дБА;
- скорректированный уровень звука L_K , дБА;
- уровни звука L_{AI} , дБА (для импульсных шумов).

Уровень звукового давления в октавных или треть октавных полосах частот L , дБ, измеряют шумомером при включении полосовых фильтров или вычисляют по формуле

$$L = 20 \lg \left(\frac{P}{P_0} \right),$$

где P - среднее квадратическое значение звукового давления, Па; $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Уровень звука L_A в дБА измеряют шумомером при включении характеристики A и при отсутствии полосовых фильтров или вычисляют по формуле

$$L_A = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_i + K_{Ai})},$$

где L_i - уровень звукового давления (или звуковой мощности) в i -ой полосе частот, дБ;

K_{Ai} - поправка по частотной характеристике А шумомера для i -ой полосы частот (например, на частоте 100, 1000 и 10000 Гц K_A , соответственно, равен - 19,1; 0; 2,5 дБ);

n - число частотных полос.

Эквивалентный (по энергии) уровень звука $L_{Aэкв}$ (в дБА) непостоянного шума - уровень звука постоянного широкополосного шума, который имеет то же самое средне квадратическое звуковой давление, что и данный непостоянный шум в течении определенного интервала времени T , который определяется по формуле:

$$L_{Aэкв} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{P_A(t)}{P_0} \right)^2 dt,$$

где $P_A(t)$ - текущее значение среднего квадратического звукового давления с учетом коррекции "А" шумомера, Па.

На практике $L_{Aэкв}$ определяется по формуле

$$L_{Aэкв} = 10 \lg \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^n f_i} \cdot \sum_{i=1}^n f_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Ai}} \right],$$

где f_i - доля числа отсчетов уровней звука в i -м интервале уровней за время измерений в процентах от общего времени, в секундах или частоте считывания;

L_{Ai} - средний уровень звука в i -м интервале уровней, дБА;

n - число интервалов уровней.

Для непостоянного шума дополнительно ограничивают максимальные уровни звука в дБА, а также в качестве характеристики допускается еще использовать дозу шума или относительную дозу шума.

Доза шума D - интегральная величина, учитывающая акустическую энергию, воздействующую на человека, за определенный период времени T и определяемая по формуле

$$D = \int_0^T P_A^2(t) dt.$$

Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах, для различных видов трудовой деятельности с учётом степени напряжённости труда приведены в ГОСТ 12.1.003. В этом стандарте также приведён максимальный уровень звука непостоянного шума на рабочих местах, который не должен превышать 110 дБА и импульсного шума – 125 дБ АI.

2. Методы определения шумовых характеристик мест нахождения людей. Согласно ГОСТ 23941-79 (СТ СЭВ 542-77) и ГОСТ 12.1.050-86 устанавливаются предварительный и контрольный методы определения шумовых характеристик мест нахождения людей.

Предварительный метод применяют для приближённой оценки шума. При этом для постоянного шума определяют уровень звука и характер спектра шума. Для непостоянных шумов определяют максимальные и минимальные значения уровня звука.

Контрольный метод применяют для сравнения шума с нормами. При этом для постоянного шума определяют уровни звукового давления в октавных полосах частот и уровни звука. Для непостоянного шума определяют эквивалентный уровень звука, а для импульсного шума – $L_{АБ}$, дБА.

При проведении измерений по контрольному методу должна быть оценена погрешность измерения в виде среднего квадратического отклонения результата измерения и, если она не удовлетворяет предписанным требованиям, то следует применять более точные или автоматизированные средства измерений, либо изменить методику.

Измерения должны проводиться при характерных режимах работы источников шума и обычных условиях в местах нахождения людей. Измерения вне зданий должны проводиться при благоприятных метеорологических условиях, отсутствии осадков, ветра и т.п. Все эти условия оговорены в конкретных нормативных документах на методы измерения шума на местах нахождения людей (например, измерение шума на рабочих местах предприятий и учреждений – по ГОСТ 12.1.050-86 и ГОСТ 23941-79 и т.д.)

Ключевые слова: методы определения шумовых характеристик, шумовые характеристики, октавная полоса частот, треть октавная полоса частот, уровень звука, эквивалентный уровень звука, доза шума, скорректированный уровень звука, предварительный метод, контрольный метод.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы определения шумовых характеристик мест нахождения людей?
2. В чем смысл предварительного метода?
3. В чем смысл контрольного метода?
4. Чем измеряются шумовые характеристики мест нахождения людей?

3.5. Проведение измерений шума

При измерениях микрофон должен быть установлен в точке измерения и ориентирован в направлении испытываемого источника шума и соединён с шумомером или измерительным трактом. На шумомере должна быть установлена временная характеристика (медленно). Показания шумомера отсчитывается с интервалом 10 с на частотах выше 100 Гц и не менее 30 с на частотах ниже 100 Гц.

Для импульсных шумов следует дополнительно записывать показания при временной характеристике I (импульса).

Измерения уровней звукового давления должны быть проведены в октавных (треть октавных) полосах частот со среднегеометрическими частотами от 125 до 8000 Гц (от 10 до 10000 Гц), а также в уровнях звука.

Перед измерениями необходимо оценить шум помех, например, от вибрации, от сторонних источников шума и т.п. При этом, в зависимости от величины разности между уровнем измеренного шума и эквивалентным уровнем помех ΔL и её характера во времени, следует учитывать или не учитывать её влияния при оценке результатов измерения (см. табл.

3.2). Для учёта помех следует из уровня источника шума вычесть значения Δ , приведённые в таблице 3.2.

Таблица 3.2

ΔL , дБ (дБА)	Δ , дБ (дБА)				
	Метод 1	Метод 2	Метод 3	Метод 4	Метод 5
1	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	3
4	*	*	2	*	2
5	*	*	2	*	2
6	1,3	1,3	1	1	1
7	1,0	1,0	1	1	1
8	0,8	0,8	1	1	1
9	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5
10	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
11	0,3	0,3	не учитыва- ются	не учитыва- ются	не учитыва- ются
12	0,3	0,3	не учитыва- ются	не учитыва- ются	не учитыва- ются
13	не учитыва- ются	0,2	не учитыва- ются	не учитыва- ются	не учитыва- ются
14	не учитыва- ются	0,2	не учитыва- ются	не учитыва- ются	не учитыва- ются
15	не учитыва- ются				
и т.д.	- // -	- // -	- // -	- // -	- // -

* – результат измерения не может быть оценён.

Результат измерения не может быть оценён также при больших значениях ΔL , чем значения указанные на табл. 3.2, если она (разность) колеблется во времени. Например, для метода 1 это значение ΔL менее 13 дБ, для метода 2 менее 15 дБ, а для метода 3–5 менее 11 дБ.

В период измерения температура, влажность и атмосферное давление воздуха в камере не должны существенно изменяться. Согласно ГОСТ 12.1.025 произведение температуры в градусах Цельсия θ на относительную влажность W в процентах: $(\theta + 5^\circ \text{C}) W$ не должно изменяться более чем на $\pm 10\%$. Согласно ГОСТ 12.1.026 и ГОСТ 12.1.027 температура не должна изменяться более чем на $\pm 10^\circ \text{C}$.

При измерениях в реверберационной камере если показания прибора изменяются более чем на 5 дБ, то методы 1 применять нельзя.

Измерения вне зданий и на открытой площадке не должны проводиться во время выпадения атмосферных осадков и при скорости ветра более 5 м/с.

При скорости ветра от 1 до 5 м/с следует применять экран для защиты измерительного микрофона от ветра.

Между микрофоном и источником шума не должны находиться люди и предметы, искажающие звуковое поле. Расстояние между микрофоном и наблюдателем должно быть не менее 0,5 м.

Ключевые слова: шумовые характеристики, технологическая особенность источника шума, погрешность измерений, среднее квадратичное отклонение уровня звуковой мощности, микрофон, измерительный тракт, импульсный шум, шум помех.

Контрольные вопросы

1. Опишите условия проведения измерений шума.
2. В каких полосах частот проводятся измерения шума?

3.6. Обработка результатов измерений шума на рабочем месте

Измерения шума на рабочем месте следует проводить не менее чем в двух точках. Если результаты измерений различаются не более чем на 5 дБ, определяют их среднее арифметическое

$$L_{cp} = (\sum_{i=1}^n L_i) / n$$

Если же они различаются более чем на 5 дБ, то применяют закон энергетического суммирования:

$$L_{cp} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1 L_i} - 10 \lg n$$

здесь n – число измерений.

Средний уровень звукового давления в полосах частот L_m в дБ, или средний уровень звука L_{mA} в дБА на измеряемой поверхности должен быть вычислен по формуле

$$L_m = 10 \lg (1/n \sum_{i=1}^n 10^{0,1 L_i}) - k$$

где L_i – уровень звукового давления в полосе частот, дБ, или уровень звука, дБА, в i -ой точке измерения с учётом поправки на помехи.

n – количество точек измерения на измерительной поверхности ;

k – постоянная учитывающая влияние отражённого звука в полосе частот.

В случае использования заглушенной камеры (метод 2) уровень звуковой мощности в полосах частот L_p , дБ, или скорректированный уровень звуковой мощности L_{pA} , дБА, вычисляют по формуле (ГОСТ 12.1.024)

$$L_p = L_m + 10 \lg(S/S_0) + C$$

где S – площадь измерительной поверхности, m^2 ; $S_0 = 1 m^2$; C – поправка на температуру T и атмосферное давление воздуха $P_{ст}$ в заглушенной камере.

Для технического метода (метод 4) поправка C не учитывается.

Уровень звуковой мощности в полосах частот в случае использования для измерений реверберационную камеру (метод 1) вычисляют по формуле (ГОСТ 12.1.025).

$$L_p = L_m + 10 \lg (A/A_0) + 10 \lg (1+S_v\lambda/bV) + C - 6$$

где A – эквивалентная площадь звукопоглощения реверберационной камеры, м^2 ;

$$A_0 = 1 \text{ м}^2;$$

V, S_v – объём и площадь ограждающих поверхностей камеры, включая пол.

