ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственная система обеспечения единства измерений

МИКРОФОНЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ

Первичный метод градуировки по свободному полю лабораторных эталонных микрофонов методом взаимности

Издание официальное

БЗ 1—2001/477

ГОССТАНДАРТ РОССИИ
Москва

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Всероссийским научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), Техническим комитетом по стандартизации ТК 206 «Эталоны и поверочные схемы»

ВНЕСЕН Управлением метрологии Госстандарта России

2 ПРИНЯТ И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Госстандарта России от 1 августа 2001 г. № 311-ст

3 Настоящий стандарт представляет собой аутентичный текст международного стандарта МЭК 61094-3—95 «Микрофоны измерительные. Первичный метод градуировки по свободному полю лабораторных эталонных микрофонов методом взаимности»

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

© ИПК Издательство стандартов, 2001

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Госстандарта России

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Определения 1
4 Опорные внешние условия 2
5 Принципы градуировки по свободному полю методом взаимности 2
6 Факторы, влияющие на чувствительность по свободному полю 6
7 Составляющие неопределенности градуировки 7
Приложение А Данные о положении акустического центра микрофона 10
Приложение Б Данные о коэффициентах затухания звука в воздухе 11
Приложение В Влияние окружающей среды на чувствительность микрофона 13
Приложение Г Библиография 15

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственная система обеспечения единства измерений

МИКРОФОНЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ

Первичный метод градуировки по свободному полю лабораторных эталонных микрофонов методом взаимности

State system for ensuring the uniformity of measurements. Measurement microphones.
Primary method for free-field calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique

Дата введения 2002—07—01

1 Область применения

Настоящий стандарт:

- распространяется на лабораторные эталонные микрофоны (далее — микрофоны), удовлетворяющие требованиям МЭК 61094-1, и на микрофоны других типов. Микрофоны, полностью удовлетворяющие требованиям МЭК 61094-1 и снабженные специальным адаптером, могут быть градуированы в соответствии с настоящим стандартом со снятым адаптером;
- устанавливает первичный метод определения чувствительности микрофонов по свободному полю, позволяющий получить воспроизводимость и необходимую точность при измерении звукового давления в условиях свободного поля;
- предназначен для применения в лабораториях, в которых работает высококвалифицированный персонал и которые оснащены специализированным оборудованием.

2 Нормативные ссылки

Следующие нормативные документы содержат положения, на которые имеются ссылки в настоящем стандарте и которые входят в состав этого стандарта. Поскольку все нормативные документы периодически пересматриваются, рекомендуется применять последние издания нормативных документов, указанных ниже. Перечни действующих международных стандартов имеются в соответствующих национальных организациях МЭК и ИСО.

МЭК 27—72[1)] Обозначения в электротехнике. Часть 2. Телекоммуникация и электроника

МЭК 50(801)—94[1)] Международный электротехнический словарь (IEV). Глава 801. Акустика и электроакустика

МЭК 61094-1—95[1)] Микрофоны измерительные. Часть 1. Микрофоны лабораторные эталонные. Технические требования

МЭК 61094-2—95[1)] Микрофоны измерительные. Часть 2. Первичный метод градуировки по давлению лабораторных эталонных микрофонов методом взаимности

ИСО 9613-1—93[1)] Акустика. Затухание звука при распространении в окружающей среде. Часть 1. Расчет поглощения звука атмосферой

3 Определения

Определения — по МЭК 27, МЭК 50(801), МЭК 61094-1, МЭК 61094-2, ИСО 9613-1 и дополнительные термины со следующими определениями:

[1)] Стандарты МЭК, ИСО — во ВНИИКИ Госстандарта России.

Издание официальное

обратимый микрофон: Линейный пассивный микрофон, для которого импеданс холостого хода в обратном направлении и передаточный импеданс в прямом направлении равны по значению.

фазовый угол чувствительности микрофона по свободному полю: Фазовый угол на данной частоте для плоской синусоидальной бегущей волны для определенного направления распространения звука при данных внешних условиях между напряжением холостого хода и звуковым давлением в точке расположения акустического центра микрофона до помещения его в звуковое поле, градус или радиан (. . .° или рад).

акустический центр микрофона-преобразователя: Акустический центр микрофона-преобразователя в режиме излучения на данной частоте синусоидального сигнала и для определенного направления и расстояния есть точка, из которой расходятся волны с фронтом, близким к сферическому, на поверхности в окрестности точки наблюдения.