При применении образцового источника шума L_p вычисляют по формуле

$$L_p = L_m + L_{pR} - L_{mR},$$

где L_m и L_{mR} – средний уровень звукового давления в полосах частот при работе испытываемого и образцового источников шума;

L_{pR} – паспортные значения уровня звуковой мощности образцового источника шума.

Показатель направленности излучения источника шума при измерениях на сферической измерительной поверхности следует вычислять по формуле

$$G_i = L_i - L_m,$$

а при измерениях на полусферической измерительной поверхности

$$G_i = L_i - L_m + 3$$

Результаты измерений следует занести в протокол по ГОСТ 23941-79.

Ключевые слова: обработка результатов измерений, аппаратура для измерения шума, среднее арифметическое, закон энергетического суммирования, средний уровень звукового давления, уровень звукового давления в полосе частот, уровень звука, поправка на помехи, отражённый звук в полосе частот, уровень звуковой мощности, скорректированный уровень звуковой мощности, образцовый источник шума.

Контрольные вопросы

1. Какие нормативные документы существуют по обработке результатов измерений?
2. Если результаты измерений различаются не более чем на 5 дБ, то по какой формуле определяют их среднее арифметическое значение?
3. Если же они различаются более чем на 5 дБ, то какой закон суммирования применяют?
4. По какой формуле должен быть вычислен средний уровень звукового давления в полосах частот или средний уровень звука на измеряемой поверхности?
5. По какой формуле должен быть вычислен уровень звуковой мощности в полосах частот или скорректированный уровень звуковой мощности в случае использования заглушенной камеры?
6. По какой формуле должен быть вычислен уровень звуковой мощности в полосах частот в случае использования для измерений реверберационную камеру?
7. При применении образцового источника шума по какой формуле должен быть вычислен уровень звуковой мощности в полосах частот?
8. По какой формуле следует вычислять показатель направленности излучения источника шума при измерениях на сферической измерительной поверхности?

3.7. Спектральный анализ акустических сигналов

В современной измерительной практике большое значение имеет спектральный анализ случайных процессов [7]. Это в полной мере применимо к спектральному анализу акустических сигналов.

Спектральным анализом называется определение амплитуд и частот (или отдельных частотных участков) колебаний, входящих в состав измеряемого сигнала. Исследуемый частотный диапазон сложного сигнала определяют общей (сквозной) частотной характеристикой используемого измерительного тракта, в который входят электроакустические приемники и электронные усилители. При измерении необходимо учитывать частотные характеристики элементов, входящих в общую часть измерительного тракта, так как все они могут существенно влиять на результаты измерений.

Все современные акустические анализаторы являются чисто электронными приборами. Это значит, что при исследованиях имеют дело с электрическими напряжениями (или токами), пропорциональными измеряемым акустическим величинам. В случае линейности всех элементов тракта (блоков преобразования акустических сигналов в электрические, усиления и т. д.) замена акустических сигналов электрическими вполне закономерна, и получаемым в результате анализа величинам могут быть приписаны акустические значения.

Спектральный анализ заключается в экспериментальном выявлении с помощью частотно-избирательных элементов (фильтров) наличия в сложном исследуемом сигнале тех или иных частотных компонентов.

Виды анализа. Анализ бывает *последовательным*, когда спектр сигнала получают путем последовательного изменения частотных свойств фильтров, «просматривающих» таким образом весь исследуемый диапазон (рис. 3.1), и *одновременным (параллельным)* при использовании неизменного набора фильтров, включаемых параллельно так, что на их выходах одновременно получают составляющие исследуемого сигнала (рис. 3.2).

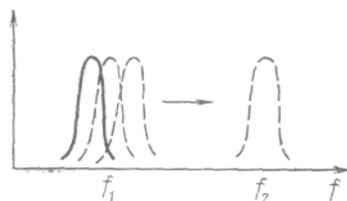


Рис. 3.1. Принцип действия последовательного анализа заданного частотного диапазона $f_2 — f_1$ с помощью перестраиваемого фильтра

Легко видеть, что при последовательном анализе может быть тщательно проанализирован каждый частотный участок исследуемого диапазона. Работа каждого из фильтров при одновременном анализе аналогична работе фильтра в соответствующем положении при последовательном анализе.

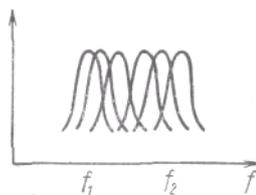


Рис. 3.2. Принцип действия параллельного анализа заданного частотного диапазона $f_2 — f_1$ с помощью набора фильтров

Четко выраженная разница между последовательным и одновременным анализом заключается в том, что число фильтров при одновременном анализе не может быть бесконеч-

ным, поэтому результаты при одновременном анализе будут несколько хуже, чем при последовательном. Участки-стыки между фильтрами (обычно на уровне 0,7 от максимума частотной кривой фильтр) анализируют с меньшей точностью, чем при последовательном анализе.

В современных приборах для спектрального анализа наибольшее распространение получил параллельный анализ.

Приборы для спектрального анализа. При выборе аппаратуры для производства анализа следует учитывать влияние характера спектра исследуемого сигнала.

В *анализаторах спектра* избирательные элементы перестраиваются или переключаются вручную. В автоматизированных приборах для спектрального анализа — *спектрометрах*, обработка анализируемого сигнала осуществляется автоматически.

Основным элементом прибора для спектрального анализа является частотно-избирательный элемент — фильтр, который характеризуется шириной полосы пропускания частот, коэффициентом передачи в полосах прозрачности и непрозрачности и крутизной спада частотной характеристики.

Ширину полосы пропускания частот фильтра определяют разностью высшей и низшей частот, на которой коэффициенты передачи (отношение выходного напряжения ко входному) снижаются на 3 дБ, т. е. сигнал падает до уровня 0,707 от своего максимального значения в полосе прозрачности (рис. 3.3).

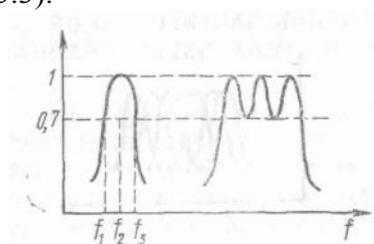


Рис. 3.3. Определение ширины полосы пропускания частот фильтра и допустимой неравномерности коэффициента передачи

Потери сигнала, проходящего через фильтр в полосе прозрачности, определяют коэффициентом передачи. Внутри полосы прозрачности этот коэффициент может иметь несколько различных значений, отличающихся между собой не более чем на 3 дБ из-за того, что характеристика реального фильтра не имеет строго прямоугольную форму с плоской вершиной, а скорее напоминает трапецию, а иногда и впадину — провал.

Крутизна спада частотной характеристики фильтра определяет возможность воздействия на него сигнала с частотой в полосе прозрачности данного фильтра. Характеристики реального фильтра в полосе его непрозрачности таковы, что они дают возможность 'принимать' в этой полосе сигнал, хотя и с сильно ослабленной амплитудой. Может случиться, что анализ из-за этого будет неточным и покажет присутствие спектральной составляющей, вообще отсутствующей в спектре сигнала.

Предположим, что на фильтр с полосой прозрачности от f_1 до f_2 попадает сигнал частотой f_3 , находящейся вне полосы прозрачности. Из рис. 3.4 видно, что этот сигнал воздействует и на рассматриваемый фильтр, хотя сигналы в его полосе прозрачности отсутствуют. В случае малых сигналов в полосе $f_2 - f_1$ наличие сигнала вне этой полосы исказит показания этого фильтра. Влияние соседних частот будет меньше при крутом спаде частотных характеристик.

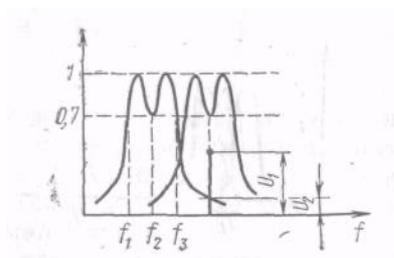


Рис. 3.4. Искажение результатов анализа сигнала из-за недостаточной крутизны спада частотной характеристики фильтров

Крутизну спада измеряют обычно коэффициентом прямоугольности характеристики фильтра или величиной затухания вне полосы прозрачности при заданной расстройке. Исследования показали, что при третьоктавном анализе и затухании более 20 дБ на средней частоте соседнего фильтра, погрешность за счет приема частот из полосы непрозрачности не превысит 2 дБ. В случае анализа с широкой полосой пропускания (3—5 октав) требования к затуханию вне полосы прозрачности существенно возрастают. Оно должно быть не менее 60—70 дБ на октаву.

Анализирующие свойства измерительного тракта в целом характеризуются еще и *разрешающей способностью, динамическим диапазоном и общей продолжительностью анализа.*

Разрешающей способностью анализатора называется его способность разделять смежные частотные составляющие исследуемого сигнала. Разрешающую способность оценивают интервалом между частотами двух равных по амплитуде синусоидальных сигналов, разделяемых данным устройством с провалом частотной характеристики между ними, достигающими 0,5 от максимального значения (рис. 3.5).

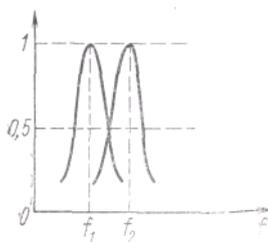


Рис. 3.5. Определение разрешающей способности анализатора

Чем меньше указанный частотный интервал ($f_2 - f_1$), тем выше разрешающая способность. Хотя эффект разделения может быть замечен и по меньшей величине провала в частотной характеристике, но зато приведенная оценка разрешающей способности охватывает возможную (не слишком большую) разницу между амплитудами разделяемых сигналов.

Разрешающая способность зависит от параметров фильтра и условий анализа. Для одновременного анализа она связана с шириной полосы пропускания и величиной крутизны спада частотной характеристики, а для последовательного анализа — еще и скоростью выполнения анализа.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили спектрометры одновременного действия, использующие наборы фильтров с постоянной относительной полосой анализа, с автоматическим подключением выходов фильтров на экран дисплея.

Спектральный анализ случайных процессов. Значение текущего спектра $G(\omega)$ данной реализации случайного процесса $x(t)$ находят по формуле

$$G_T(\omega) = \frac{1}{\pi T} \int_0^T |x(t)e^{j\omega t}|^2 dt, \quad (3.7.1)$$

где T — время усреднения.

Истинное значение спектра может быть получено при неограниченном времени усреднения:

$$G(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} G_T(\omega),$$

где $G(\omega)$ — энергетический спектр случайного процесса.

Текущий спектр также представляет случайную функцию, причем его флуктуации относительно энергетического спектра являются погрешностью измерений последнего.

Энергетический спектр связан с функцией автокорреляции $R(\tau)$ случайного процесса преобразованием Фурье:

$$G(\omega) = 4 \int_0^{\infty} R(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad (3.7.2)$$

где τ — время задержки одной реализации сигнала по отношению к другой.

Таким образом, спектральную функцию случайного процесса можно определять прямым способом по уравнению (3.7.1) или косвенным по уравнению (3.7.2).

Задача заключается в выборе такой продолжительности анализа, чтобы в пределах допустимой ошибки измерений получаемое значение $G_T(\omega)$ совпадало со значением $G(\omega)$. Анализ этим методом может осуществляться на анализирующих приборах с применением в качестве выходных индикаторов приборов, измеряющих энергию.

Для получения практически неискаженного спектра случайного процесса необходимо, чтобы полоса пропускания анализатора была не менее чем в 4 раза уже ширины энергетического спектра сигнала, а скорость анализа рассчитана из условия

$$v \leq \frac{f_2 - f_1}{4RC}$$

где $f_2 - f_1$ — энергетическая ширина полосы спектра случайного сигнала; RC — постоянная интегрирующего устройства. Это соотношение справедливо, если скорость изменения частоты линейна.

Многие анализаторы имеют логарифмическую шкалу частот, поэтому скорость изменения частоты при равномерном вращении лимба настройки анализатора будет линейно возрастать с частотой. В этом случае скорость анализа на верхних частотах диапазона будет заметно выше, чем на низких частотах.

В зависимости от цели исследований определяют необходимую полосу пропускания для анализа. Например, при выявлении источника шумов следует применять анализ с постоянной узкой полосой пропускания. Следует помнить, однако, что исследуемый шум механизмов, как правило, немного флюктуирует из-за небольшого изменения режимов работы, и в случае чрезмерно узкой полосы анализа результаты могут быть искажены. При работах по шумоглушению целесообразен анализ с постоянной относительной полосой пропускания, несмотря на то, что с повышением частоты разрешающая способность снижается.

В современных приборах анализаторы спектра обычно встраиваются в шумомеры, что позволяет легко осуществлять не только измерение параметров шума, но и проводить его

спектральный анализ с возможностью качественной записи практически любых процессов в память анализатора спектра и компьютер.

Ключевые слова: спектральный анализ, последовательный анализ, параллельный анализ, фильтр, полоса пропускания, крутизна, спектрометр, анализатор спектра, спектральная плотность.

Контрольные вопросы

1. Что такое спектральный анализ?
2. В чем заключается последовательный анализ?
3. В чем заключается параллельный анализ?
4. Чем отличается анализатор спектра от спектрометра?
5. Объясните работу полосового фильтра.
6. Что такое разрешающая способность?
7. Что такое спектральная плотность?

3.8. Измерения звукоизоляции и звукопоглощения материалов

Один из способов измерения звукоизоляции материалов заключается в следующем. Между источником звука и его приёмником помещают пластину испытуемого материала. Разница в результатах измерения поля при наличии пластины и без неё должна давать значение звукоизоляции. Однако такое измерение будет справедливо, строго говоря, лишь для пластин, размеры которых на несколько порядков превышают длину волны звука. В случае, если размеры пластины того же порядка (хотя неравенство $D > \lambda$, где D – размеры пластины, соблюдается), влияния дифракционных эффектов будет значительным.

Сзади пластины образуется область тени. Поэтому в случае неправильного выбора условий измерений даже совершенно непрозрачная для звука пластина может дать очень малое значение звукоизоляции, что приведёт к ошибочным результатам. Очевидно, расстояния для измерения звукоизоляции описанным методом должны быть выбраны так, чтобы приёмник звука наверняка находился в зоне физической тени.

Это условие можно выразить отношением

$$r \leq D^2 / 4 \lambda \quad (3.8.1)$$

где D – размер образца. При измерении звукоизоляции реальных образцов картина усложняется тем, что по мере увеличения звукоизоляции колебания давления в зоне тени возрастают.

Одним из способов уменьшения дифракционных явлений при измерении звукоизоляции является применение системы экранирования образца звукоизолирующим экраном значительных размеров.

Звукоизоляцию определяют разностью двух измерений: при наличии образца в отверстии экрана и его отсутствии. Место измерения поля при этом должны выбирать, исходя из других соображений, нежели при измерении пластины без экрана. Расстояние от источника звука до экрана при отсутствии образца должно удовлетворять соотношению

$$r \geq 2 \cdot d^2 / \lambda$$

где d – размер отверстия.

При таком соотношении поле за отверстием оказывается установившемся. С другой стороны, при измерении с образцом расстояние должно удовлетворять сформулированному ранее выражению (3.8. 1) :

$$r \leq R_3^2 / 4 \lambda$$

где R_3 – размер экрана.

Совместно эти условия запишем в виде

$$2 d^2 / \lambda \leq r \leq R_3^2 / 4 \lambda$$

Корреляционный метод. Л. В. Дмитриева и Н. Н. Писаревский предложили использовать корреляционную методику измерения акустического отношения для определения коэффициента звукопоглощения образцов в реверберационной камере. При этом для измерения акустического отношения R , служащего мерой качества диффузности звукового поля в помещении, используется корреляционный анализатор.

При измерениях звукопоглощения корреляционным методом (так же, как и при реверберационном) выполняют два измерения: одно в отсутствие образца, а другое при его наличии. При этом надежность и достоверность результатов будут тем больше, чем больше разница отсчетов при первом и втором измерениях.

Рекомендуемое расстояние r между излучателем и приемником звука равно

$$r \approx \sqrt{\frac{S}{300}},$$

где S – площадь поверхностей помещения.

Физически это означает, что измерения выгодно проводить при максимальном приближении приемника к излучателю. Коэффициент поглощения α испытуемого образца определяют по формуле

$$\alpha = \frac{S}{S_{обр}} \left[\frac{1}{\frac{n}{R_1^2(\tau_1)} - (n-1)} - \frac{1}{\frac{n}{R_2^2(\tau_2)} - (n-1)} \right],$$

где $S_{обр}$ – площадь образца; $R_1(\tau_1)$, $R_2(\tau_2)$ – максимальное значение нормированной функции корреляции при измерениях в камере без образца и с образцом.

В связи с тем, что корреляционный приём обладает значительно большей помехоустойчивостью, чем обычный приём, определение звукопоглощения особенно выгодно для камер с плохой звукоизоляцией, обладающих высоким уровнем посторонних шумов. Требования, предъявляемые к помещениям (размеры камеры, размеры образцов, их размещение, а также необходимость учёта дифракционных и интерференционных явлений), предназначенным для этих измерений, такие же, как и при реверберационных измерениях.

Описанный метод даёт возможность определить среднее значение коэффициента поглощения образцов при падении на него звука со всех сторон.

В силу того, что когерентных шумовой пакет аналогичен импульсному пакету, можно, правильно выбрав условия корреляционного анализа и размеры панелей, проводить измерения в обычных не заглушенных помещениях.

Звукоизоляцию образцов (в виде панелей) определяют по разности значений максимума функции корреляции (выраженной в децибелах), соответствующему прямому сигналу при отсутствии и наличии испытуемой панели. Возможны также два измерения с помощью приёмников расположенных перед панелью и после нее. Если источник расположен достаточно далеко от испытуемой панели, то будут получены те же результаты, но значительно быстрее.

Запись функции корреляции при изменении времени задержки показывает наличие нескольких максимумов, соответствующих как прямому сигналу, подлежащему измерению, так и сигналам, попадающим на приёмник обходными путями (так же, как при распространении импульсного сигнала имеется прямой, отраженные и многократно отраженные сигналы).

При наличии звукоизолирующей панели первый максимум наступает при несколько другом времени задержки (из-за разницы в скоростях распространения звука в среде и материалы образца). Впрочем, эта разница обычно мала. Уменьшение первого максимума нормированной функции корреляции в этом случае, сравнительно с измерениями при отсутствии панели, соответствует энергетической звукоизоляции образца, так как функция корреляции характеризует энергетические соотношения.

Влияние дифрагированного звука, попадающего на приёмник при огибании испытуемой панели, будет устранено, если разность длины пути звука, проходящего непосредственно через панель и огибающего ее, будет меньше длины волны звука на нижней граничной частоте полосы пропускания.

Метод измерения звукоизоляции корреляционным путем применяют для решения многих задач строительной акустики. Согласно данным Н.Н. Писаревского, погрешность измерений составляет около 3 дБ.

Коэффициент отражения образцов также измеряют по схеме, при которой приёмник помещают между излучателем и образцом так, чтобы расстояние от него до излучателя превышало длину когерентного пакета, обусловленного формой спектра и шириной полосы сигнала. Следует помнить, что коэффициент отражения, полученный как разность между функцией корреляции для отраженного сигнала от эталона и образца, будет энергетической величиной, равной квадрату коэффициента отражения по амплитуде.

Б. Д. Ефимцев и др. рассмотрели возможность применения корреляционной методики для измерений коэффициента звукопоглощения образцов в трубе при нормальной падении звука. Использование приёмника градиента давления вместо ненаправленного приёмника позволило заметно снизить влияние косых волн (мод колебаний высоких порядков), образующихся при превышении критических частот, определяемых отношением диаметра трубы к длине звуковой волны. Раздельный учёт функции корреляции, соответствующей прямому сигналу и сигналу, отраженному от образца, дал возможность учесть изменение коэффициента передачи измерительного тракта при измерениях с образцом и эталоном (жесткой стенкой).