Примечания

1 В этом случае акустический центр обратимого микрофона-преобразователя при приеме звука и при излучении звука остается одним и тем же.

2 Определение справедливо для звуковых полей со сферическим или почти сферическим волновым фронтом.

эквивалентный точечный преобразователь: Преобразователь, который, будучи помещен в акустическом центре микрофона, воспроизводит характеристики данного микрофона в режимах приема и передачи в данном направлении и диапазоне расстояний.

электрический передаточный импеданс: Для системы, состоящей из двух акустически связанных микрофонов, — это отношение напряжения холостого хода микрофона-приемника к входному току микрофона-излучателя, ом (Ом).

Примечание — Этот импеданс определяют для конструкции заземленного экрана, указанной в 7.2 МЭК 61094-1.

акустический передаточный импеданс: Для системы, состоящей из двух акустически связанных микрофонов, — это отношение звукового давления, действующего на мембрану микрофона-приемника, к объемной скорости, производимой микрофоном-излучателем, в режиме короткого замыкания, паскаль-секунда на кубический метр (Па·с/м^3).

главная ось микрофона: Прямая, проходящая через акустический центр микрофона и перпендикулярная к мембране микрофона.

условия свободного поля: Условия, при которых звуковая волна может распространяться свободно без каких-либо возмущений.

4 Опорные внешние условия

Температура	$t_г$ = 23,0 °С.
Статическое давление	$p_{s,г}$ = 101325 Па.
Относительная влажность	$H_г$ = 50 %.

Примечание — Опорное значение температуры 23 °С выбрано из практических соображений, требующих проведения градуировки преимущественно при данной или близкой по значению температуре.

5 Принципы градуировки по свободному полю методом взаимности

5.1 Общие сведения

Градуировка микрофонов методом взаимности может быть выполнена либо с помощью трех микрофонов, два из которых должны быть обратимыми, либо с помощью вспомогательного источника звука и двух микрофонов, один из которых должен быть обратимым.

Примечание — Если один из микрофонов необратим, то он может быть использован только в качестве приемника звука.

5.1.1 Общие принципы градуировки при использовании трех микрофонов

Предполагают, что два микрофона акустически связаны в свободном поле. Используя один из них как источник звука, а другой как приемник звука, измеряют электрический передаточный импеданс. Если акустический передаточный импеданс такой системы известен, то можно найти

произведение чувствительностей по свободному полю двух связанных микрофонов. Используя парные комбинации микрофонов (1), (2) и (3), получают три независимых произведения, из которых можно вывести уравнение чувствительности по свободному полю каждого из трех микрофонов.

5.1.2 Общие принципы градуировки при использовании двух микрофонов и вспомогательного источника звука

Во-первых, предполагают, что два микрофона акустически связаны между собой в свободном поле. Определяют произведение чувствительностей по свободному полю этих двух микрофонов (см. 5.1.1). Во-вторых, предполагают, что на оба микрофона воздействует одинаковое звуковое давление от вспомогательного источника звука в свободном поле. Тогда отношение двух выходных напряжений будет равно отношению чувствительностей по свободному полю этих микрофонов. Таким образом из произведения и отношения чувствительностей по свободному полю этих двух микрофонов можно определить чувствительность по свободному полю каждого из двух микрофонов.

Примечание — Чтобы получить отношение чувствительностей по свободному полю, можно использовать метод непосредственного сравнения, а вспомогательным источником звука может быть третий микрофон, размеры и акустические характеристики которого отличаются от таковых у градуируемых микрофонов.

5.2 Основные уравнения

Лабораторные эталонные и подобные им микрофоны можно рассматривать как обратимые, и поэтому систему из двух уравнений для этих микрофонов можно записать в виде

$$\underline{z}_{11}\underline{i} + \underline{z}_{12}\,\underline{q} = \underline{U}; \qquad (1)$$

$$\underline{z}_{21}\underline{i} + \underline{z}_{22}\,\underline{q} = \underline{p},$$

где $\underline{p}$ — звуковое давление на мембране микрофона;

$\underline{U}$ — напряжение на электрических контактах микрофона;

$\underline{q}$ — объемная скорость акустической части (мембраны) микрофона;

$\underline{i}$ — сила тока, протекающего через электрические контакты микрофона;

$\underline{z}_{11} = \underline{Z}_{\text{e}}$ — электрический импеданс микрофона при заторможенной мембране;

$\underline{z}_{22} = \underline{Z}_{\text{a}}$ — акустический импеданс электрически ненагруженного микрофона;

$\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21} = \underline{M}_{\text{p}}\,\underline{Z}_{\text{a}}$ — передаточные импедансы в обратном и прямом направлениях;

$\underline{M}_{\text{p}}$ — чувствительность микрофона по давлению.