Коэффициент поглощения в этом случае равен:

$$\alpha = 1 - [R_1(\tau_1) R_3(\tau_2) / R_2(\tau_1) R_4(\tau_2)] ,$$

где $R_1(\tau_1)$, $R_2(\tau_1)$ – нормированная функция взаимной корреляции для прямого сигнала при измерениях с эталоном и образцом;

$R_3(\tau_2)$, $R_4(\tau_2)$ – нормированная функция взаимной корреляции для отражённого сигнала при тех же измерениях.

Для возбуждения использовали воющий тон с девиацией частоты 100 и частотой модуляции 2 Гц.

Ключевые слова: дифракционный эффект, зона физической тени, колебания давления, система экранирования, звукоизолирующий экран, помехоустойчивость, коэффициент поглощения, акустические характеристики, корреляционный анализ, функция корреляции, дифрагированный звук.

Контрольные вопросы

1. Что такое звукоизоляция?
2. Что такое звукопоглощение?
3. В чем заключается первый способ измерения звукоизоляции материалов?
4. В чем заключается корреляционный метод измерения звукоизоляции материалов?

3.9. Оценка достоверности проводимых измерений

Как в начальный период, так и в процессе проведения измерений необходимо быть уверенным в том, что регистрируемые прибором или визуальными значения характеризуют измеряемые сигналы, а не какие-нибудь случайные. Наиболее правильным и надежным методом оценки достоверности акустического сигнала является измерение его значения акустическими средствами и измерение характера выходного сигнала.

Например, можно разделить излучатель и приемник звукоизолирующей перегородкой, прокладкой, кожухом и оценить изменение сигнала. Если известна ориентировочная звукоизоляция используемой перегородки (она должна быть меньше 10-15 дБ), то можно ожидать и соответствующего изменения сигнала. Другой способ заключается в проверке изменения расстояния между излучателем и приемником. При этом также должно фиксироваться заметное изменение сигнала.

Импульсный режим работы позволяет в лабораторных условиях наблюдать на экране осциллографа характер регистрируемого сигнала. Возбуждающий электрический импульсный сигнал (при правильном выборе параметров импульса) в момент регистрации принимаемого импульса на временной развертке осциллографа по отношению к возбуждающему соответствует задержке r/c , где r - расстояние между излучателем и приемником, c - скорость распространения звука в среде. Электромагнитные волны, которые могут вызвать наводку, распространяются с неизмеримо большей скоростью, чем звуковые, поэтому наводка будет по времени практически совпадать с возбуждающим сигналом.

После того как определена достоверность измеряемого сигнала, должна быть осуществлена регистрация помехи, т.е. того отклонения показаний регистрирующих приборов, которое соответствует отсутствию сигнала.

Помехи акустическим измерениям подразделяют на механические и электрические. К механическим относятся помехи, воздействующие на измеряемое поле или непосредственно на электроакустический преобразователь. Их источниками могут быть внешние воздействия, например, производственные шумы, шумы ветра, работающих агрегатов и т.д. От этих шумов можно частично избавиться, выбирая подходящее время и место проведения измерений и звукоизолируя помещения.

В лабораторных измерениях, выполняемых обычно в помещениях ограниченного объема - заглушенных камерах, бассейнах и т.д., внешние шумы мало влияют на результаты измерений. Эти помещения строят с хорошей звукоизоляцией. Однако при измерениях возникает акустическая помеха, вызываемая излученным сигналом, попадающим на приемник после одно- и многократного отражения от поверхностей помещения.

Распространено неправильное мнение, что в заглушенных помещениях отражение от поверхностей настолько мало, что с ним можно не считаться. На самом деле **влияние отраженных сигналов** определяется не столько уровнем заглушения, сколько отношением между излучаемым в помещении сигналом и сигналом, который должен быть принят. Поглощение или звукоизоляцию образца, если ожидается, что принимаемый сигнал в десятки раз меньше излученного, при таких условиях определить практически невозможно. Требуется импульсный или корреляционный режим работы.

К **электрическим помехам** относятся паразитные обратные связи и наводки. Под паразитной наводкой понимается передача напряжения сигнала из одного элемента в другой, не предусмотренная его схемой и конструкцией. Она появляется при наличии паразитной связи между этими элементами, приводящей к появлению на выходе сигналов, не соответствующих измеряемому. Кроме того, эта наводка может возбудить усилитель или изменить его характеристики.

Чаще всего встречается паразитная связь через общее сопротивление - внутреннее сопротивление и соединительные провода источников питания и схем управления электронных устройств. Паразитная связь может быть индуктивной, емкостной и смешанной.

При наличии сильных электромагнитных полей, создаваемых излучающими элементами большой мощности, даже очень слабая связь может оказаться достаточной для наведения паразитных сигналов в высокочастотных усилительных цепях. Наводку вызывают также и броски токов и напряжения питания при срабатывании различных реле, не говоря уже о колебаниях напряжения.

Наводки устраняют путем правильного соединения между собой элементов схем и экранирования путей распространения электрического, магнитного и электромагнитного полей.

Уровень помех в акустическом измерительном тракте вне зависимости от их происхождения оценивают в эквивалентных значениях измеряемой величины (давление, смещение, ускорение). С точки зрения оценки результатов измерений важно знать, - когерентна ли помеха полезному сигналу, т.е. связаны ли между собой фазы полезного сигнала и помехи.

Правильная постановка измерений требует, чтобы когерентная помеха была меньше измеряемого сигнала (т.е. суммы сигнала и помехи) на 20 – 25 дБ, а некогерентная помеха – на 15 - 20 дБ (при допустимой погрешности 1 дБ). Измерения с меньшей разницей допустимы только в виде исключения.

После того, как установлен, что помеха значительно меньше сигнала, должна быть проконтролирована **линейность измерительного тракта**. В лабораторных условиях это делается путем некоторого изменения величины электрического сигнала, возбуждающего электроакустический излучатель. В такое же число раз (обычно в 2 раза, т.е. на 6 дБ) должен изменяться сигнал на выходе.

Если этого не происходит, возбуждающий сигнал должен быть уменьшен до такой величины, чтобы всякое его изменение вызывало соответствующее изменение выходного сигнала. При необходимости точных измерений надо полностью снимать амплитудную характеристику измерительного тракта.

При измерениях шумов в натуральных условиях, когда нет возможности регулировать измеряемый сигнал, необходимо убедиться в линейности тракта путем переключения ступенчатых регуляторов усиления.

Ключевые слова: оценка достоверности измерений, помехи, когерентный, наводки, сигнал, линейность, измерительный тракт.

Контрольные вопросы

1. Как осуществляется оценка достоверности проводимых измерений?
2. Что относится к электрическим помехам?
3. Как устраняются электрические помехи?
4. Как должны соотноситься уровни помехи и полезного сигнала?
5. Как проверяется линейность измерительного тракта?

Глава 4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Задачи метрологического обеспечения акустических приборов включают в себя традиционные для метрологии вопросы: эталонное воспроизведение акустических величин, передача единиц акустических величин по иерархической лестнице от первичного эталона до рабочих средств измерений, поверка, калибровка и градуировка акустических средств измерений и другие вопросы. Ввиду обширности существующих акустических средств измерений соответственно обширными являются и способы и средства их метрологической поддержки.

Ниже рассматриваются в обзорном порядке лишь несколько вопросов, касающихся эталонных средств и градуировки акустических приборов.

4.1. Эталонные средства для воспроизведения звукового давления в воздушной среде

Государственный первичный эталон. Государственный первичный эталон предназначен для воспроизведения и хранения единицы звукового давления в воздушной среде и передачи её размера вторичным эталонам сличением при помощи компаратора и методом косвенных измерений (ГОСТ 8.038-94).

Государственный первичный эталон обеспечивает единицы звукового давления со средним квадратическим отклонением (СКО) результата измерений (S_0) 0,002-0,03 дБ при не исключенной систематической погрешности (Θ_0) 0,03- 0,16 дБ в зависимости от диапазона воспроизводимых частот. Диапазон значений звукового давления, воспроизводимых эталоном, от 0,02 до 80 Па в диапазоне частот от 2 Гц...100 кГц.

С помощью государственного первичного эталона абсолютным методом градуируют эталонные микрофоны, входящие в состав вторичных эталонов, а затем по ним методом сличения градуируют рабочие эталоны.

Вторичные эталоны. В качестве вторичных эталонов применяют установки "ПРИЁМНИКИ ЗВУКА", "ИЗЛУЧАТЕЛИ ЗВУКА" и "ИЗМЕРИТЕЛИ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ" в диапазоне измерений от 0,02 до 80 Па и диапазоне частот от 2 Гц до 100 кГц.

Установки "ПРИЁМНИКИ ЗВУКА" включают в себя приёмник звука, осуществляющий передачу размера единицы, измерительную систему и акустическую камеру связи.

Установки "ИЗЛУЧАТЕЛИ ЗВУКА" включают в себя излучатель звука, осуществляющий передачу размера единицы, измерительную систему и акустическую камеру связи.

Установки "ИЗМЕРИТЕЛИ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ" включают в себя прибор для измерения звукового давления, осуществляющий передачу размера единицы, измерительную систему и акустическую камеру связи.

В качестве приёмников звука применяют измерительные микрофоны, удовлетворяющие МЭК 1094, части 1 и 4, за исключением частотного диапазона, который может быть шире, чем установленный в стандарте. Допускается применение в качестве приёмников звука специальных измерительных микрофонов диаметром 1/8 дюйма.

В качестве излучателей звука применяют калибраторы, пистонфоны, измерительные телефоны, приборы "искусственный рот" и т.п.

В качестве приборов для измерения звукового давления применяют шумомер класса с характеристикой Lin или измерительные усилители с приёмниками звука.

Измерительные системы включают в себя вспомогательные приёмники и излучатели звука, вспомогательные приборы для измерения звукового давления, измерительные усилители, генераторы, вольтметры, компараторы и электрические возбудители.

В качестве акустических камер связи применяют камеры малого объёма, заглушенные и реверберационные камеры.