Уравнения (1) можно переписать в виде

$$\underline{Z}_{\text{e}}\,\underline{i} + \underline{M}_{\text{p}}\,\underline{Z}_{\text{a}}\,\underline{q} = \underline{U}; \qquad (1a)$$

$$\underline{M}_{\text{p}}\,\underline{Z}_{\text{a}}\,\underline{i} + \underline{Z}_{\text{a}}\,\underline{q} = \underline{p},$$

которые и являются уравнениями взаимности для микрофона.

Если звуковое давление распределено неравномерно по всей поверхности мембраны, что будет на высоких частотах при размещении микрофона в поле плоской бегущей волны, то положение акустической части определяют так же, как положение эквивалентного точечного преобразователя, имитирующего микрофон. В этом случае уравнение (1) будет также справедливо для реального микрофона при специальной интерпретации $\underline{p}$ (5.4 и 5.5).

5.3 Метод замещения напряжения

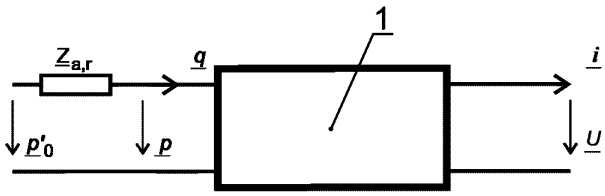
Метод замещения напряжения применяют для определения напряжения холостого хода электрически нагруженного микрофона.

Предполагают, что к микрофону с определенным напряжением холостого хода и внутренним импедансом подключен импеданс нагрузки. Для измерения напряжения холостого хода к микрофону последовательно подключают малый, по сравнению с импедансом нагрузки, импеданс, через который подают с генератора калибровочное напряжение известного значения.

Предполагают, что звуковое давление и калибровочное напряжение той же частоты подают попеременно. Калибровочное напряжение регулируют до тех пор, пока оно не даст такое же падение напряжения на импедансе нагрузки, что и при воздействии звукового давления на микрофон. В этом случае напряжение холостого хода будет равно по значению калибровочному напряжению.

5.4 Характеристики по свободному полю микрофона-приемника

Предполагают, что микрофон помещен в свободном поле плоской бегущей волны со звуковым давлением p_0. Эквивалентная схема такого микрофона дана на рисунке 1, где $\underline{p}_0'$ — звуковое давление при заторможенной мембране, $\underline{p}$ — действующее звуковое давление на акустическом входе микрофона, $\underline{Z}_{a,r}$ — акустический импеданс излучения микрофона.



1 — микрофон

Рисунок 1 — Эквивалентная схема микрофона-приемника в свободном поле

Допускают, что $\underline{p}_0'$ связано с $\underline{p}_0$ соотношением

$$\frac{\underline{p}_0'}{\underline{p}_0} = \underline{S}(f, \Theta),$$

где $\underline{S}(f, \Theta)$ — коэффициент дифракции, который зависит от частоты и угла падения волны, действующей на мембрану.

Значение $\underline{S}(f, \Theta)$ зависит от геометрической формы микрофона.

Поскольку $\underline{p} = \underline{p}_0' - \underline{Z}_{a,r}\,\underline{q}$, то систему из двух уравнений для микрофона (1а) можно представить в виде

$$\underline{U} = \underline{Z}_e\,\underline{i} + \underline{M}_p\,\underline{Z}_a\,\underline{q}; \qquad (2)$$

$$\underline{p}_0' = \underline{M}_p\,\underline{Z}_a\,\underline{i} + (\underline{Z}_a + \underline{Z}_{a,r})\,\underline{q},$$

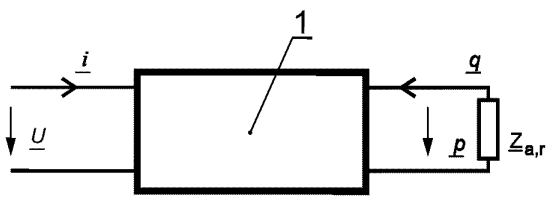
и, исходя из основного определения, можно получить для чувствительности микрофона по свободному полю уравнение

$$\underline{M}_f = \left[\frac{\underline{U}}{\underline{p}_0}\right]_{i=0} = \frac{\underline{M}_p\,\underline{Z}_a}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_{a,r}}\,\underline{S}(f, \Theta). \qquad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что чувствительность по давлению отличается от чувствительности по свободному полю, и это отличие определяется не только геометрической формой микрофона через коэффициент дифракции $\underline{S}(f, \Theta)$, но и отношением акустического импеданса микрофона к импедансу излучения.

5.5 Характеристики по свободному полю микрофона-излучателя

Предполагают, что микрофон работает как излучатель в условиях свободного поля. Эквивалентная схема такого микрофона дана на рисунке 2.



1 — микрофон

Рисунок 2 — Эквивалентная схема микрофона-излучателя в свободном звуковом поле

Поскольку $\underline{p} = -\underline{Z}_{a,r}\,\underline{q}$, то систему из двух уравнений для микрофона (1) можно записать в виде

$$\underline{U} = \underline{Z}_e\,\underline{i} + \underline{M}_p\,\underline{Z}_a\,\underline{q}; \qquad (4)$$

$$0 = \underline{M}_p\,\underline{Z}_a\,\underline{i} + (\underline{Z}_a + \underline{Z}_{a,r})\,\underline{q},$$

так что

$$-\underline{q} = \frac{\underline{M}_p\,\underline{Z}_a}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_{a,r}}\,\underline{i} = \frac{\underline{M}_f}{\underline{S}(f, \Theta)}\,\underline{i}.$$

Исходя из основного принципа взаимности, можно установить, что в удаленной точке эквивалентный точечный преобразователь будет действовать как точечный источник с производительностью $-\underline{q}\underline{S}(f, \Theta) = \underline{M}_f\,\underline{i}$, а звуковое давление $\underline{p}_0$ на расстоянии d от эквивалентного точечного источника будет

$$\underline{p}_0 = j\frac{\rho f}{2d}\,\underline{M}_f\,\underline{i}\,e^{-\gamma d}\,e^{j\omega t}, \qquad (5)$$

где $\gamma = \alpha + j\beta$ — комплексный коэффициент распространения.

Примечание — Вывод уравнения (5) основан на возможности представления микрофона в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами [см. уравнение (1)]. Более строгий вывод можно получить из интегральной формы уравнений, описывающих микрофон.

5.6 Метод взаимности

Предполагают, что два микрофона (1) и (2) с чувствительностями по свободному полю $\underline{M}_{f,1}$ и $\underline{M}_{f,2}$ расположены напротив друг друга в свободном поле, причем их главные оси совпадают. В условиях свободного поля ток $\underline{i}_1$, проходящий через электрические контакты микрофона (1), вызовет на расстоянии d от акустического центра микрофона давление $\underline{p}_0$, значение которого определяют по формуле (5). Если в звуковое поле поместить микрофон (2) и допустить, что взаимодействие между двумя микрофонами отсутствует, то напряжение холостого хода на выходе микрофона (2) будет

$$\underline{U}_2 = \underline{M}_{f,2}\,\underline{p}_0 = j\frac{\rho}{2d_{12}}\,\underline{M}_{f,1}\,\underline{M}_{f,2}\,\underline{i}_1\,e^{-\gamma d_{12}},$$

где d_{12} — расстояние между акустическими центрами микрофонов (1) и (2).

Отсюда, произведение чувствительностей микрофонов по свободному полю будет

$$\underline{M}_{f,1}\,\underline{M}_{f,2} = -j\frac{2d_{12}}{\rho f}\frac{\underline{U}_2}{\underline{i}_1}\,e^{\gamma d_{12}}. \qquad (6)$$

Примечание — Правая часть уравнения (6) представляет собой отношение электрического передаточного импеданса к акустическому передаточному импедансу на расстоянии их акустических центров в отсутствие микрофонов.