Доверительные относительные погрешности вторичных эталонов при доверительной вероятности 0,99 не должны быть более значений, указанных в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Эталон	Доверительные относительные погрешности, дБ		
	Приёмники звука	Излучатели звука	Измерители звукового давления
1. Вторичные эталоны, эталоны сравнения	0,2 - 1,0 0,2 - 0,3	0,3 - 1,0	0,2 - 1,0
2. Рабочие эталоны	0,3 - 1,3	0,3 - 0,4	0,3 - 1,3
3. Рабочие средства измерений	0,5 - 1,5	0,5 - 1,5	0,5 - 1,5

Вторичные эталоны, за исключением эталона сравнения, применяют для воспроизведения и хранения единицы звукового давления в воздушной среде и передачи её размера рабочим эталонам сличением при помощи компаратора, методами прямых и косвенных измерений и непосредственным сличением.

Эталон сравнения, в качестве которого используют набор приёмников звука, применяют для проведения международных сличений эталонов как одинакового уровня точности, так и менее точных эталонов с более точными, а также для сличений внутри страны.

Рабочие эталоны. В качестве рабочих эталонов применяют средства измерений, аналогичные средства измерений применяемые в качестве вторичных эталонов. Доверительные относительные погрешности рабочих эталонов при доверительной вероятности 0,99 не должны быть более значений, указанных в таблице 4.1.

Рабочие эталоны применяют для воспроизведения и хранения единицы звукового давления в воздушной среде и передачи её размера рабочим средствам измерений сличением при помощи компаратора, методами прямых и косвенных измерений и непосредственным сличением.

Рабочие средства измерений. В качестве рабочих средств измерений применяют приёмники звука (измерительные микрофоны), излучатели звука (калибраторы, пистонфоны, измерительные телефоны, приборы "искусственный рот", аудиометры), приборы для измерения звукового давления и измерители уровня звука (шумомеры).

Доверительные относительные погрешности рабочих средств измерений при доверительной вероятности 0,95 не должны быть более значений, указанных в таблице 4.1.

Соотношение доверительных относительных погрешностей вышестоящих и рабочих средств измерений не должно быть более 1:1,5.

Рабочие средства измерений применяют в научных исследованиях, при контроле параметров продукции, в медицине, при контроле параметров техники безопасности и в охране окружающей среды.

Ключевые слова: эталон, приемник, звук, излучатель, давление, микрофон, калибратор, пистонфон, телефон, рот, шумомер, возбудитель, камера, заглушенная, реверберационная, рабочий, эталон, воспроизведение, хранение, единица, звук, давление, воздушная среда, передача, размер, средства измерений, сличение, компаратор, метод, прямой, косвенный.

Контрольные вопросы

1. Назначение государственного первичного эталона?
2. Вторичные эталоны и их состав.
3. Установки "ИЗМЕРИТЕЛИ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ".
4. Перечислите состав излучателей звука/
5. Перечислите состав первичного эталона.
6. Чем отличаются вторичные эталоны единицы звукового давления в воздушной среде от первичного эталона?
7. Эталон сравнения и его назначение.
8. Назначение и состав рабочих эталонов единицы звукового давления в воздушной среде.
9. Чем отличаются рабочие эталоны единицы звукового давления в воздушной среде от первичного эталона?
10. Какие средства измерений применяются в качестве рабочих средств измерений звукового давления в воздушной среде?
11. Какой диапазон частот звуковых волн воспроизводится эталоном звукового давления в воздушной среде?

4.2. Общие методы градуировки акустических преобразователей

Под градуировкой мер или измерительных приборов понимают операцию нанесения отметок на шкалу меры или измерительного прибора. При отсутствии шкалы под градуировкой понимают определение зависимости между измеряемой величиной и соответствующим параметром меры или измерительного прибора.

Различают абсолютные и относительные методы градуировки акустических измерительных приборов.

В акустических измерениях чаще всего применяют приёмники звукового давления. Поэтому при *абсолютном методе градуировки* воспроизводят звуковое давление методом, позволяющим непосредственно оценить звуковое давление в единицах измерения (ньютон на квадратный метр), а затем вычисляют чувствительность как отношение напряжения, развиваемого акустическим преобразователем, к известному звуковому давлению.

При *относительной градуировке* (методы сравнения) сравнивают чувствительности образцового и градуируемого приборов.

Методы сравнения имеют две разновидности: сличение и замещение.

При *сличении* испытуемый и образцовый приёмники помещают в акустическое поле, создаваемое источником звука. При *замещении* приёмники устанавливают поочередно в одну и ту же точку звукового поля.

Процедура измерений и в том, и в другом случаях сводится к измерению напряжений на выходе приёмников и определению чувствительности испытуемого приёмника по формуле

$$E_{\text{исп}} = E_{\text{обр}} (U_{\text{исп}} / U_{\text{обр}})$$

где $E_{\text{обр}}$ – чувствительность образцового приёмника ;
 $U_{\text{исп}}$ – напряжение на выходе испытуемого приёмника;
 $U_{\text{обр}}$ – напряжение на выходе образцового приёмника.

Способы сличения или замещения выбирают исходя из условий испытаний. Если стабильность источника звука во времени (или же внешних условий в месте измерения) не ве-

лика, то метод сличения предпочтительнее. Однако при этом требуется тщательно предварительно проконтролировать характер акустического поля в месте расположения обоих приёмников. Кроме того, необходима полная идентичность используемых измерительных трактов.

Метод замещения дает возможность использовать один измерительный тракт, который должен сохранять свои характеристики неизменными при поочерёдном включении испытываемого и образцового приёмников. При этом акустическое поле (если оно поддерживается постоянным) для образцового и испытываемого приёмников будет одинаковым.

При методе замещения для современных достаточно стабильно источников звука можно получить более точные результаты.

Общая расчётная средняя квадратическая погрешность определения чувствительности методом сравнения равна

$$\Delta_{\text{исп}} = (\Delta_{\text{обр}}^2 + \Delta_{\text{и}}^2 + \Delta_{\text{к}}^2 + \Delta_{\text{р}}^2 + \Delta_{\text{н}}^2 + \Delta_{\text{ср}}^2)^{1/2}$$

где $\Delta_{\text{обр}}$ – погрешность градуировки образцового приёмника;
 $\Delta_{\text{и}}$ – погрешность отсчёта по регистрируемому прибору;
 $\Delta_{\text{к}}$ – погрешность поддержания коэффициента усиления;
 $\Delta_{\text{р}}$ – погрешность из-за флуктуаций акустического поля в точке измерения;
 $\Delta_{\text{н}}$ – погрешность из-за зависимости характеристик испытываемого приёмника от внешних условий;
 $\Delta_{\text{ср}}$ – погрешность, определяемая различием форм образцового и испытываемого приёмников.

Метод сличения более удобен для автоматизации, чем метод замещения, однако он предъявляет большие требования к источнику звука и помещению для градуировки.

Градуировку приемников звукового давления обычно проводят по направлению максимума направленности приемника при определенных температуре и давлении. Условия проведения градуировки и погрешность указывают в паспорте на приемник. Поскольку чувствительность многих приемников зависит от температуры, давления и многих других факторов, то необходимо условия проведения измерений привести в соответствие с условиями градуировки. Это необходимо для правильного расчета погрешностей измерений, в формулу которой входит погрешность градуировки.

Ключевые слова: градуировка, акустические преобразователи, абсолютный метод, относительный метод, чувствительность, сравнение, средняя квадратическая погрешность.

Контрольные вопросы

1. Что такое градуировка акустических преобразователей?
2. Какие существуют методы градуировки акустических преобразователей?
3. Абсолютный метод градуировки.
4. Относительный метод градуировки.

4.3. Градуировка электроакустических преобразователей методом взаимности

Наиболее распространённым и универсальным методом градуировки электроакустических преобразователей звука в настоящее время является метод взаимности.

Принцип взаимности может быть сформулирован в следующей виде: чувствительности любого линейного обратимого преобразователя в режиме излучения и приема связаны между собой постоянным соотношением, называемым коэффициентом взаимности.

Чувствительностью электроакустического преобразователя в режиме излучения называется отношение звукового давления, создаваемого им на расстоянии r , к электрическому току, протекающему через преобразователь.

Чувствительность преобразователя в режиме приёма – это отношение электродвижущей силы, развиваемой преобразователем, к звуковому давлению, действующему в месте его расположения.

Коэффициент взаимности определяется главным образом характером акустического поля, создаваемого преобразователем в режиме излучения.

С помощью метода взаимности градуируют образцовые преобразователи звука и контролируют чувствительность рабочих преобразователей звука. Он может применяться в широком диапазоне частот в виде различных вариантов, при которых используются различные приемы и техника измерений.

На низких звуковых частотах в воздухе и в воде используется метод взаимности, разработанный для камеры малого объема.

Метод градуировки преобразователей в условиях свободного поля. Испытуемый приёмник может быть необратимым, поэтому в качестве излучателя его использовать нельзя.

Прибор градуируют в три этапа.

На первом этапе вспомогательный источник звука (рис. 4.1) создаёт в месте расположения испытуемого приёмника звука звуковое давление p , вызывающее напряжение U_1 на выходе приёмника звука. Измеряется значение U_1 .

На втором этапе режим работы вспомогательного источника звука не изменяют, а приёмник звука заменяют обратимым преобразователем, работающим в режиме приёма. При этом на выходных зажимах обратимого преобразователя измеряется напряжение U_2 .

По существу первые два этапа измерений – это сравнение чувствительности двух приёмников звука, так как отношение U_1 / U_2 при равном давлении на приёмниках звука – это отношение их чувствительностей E_1 / E_2 .



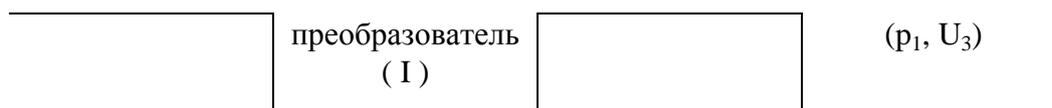


Рис. 4.1. Градуировка приемников звукового давления методом взаимности в свободном поле

На третьем этапе измерений обратимый преобразователь используют в режиме излучения. Возбуждаемый ток I , он создаёт в месте расположения испытуемого приёмника звука на расстоянии r от своего акустического центра давление p_1 , вызывающее напряжение U_3 на выходе испытуемого приёмника. Измеряется ток I , напряжение U_3 и расстояние r .

Чувствительность испытуемого приёмника звука E_2 определяют по формуле

$$E_2 = [(U_1 U_3 / U_2 I) H]^{1/2}$$

По результатам описанных измерений кроме чувствительности испытуемого приемника может быть найдена чувствительность обратимого преобразователя в режиме излучения и приема.

Аналогично описанному градуируют источники звука.

Обязательным условием выполнения градуировки является необходимость обеспечения линейности всего измерительного тракта, включая и обратимый преобразователь.

Камеры малого объёма. Используются для градуировки акустических преобразователей, например микрофонов, методом взаимности. Обычно она представляет собой цилиндрическую камеру с достаточно жесткими стенками и малой высоты по сравнению с длиной звуковой волны. Камеры малого объема для звукового диапазона частот имеют объем от 2 до 45 см³.

К двум торцам камеры присоединяют попеременно то вспомогательный излучатель и испытуемый микрофон, то вспомогательный излучатель и обратимый преобразователь, то обратимый преобразователь и испытуемый микрофон. Испытуемый микрофон, вспомогательный излучатель и обратимый преобразователь вставляют в соответствующие оправки в торцах камеры так, что их мембраны по существу составляют часть крышек камеры.

Типовая камера имеет диаметр 42,8 и высоту 12,5 мм. При заполнении камеры воздухом можно осуществить градуировку микрофонов до 5000 Гц. При заполнении водородом допустимая частота возрастает до 18000 Гц.

При измерениях в камерах малого объема среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерений (S_o) не превышает 0,1...0,3 дБ в диапазоне частот 20 Гц...10 кГц, при не исключенной систематической погрешности (Θ_o) 0,1...0,2 дБ. Измерения проводятся при звуковых давлениях 0,05...2 Па.

Серьезным недостатком градуировки с помощью камеры малого объема является необходимость многократной перестановки преобразователей звука и связанные с этим дополнительные погрешности.

Разработанная А.Н.Ривиним конструкция камеры позволяет градуировать преобразователи, не переставляя их, а только переключая элементы измерительной схемы.

Обратимые электроакустические преобразователи. При акустических измерениях часто необходимо использовать один и тот же электроакустический преобразователь как в режиме приема, так и в режиме излучения. Это обязательно при градуировке методом взаимности, а также при измерениях, производимых импульсными, реверберационными и тому подобными методами.

Условие обратимости проверяется следующим образом. Однотипные преобразователи 1 и 2 устанавливают в свободном поле на расстоянии 20 см друг от друга. Сначала на пре-

образователь 1 подается ток I_1 , а на выходе преобразователя 2 измеряется напряжение U_2 (рис. 4.2).

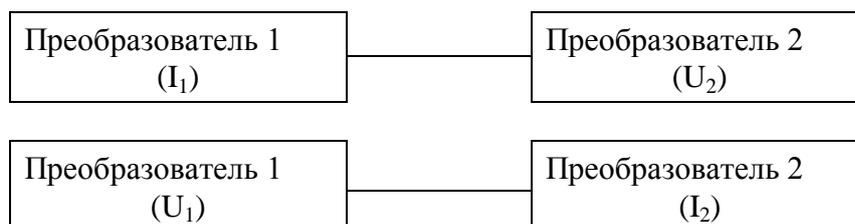


Рис. 4.2. Проверка условия обратимости

Затем через преобразователь 2 пропускается ток I_2 , а на выходе преобразователя 1 измеряется напряжение U_1 (рис. 4.2).

Если $I_1 = I_2$, то по условию взаимности $U_1 / U_2 = 1$ (в случае, если оба преобразователя подчиняются принципу взаимности).

Отклонение этого отношения от единицы, превышающие погрешности измерений, характеризуют нарушение принципа взаимности в данных преобразователях, а следовательно, и систематическую погрешность градуировки.

Для повышения точности измерений необходимо уменьшать размеры преобразователей, а градуировку производить на достаточно больших расстояниях, которые допустимы в отношении влияния отраженных сигналов.

При градуировке микрофонов по методу взаимности часто в качестве обратимого преобразователя используют капсуль конденсаторного микрофона..

Ключевые слова: градуировка, акустические преобразователи, метод взаимности, этап градуировки, обратимые преобразователи.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность метода взаимности?
2. Перечислите этапы градуировки.
3. Для чего предназначены камера малого объема?
4. Какие преобразователи называются обратимыми?

4.4. Градуировка приемников звука с помощью акустических труб и акустического радиометра

Акустические трубы. Трубы широко распространены в акустических измерениях при градуировке преобразователей звука, в установках для измерения акустических сопротивлений, коэффициента поглощения материалов и др. Этому обстоятельству способствовало то, что с помощью труб достаточно простыми средствами можно создавать звуковые поля плоских волн, удобные для выполнения измерений и сравнительно легко рассчитываемые.

Единица звукового давления в воздухе в диапазоне частот 20 Гц – 16 кГц воспроизводится в поле стоячих волн методом звукомерного диска. Звуковое давление в трубах определяют в узле стоячей волны по вращающему моменту, действующему на звукомерный диск, помещенный в пучности колебательной скорости и расположенный своей нормалью под углом 45° к направлению распространения звука.

Звуковое давление P_3 для закрытой с обоих концов трубы вычисляют по формуле:

$$P_3 = \sqrt{\frac{3\rho c^2 nD}{8Rr^3 A}},$$

где ρ – плотность среды;
 c – скорость распространения звука в среде;
 D – упругая постоянная нити подвеса;
 r – радиус диска;
 R – расстояние от шкалы отсчета до диска;
 n – отсчет по шкале, пропорциональной отклонению диска;
 A – поправочный коэффициент (для воздуха, равный 1).

Установка, с помощью которой воспроизводится единица звукового давления, состоит из трёх труб – резонаторов.

На одном конце каждой из труб устанавливают излучатель звука, на другом – акустически жесткую стенку при воспроизведении звукового давления (рис. 4.3) или образцовый микрофон при градуировке (рис. 4.4). В средней части трубы сделан отвод для подвеса звукомерных дисков.

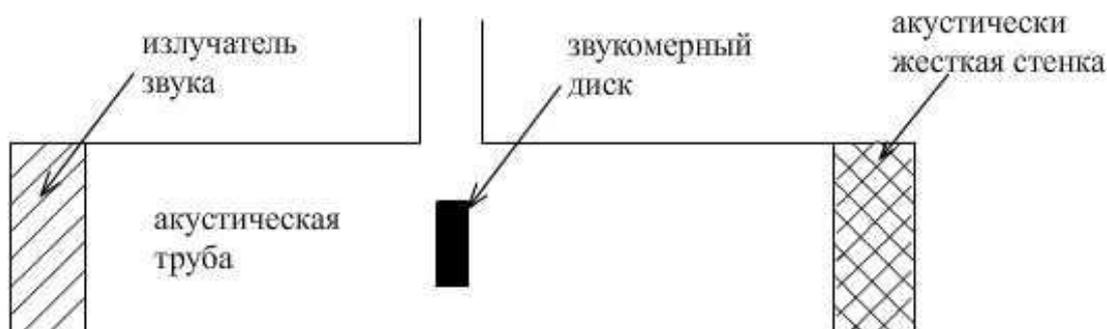


Рис. 4.3. Схема трубы-резонатора для воспроизведения звукового давления

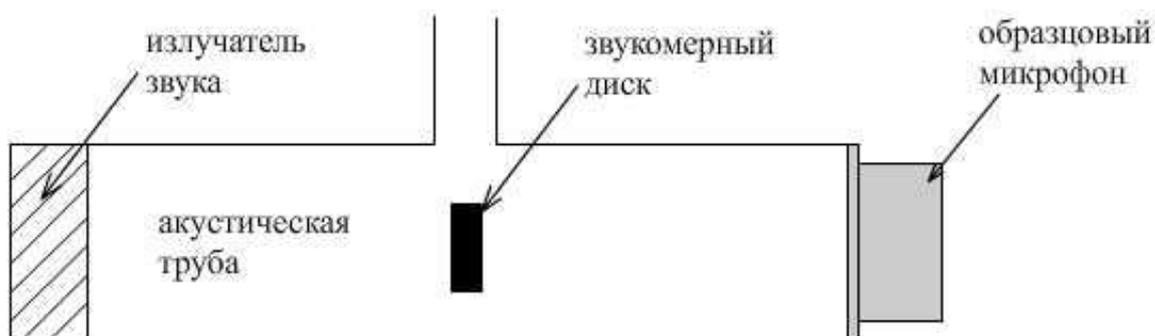


Рис. 4.4. Схема трубы-резонатора при градуировке

В установке применяют набор стеклянных дисков диаметром 3,975 – 5,990 мм и толщиной 0,055 – 0,061 мм. Диски подвешивают на тонкой кварцевой нити диаметром 4 – 5 мкм.

Звуковое давление для трубы, открытой с одного конца, пропорционально давлению в закрытой трубе и равно

$$P_{от} = 0,707 P_{зт}$$

Средняя квадратическая погрешность ряда измерений при воспроизведении звукового давления составляет 0,1 дБ, погрешность градуировки образцовых микрофонов – 0,3 дБ.

При воздушных измерениях микрофоны градуируют с помощью так называемых “бесконечных труб“, у которых один из концов закрыт звукопоглощающим материалом.

При работе с трубами важно правильно выбрать материал для стенок трубы и толщину ее стенок. В воздушных измерениях трубы изготавливают из латуни толщиной порядка 3 мм. Такие трубы являются достаточно жесткими.

Необходимо отметить, что общим недостатком измерительных установок с трубами – резонаторами является возможность градуировки приёмников звука в них только на реперных частотах, соответствующих резонансным частотам труб. Диапазон частот (в области верхних частот) ограничен возможностью стоячих волн в поперечном сечении трубы.