5.7 Окончательные уравнения для чувствительности микрофона по свободному полю

5.7.1 Метод с использованием трех микрофонов

Обозначают электрический передаточный импеданс $\underline{U}_2/\underline{i}_1$ (5.6) через $\underline{Z}_{e,12}$ и вводят аналогичные обозначения для других пар микрофонов. Окончательное уравнение для чувствительности по свободному полю микрофона (1) будет

$$\underline{M}_{f,1} = \left[\frac{2}{\rho f}\frac{d_{12}\,d_{31}}{d_{23}}\frac{\underline{Z}_{e,12}\,\underline{Z}_{e,31}}{\underline{Z}_{e,23}}\,e^{\gamma(d_{12}+d_{31}-d_{23})}\right]^{1/2}. \qquad (7)$$

Аналогичные уравнения применимы и для микрофонов (2) и (3).

Если необходимы только модули чувствительностей по свободному полю, то тогда определяют модули каждого электрического передаточного импеданса, используя α взамен γ. Фазовый угол чувствительности по свободному полю для каждого микрофона определяют по фазовым углам электрических передаточных импедансов и γ, учитывая физические условия для решения неоднозначности при фазе 180° в этом уравнении.

5.7.2 Метод с использованием двух микрофонов и вспомогательного источника звука

При использовании только двух микрофонов и вспомогательного источника звука окончательное уравнение для чувствительности по свободному полю будет

$$\underline{M}_{f,1} = \left[\frac{\underline{M}_{f,1}}{\underline{M}_{f,2}}\frac{2d_{12}}{\rho f}\,\underline{Z}_{e,12}\,e^{\gamma d_{12}}\right]^{1/2}, \qquad (8)$$

где отношение двух чувствительностей по свободному полю измерено методом сравнения с помощью вспомогательного источника (5.1.2).

Если необходимы только модули чувствительностей по свободному полю, то определяют модули каждого электрического передаточного импеданса, используя α взамен γ.

Фазовый угол чувствительности по свободному полю для каждого микрофона определяют по фазовым углам электрических передаточных импедансов, отношениям чувствительностей по свободному полю и комплексному коэффициенту распространения $\underline{\gamma}$, учитывая физические условия для решения неоднозначности при фазе 180° в этом уравнении.

6 Факторы, влияющие на чувствительность по свободному полю

6.1 Общие сведения

Чувствительность по свободному полю лабораторного эталонного микрофона зависит от напряжения поляризации и внешних условий. Более того, при определении чувствительности по свободному полю предполагают, что при измерениях должны быть выполнены некоторые требования. Необходим достаточно хороший контроль внешних условий при градуировке, с тем чтобы получить достаточно малые составляющие общей неопределенности.

6.2 Напряжение поляризации

Чувствительность лабораторного эталонного микрофона приблизительно пропорциональна напряжению поляризации, и поэтому в протоколе градуировки должно быть указано действительное значение напряжения поляризации. Рекомендованное МЭК 61094-1 напряжение поляризации равно 200,0 В.

6.3 Стандартная конструкция заземленного экрана

В соответствии с 3.3 МЭК 61094-1 напряжение холостого хода следует измерять на электрических контактах микрофона методом замещения напряжения, описанным в 5.3, при подключении к стандартной конструкции заземленного экрана. Требования к конструкции заземленного экрана для лабораторных эталонных микрофонов приведены в МЭК 61094-1.

Аналогичная конструкция заземленного экрана должна быть использована при градуировке как для микрофона-приемника, так и для микрофона-излучателя, а экран должен быть подключен к нулевому потенциалу.

При использовании другой конструкции результаты градуировки должны быть приведены к стандартной конструкции заземленного экрана. Если изготовитель указывает максимальное механическое усилие, которое можно прилагать к центральному электрическому контакту микрофона, то этот предел нельзя превышать.

6.4 Акустические условия

Чувствительность микрофона по свободному полю зависит от геометрической формы корпуса, в котором размещают предусилитель. По этой причине микрофон и конструкция заземленного экрана должны быть соединены с цилиндром, диаметр которого равен номинальному диаметру микрофона (МЭК 61094-1). Длина цилиндра должна быть больше диаметра микрофона. Минимальная длина цилиндра должна быть в 10 раз больше диаметра микрофона и иметь сужение на конце. Такая же конструкция должна быть использована и для микрофона-излучателя.

Чувствительность микрофона по свободному полю определяют для звукового давления в невозмущенной плоской бегущей волне.