Акустический радиометр. В диапазоне частот 20...300 Гц звуковое давление воспроизводится методом акустического радиометра. Акустический радиометр представляет собой отражающий диск диаметром 20 мм, эксцентрично прикрепленный на тонкой кварцевой нити и поворачивающийся под действием радиационного звукового давления.

Радиационное звуковое давление определяют по давлению радиации, действующему на радиометр по формуле

$$p = \sqrt{\frac{\rho c^2 D n}{4\pi R r^3}},$$

где ρ - плотность среды,

c - скорость распространения звука в среде,

D - упругая постоянная нити связи,

r - радиус диска,

R - расстояние от шкалы отсчета до диска,

n - отсчет по шкале, пропорциональный отклонению диска.

Средняя квадратическая погрешность ряда измерений при воспроизведении единицы звукового давления методом акустического радиометра составляет 0,4 дБ.

Градуировка приемников звукового давления осуществляется со средней квадратической погрешностью измерения 1 дБ.

Ключевые слова: измерители звукового давления, акустический радиометр, акустическая труба, метод акустического радиометра, радиационное давление, упругая постоянная нити связи, средняя квадратическая погрешность, градуировка преобразователей звука, “бесконечная труба“, вращающий момент, колебательная скорость.

Контрольные вопросы

1. Чем измеряется звуковое давление?
2. Что собой представляет акустический радиометр?
3. Принцип действия акустического радиометра.
4. Что собой представляют акустические трубы?
5. Принцип действия акустической трубы.

4.5. Градуировка электроакустических преобразователей с помощью пистонфона

Измерительная установка «Пистонфон» (далее «Пистонфон») служит, в первую очередь, для калибровки измерительных микрофонов, а также для калибровки шумомеров вместе с микрофоном. Метод пистонфона является наиболее распространенным методом градуировки акустических преобразователей в инфразвуковом диапазоне частот.

Пистонфон представляет собой толстостенную камеру объемом V_0 (с номинальными объемами 1000, 200 и 10 см³) и с поперечными размерами много меньше длины волны (рис.4.6). На рисунке показаны:

- 1 - градуируемый микрофон;
- 2 - камера пистонфона;
- 3 - поршень;
- 4 - микроскоп;
- 5 - вибратор (например, электромеханический);
- 6 - милливольтметр.

В камере перемещается по гармоническому закону с амплитудой X_m поршень 3 площадью S , вытесняющий из объема V_0 камеры 2 переменный объем, равный $S \cdot X_m$. Он приводится в движение, например, кривошипным механизмом. Амплитуду колебаний поршня измеряют измерительным микроскопом.

В идеальном случае, когда стенки камеры и мембраны приемника жесткие, акустическое давление в камере P_m находят из соотношения:

$$P_m = \gamma K P_0 (S \cdot X_m / V_0), \quad (4.5.1)$$

где $\gamma = C_p / C_v$ - отношение удельных теплоемкостей,

P_0 - давление в камере до начала перемещения поршня.

Практически, из-за наличия гибкости стенок и приемника (особенно при градуировке с заполненным водой объемом) результирующая гибкость камеры получается намного больше расчетной.

Систематические погрешности, возникающие при градуировке акустических преобразователей методом пистонфона, обусловлены еще и тем, что во время колебаний поршня охлаждается и нагревается рабочий объем за счет теплопроводности стенок. Иными словами, процесс сжатия растяжения не адиабатичен. Для исключения этой систематической погрешности в формулу (4.5.1) вводят термодинамическую поправку K ($0,75 \leq K \leq 1$), рассчитываемую теоретически для некоторых простейших геометрических форм камер.

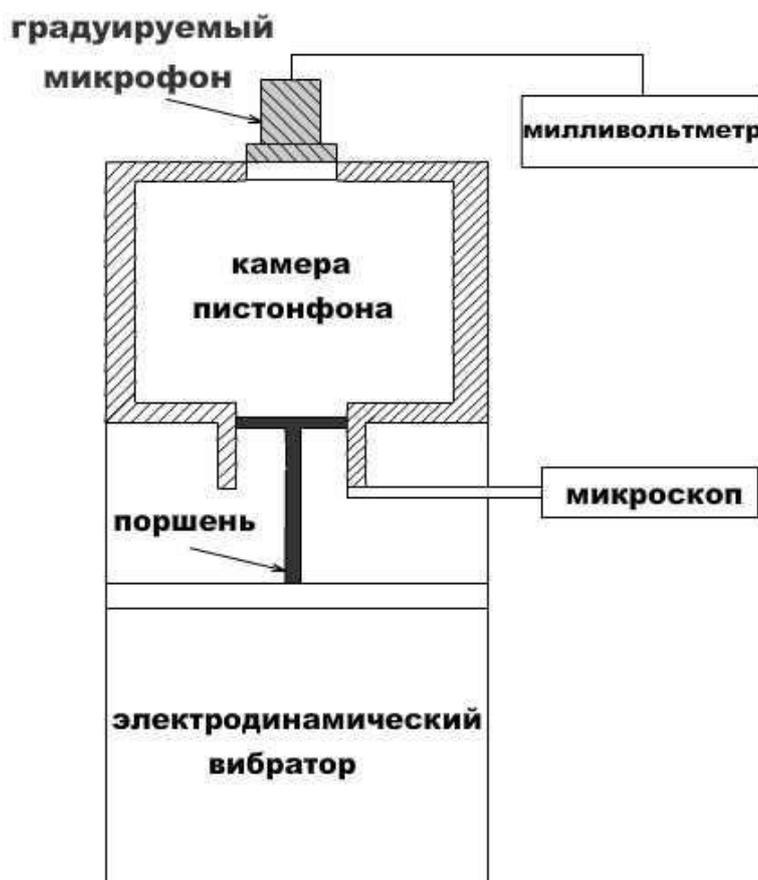


Рис. 4.5. Схематическое устройство пистонфона

Основными источниками погрешностей метода являются:

- 1) ошибки определения площади поршня по его геометрическим размерам;
- 2) ошибки отсчета «размаха» колебания поршня;
- 3) ошибки измерения объема камеры;
- 4) ошибки измерения статического давления;
- 5) ошибки определения γ в зависимости от внешних условий (изменения давления, влажности и температуры);
- 6) приближенное определение термодинамической поправки.

Диапазон значений звукового давления, воспроизводимых установкой «Пистонфон», составляет 2...80 Па в диапазоне частот 2 Гц...115 Гц. Она обеспечивает единицы звукового давления со средним квадратическим отклонением (СКО) результата измерений (S_0) не превышающим 0,03 дБ при не исключенной систематической погрешности (Θ_0), не превышающей 0,1 дБ.

Пистонфон PF 101. Пистонфон PF 101, модель 00003, представляет собой маленький, питаемый от батареи, высокоточный источник звука для быстрой и точной калибровки микрофонов.

Благодаря энергоснабжению от батарей пистонфон не зависит от внешних источников питания и может быть применён с успехом как в лаборатории, так и на открытом воздухе. Использование переходников позволяет проводить калибровку микрофонов различных размеров.

Принцип действия. Маленький, малошумный электродвигатель с центробежным регулятором, поддерживающим число оборотов в определённых пределах независимо от напряжения батареи, служит в качестве привода кулачкового диска.

Два маленьких, симметрично расположенных и однофазно управляемых кулачковым диском поршня создают в напорной полости синусоидальные колебания давления, частота которых составляет примерно 180 Гц. Размеры пистонфона подобраны таким образом, что при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. он создаёт звуковой уровень, равный 118 дБ. Найденный Уровень звукового давления индивидуально для каждого экземпляра приводится в Протоколе испытания Пистонфона.

При отклонениях от атмосферного давления от 760 мм рт. ст. сила звука изменяется. Величины необходимой коррекции могут быть отсчитаны непосредственно в децибелах на шкале принадлежащего к комплектности барометра. Относительная влажность воздуха до 90 % не влияет на звуковое давление.

Описание механической конструкции. Пистонфон состоит из трёх частей, привинченных друг к другу и создавая, таким образом, одно целое.

Круглое отверстие на лобовой стороне пистонфона PF 101 служит для сопряжения микрофона с находящейся за отверстием напорной камерой. Заложённое в стенке сверления герметизирующее резиновое кольцо предназначено для обеспечения в этом месте при вставленном микрофоне воздухо-нерпоницаемого отделения напорной камеры от окружающей среды.

Боковое сверление в стенке напорной камеры служит для статистической компенсации давления воздуха.

На лобовой стороне корпуса мотора находится маленький цилиндр, в котором сделаны два сверления, смещённые на 180° . Они служат как ведущие для двух маленьких, точно припасованных поршней. Эти поршни прижимаются пружинкой к контуру кулачкового диска, закреплённого на выводе валика высокоточного мотора.

На противоположной лобовой поверхности контактирующий элемент создаёт соединение с батарейной коробкой, в которой размещены последовательно подключённых элементов по 1,5 вольта каждый. Элементы питают центробежный регулируемый двигатель при посредстве транзистора TS 1. Последний вместе с резистором W 1 и конденсатором C 1 создаёт схему управления мотором.

Включение мотора осуществляется выключателем, помещённом на корпусе.

Подготовка пистонфона к работе. Перед каждым измерением следует проверить напряжения батарейного комплекта. Для этого при включённом состоянии (красная точка видна) нажимается коротко выключатель "Batteriespannungskontrolle" (контроль напряжения батареи). В случае безупречных элементов слышно отчётливое увеличение высоты тона пистонфона. Если такой переход отсутствует, необходимо сменить батарейный комплект.

После этого измерительный микрофон засовывается в пистонфон до осязаемого упора. Следить нужно за тем, чтобы оси пистонфона и микрофона находились на одной прямой и чтобы оба прибора были легко прижаты друг к другу в течении измерительной операции.

Во избежание перекоса корпусов обоих приборов и тем самым дополнительных погрешностей, пистонфон должен по возможности работать в вертикальном положении.

Микрофоны других диаметров могут быть приспособлены к пистонфону PF 101 при помощи специально заготовленных переходников. При применении последних необходима коррекция создаваемого уровня звукового давления, обусловленная изменением объёма напорной камеры, если такое изменение превышает $0,4 \text{ см}^3$.

В связи с тем, что создаваемый пистонфоном не приведенный сигнал около 118 дБ относится к атмосферному давлению в 760 мм рт. ст., следует сначала определить, какое звуковое давление подаёт пистонфон при господствующих в точке измерения атмосферных усло-

виях. Звуковое давление получается как сумма должного значения (указанного в протоколе испытания) и значения (с учётом знака), отсчитанного на внешней, откалиброванной в децибелах шкале барометра (принадлежит к комплектности). Перед отсчётом нужно легко постучать в стёклышко отсчетного устройства барометра.

Пример. На внешней шкале стрелка барометра указывает 0,4 дБ. Наводимый пистонфоном звуковой уровень при должном значении 118,0 дБ и атмосферном давлении 726 мм рт. ст. составляет

$$118,0 \text{ дБ} \pm 0,3 \text{ дБ} - 0,4 \text{ дБ} = 117,6 \text{ дБ} \pm 0,3 \text{ дБ}$$

Измерение коэффициента преобразования измерительных микрофонов. Для измерения коэффициента преобразования измерительного микрофона к его выходу (в случае конденсаторных микрофонов к выходу преобразователя импеданса) подключают милливольтметр, входное сопротивление которого велико по сравнению с внутренним сопротивлением со стороны выхода микрофонного усилителя. Затем включают пистонфон и записывают отсчитанное на милливольтметре напряжение.

Напряжение на милливольтметре U делённое на звуковое давление, создаваемое пистонфоном P , представляет собой коэффициент преобразования E для частоты пистонфона исследуемого микрофона (с учётом действия предварительного усилителя).

$$E = U / P.$$

Следует принимать во внимание, что помимо погрешности микрофона в общую погрешность калибровки входят погрешности милливольтметра и измерительного усилителя.

Ключевые слова: измерительная установка, пистонфон, камера, объем, диапазон, частота, пистонфон PF 101, калибровка, микрофон, шумомер, уровень, звук, давление, коэффициент, преобразование.

Контрольные вопросы

1. Назначение, устройство и принцип работы пистонфона.
2. Какие номинальные объемы имеет измерительная установка «Пистонфон»?
3. Чем измеряют амплитуду колебаний поршня измерительной установки «Пистонфон»?
4. Какой вид имеет формула для расчета акустического давления в камере пистонфона?
5. Перечислит основные источники погрешности, возникающие при градуировке акустических преобразователей методом пистонфона.
6. Принцип действия "Пистонфона PF 101".
7. Как осуществляется подготовка пистонфона к работе?
8. При помощи каких технических средств могут быть приспособлены к пистонфону PF 101 микрофоны разных диаметров?
9. Какие средства измерения используется для определения коэффициента преобразования измерительного микрофона?
10. Дайте определение коэффициента преобразования микрофона.

4.6. Градуировка электроакустических преобразователей электростатическим методом

Метод состоит в том, что к диафрагме градуируемого приёмника с помощью добавочного (третьего) электрода прикладывается электрическое напряжение, вызывающее пondeромоторное электростатическое давление на диафрагму (рис. 4.6). Это давление эквивалентно воздействию на мембрану акустического давления.

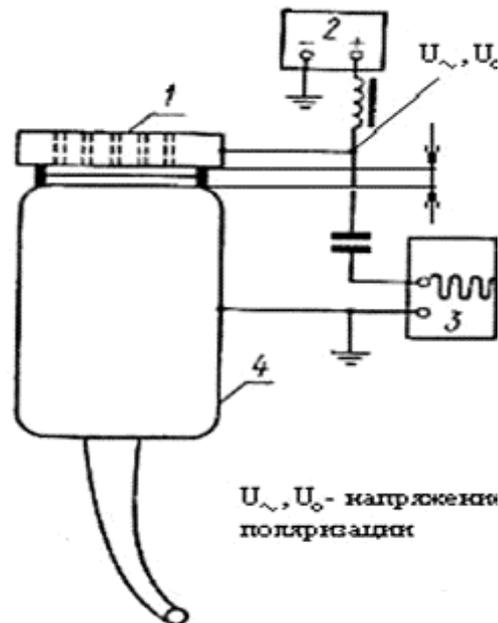


Рис. 4.6. Схема градуировки электростатическим методом:
1 - дополнительный электрод; 2 - источник постоянного тока;
3 - генератор; 4 - градуируемый приемник звука

При градуировке электростатическим методом плоскую мембрану испытуемого приёмника размещают на расстоянии 0,1 – 0,5 мм от гладкой металлической пластинки, называемой добавочным электродом. К мембране и добавочному электроду подводят переменное напряжение U_{\sim} и постоянное напряжение поляризации U_0 . Мгновенное напряжение, приложенное к мембране и добавочному электроду, равно $U = U_0 + U_m \sin \omega t$.

Цепи переменного и постоянного напряжений разделяются фильтрами LC или RC.

Между мембраной и добавочным электродом, образующим плоский конденсатор, возникает электростатическая сила притяжения, равная

$$F = \frac{\epsilon_0 U^2 S}{2d^2},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость воздуха;

S – площадь мембраны, m^2 ;

d – зазор между мембраной и добавочным электродом, м.

Эффективное значение давления на мембране равно

$$p = \epsilon_0 U_0 U / d^2 \quad [н/м^2],$$

где U – эффективное значение приложенного к мембране переменного напряжения.

Из этого выражения следует, что давление на мембране приемника, возникающее под влиянием электростатических сил притяжения, не зависит от частоты напряжения возбуждения.

Воздушный зазор d измеряют щупом или определяют косвенно путем измерения межэлектродной ёмкости.

На точность градуировки электростатическим методом влияют упругость воздушного зазора между мембраной и добавочным электродом, а также краевой эффект рассеяния электростатического поля.

Так как при малом зазоре добавочный электрод создает дополнительное сопротивление воздушного слоя у диафрагмы, то на практике применяют решетчатый добавочный электрод в виде равноотстоящих тонких пластин.

Напряжение $U_{пр}$, развиваемое градуируемым приемником, измеряют электронным вольтметром.

Чувствительность приёмника находят по формуле

$$E = U_{пр} / p$$

Электростатический метод градуировки применяют в диапазоне частот от единиц герц до нескольких килогерц.

Ключевые слова: градуировка, акустические преобразователи, электростатический метод, электрод, мембрана.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность электростатического метода?
2. Чем определяет эффективное значение давления на мембране?
3. От чего зависит точность градуировки электростатическим методом?

Литература

1. Блинова Л.П., Колесников А.Е., Ланганс Л.Б. Акустические измерения. – М.: Издательство стандартов, 1971.
2. Хакимов О.Ш., Юнусов Б.Х. Акустические измерения. Учебное пособие. – Ташкент: Таш. гос. техн. ун-т. – 1997, 192 с.
3. Чертов А.Г. Физические величины. – М.: Высшая шк., 1990. – 335 с.
4. Беранек Л. Акустические измерения/ Пер. с англ. - М.: 1952.
5. Клюкин И. И., Колесников А. Е. Акустические измерения в судостроении, 2 изд. - Л.: 1968.
6. Власов А.Д., Мурин Б.П. Единицы физических величин в науке и технике: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
7. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
8. Тюрин А. М., Сташкевич А. П., Таранов Э. С. Основы гидроакустики. Л., 1966.
9. ГОСТ 8.038 - 94. Государственная поверочная схема для средств измерения звукового давления в воздушной среде в диапазоне частот 2 Гц - 100 кГц.
10. Методические указания 305. По поверке образцовых источников шума.
11. ГОСТ 8.153 - 75. ГСИ. Микрофоны измерительные конденсаторные. Методы и средства поверки.
12. ГОСТ - 16123 - 70. Микрофоны. Методы электроакустических испытаний.
13. МИ 1267-86. ГСИ. Преобразователи ультразвуковые. Методы поверки.
14. ГОСТ 23941-79. Шум. Методы определения шумовых характеристик. Общие требования.
15. ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
16. ГОСТ 12.1.024-81. ССБТ. Определение шумовых характеристик источников шума в заглушенной камере. Точный метод.
17. ГОСТ 12.1.025-81. ССБТ. Шум. Определение шумовых характеристик источников шума в реверберационной камере. Точный метод.
18. ГОСТ 12.1.026-81. ССБТ. Шум. Определение шумовых характеристик источников шума в свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью. Технический метод.
19. ГОСТ 12.1.027-81. ССБТ. Шум. Определение шумовых характеристик источников шума в реверберационной камере. Технический метод.
20. ГОСТ 12.1.028-81. ССБТ. Шум. Определение шумовых характеристик источников шума. Ориентировочный метод.
21. ГОСТ 12.1.050-86. ССБТ. Методы измерения шума на рабочих местах.
22. ГОСТ 27243-87. Шум. Ориентировочный метод определения уровня звуковой мощности шума машин при помощи образцового источника звука.
23. ГОСТ 27345-87. Внутренний шум автотранспортных средств. Допустимые уровни методы измерений.
24. ГОСТ 12.4.077-79. ССБТ. Ультразвук. Методы измерения звукового давления на рабочих местах.
25. ГОСТ 23337-78. (СТ СЭВ 2600-80). Шум. Методы измерения шума населенной территории и помещениях жилых и общественных зданий.
26. ГОСТ 17187-81. Шумомеры. Общие технические требования и методы испытаний.
27. ГОСТ 8.257-84. ГСИ. Шумомеры. Методика поверки.
28. ГОСТ 27072-86. Генераторы сигналов диагностические звуковые. Аудиометры. Общие технические требования и методы испытаний.
29. ГОСТ 17168-82. Фильтры электронные октавные и третьоктавные.

30. ГОСТ 8.154-75. ГСИ. Приборы измерительные типа «Ухо искусственное». Методы и средства поверки.
31. ГОСТ 22547-81. Средства гидроакустические. Термины и определения.
32. ГОСТ 26120-84. Акустика авиационная. Термины и определения.