В дальнем поле источника звука, находящегося в условиях свободного поля, существуют сферические волны, которые в ограниченном пространстве на достаточно большом расстоянии от источника приближенно можно рассматривать как плоские. Таким образом, расстояние между микрофоном-приемником и микрофоном-излучателем должно быть достаточно большим, чтобы гарантировать приближенно плоские волны в окрестности микрофона-приемника (7.4). С другой стороны, влияние отражений от внутренних поверхностей заглушенной (безэховой) камеры обычно возрастает с увеличением расстояния между двумя микрофонами. Кроме того, коэффициент дифракции $\underline{S}(f, \Theta)$ в уравнении (3) зависит от характера звукового поля и может быть точно определен только для плоской бегущей волны. Необходимо точно выбрать метрологические условия, и градуировку предпочтительно проводить для нескольких расстояний для того, чтобы выявить неопределенность градуировки в зависимости от этих условий.

6.5 Положение акустического центра микрофона

Положение акустического центра микрофона (см. 3.3) можно определить, измеряя звуковое давление, производимое микрофоном-излучателем в свободном поле, в зависимости от расстояния r от произвольно выбранной опорной точки микрофона. В ограниченной области дальнего поля звуковое давление, скорректированное на затухание звука в воздухе, будет подчиняться закону $1/r$, где r — расстояние от акустического центра микрофона. Следовательно, если на график нанести значения, обратно пропорциональные значению измеренного звукового давления в зависимости от расстоя-

ния от произвольно выбранной точки микрофона (наиболее удобно от центра мембраны), то можно определить прямую (например, методом наименьших квадратов) или провести прямую через построенные точки. Точка пересечения этой прямой с осью абсцисс определяет положение акустического центра по отношению к опорной точке. Значения акустических центров при определении d_{12} (5.7) должны соответствовать ориентации и местоположению акустических центров при градуировке по свободному полю.

Типовые данные о положении акустического центра некоторых микрофонов приведены в приложении А.

6.6 Зависимость от внешних условий

6.6.1 Общие сведения

Зависимость чувствительности по давлению от внешних условий дана в 6.5 МЭК 61094-2. В дополнение к этому, чувствительность по свободному полю, как будет показано ниже, зависит от внешних условий через соотношение, данное в уравнении (3). В этом уравнении импеданс излучения зависит от плотности воздуха и от скорости звука. Аналогично, коэффициент дифракции $\underline{S}(f, \Theta)$ зависит от длины волны и от скорости звука в воздухе.

6.6.2 Статическое давление

Дополнительно к зависимости, описанной в 6.5 МЭК 61094-2, существует зависимость от соотношения между акустическим импедансом микрофона и его импедансом излучения из-за изменения плотности воздуха, обусловленного изменением статического давления. Зависимость чувствительности по свободному полю лабораторных эталонных микрофонов от статического давления приведена в приложении В.

6.6.3 Температура микрофона

Дополнительно к зависимости, описанной в 6.5 МЭК 61094-2, существует зависимость от соотношения между акустическим импедансом микрофона и его импедансом излучения из-за изменения плотности и скорости звука в воздухе, обусловленного изменением температуры. Кроме того, слабая зависимость вызывается коэффициентом дифракции $\underline{S}(f, \Theta)$ в уравнении (3) из-за изменения скорости звука в воздухе при изменении температуры. Зависимость чувствительности по свободному полю лабораторных эталонных микрофонов от температуры приведена в приложении В.

Примечание — Если микрофон подвергнуть большим изменениям температуры, то это может привести к изменению его чувствительности.

6.6.4 Влажность

Хотя термодинамическое состояние воздуха, заключенного в полости за мембраной микрофона, слегка зависит от влажности, но ее влияние на чувствительность по давлению лабораторных эталонных микрофонов в отсутствие конденсации не прослеживается.

В соответствии с уравнением (3) влияние влажности на плотность и скорость звука в воздухе может привести к незначительному изменению чувствительности по свободному полю.

Примечание — Поверхностное сопротивление изоляции материала между неподвижным электродом и корпусом микрофона может ухудшиться под влиянием большой влажности, особенно если материал загрязнен (см. также 7.5). Поверхностное сопротивление оказывает заметное влияние на чувствительность микрофона на низких частотах, особенно на фазовую чувствительность.

6.6.5 Атмосферные условия

При сообщении результатов градуировки чувствительность по свободному полю должна быть приведена к опорным внешним условиям, если имеются достоверные поправочные данные.

Условия, при которых проводили градуировку, должны быть внесены в протокол.

Примечание — При градуировке температура микрофона может отличаться от температуры окружающего воздуха.

7 Составляющие неопределенности градуировки

7.1 Общие сведения

В дополнение к факторам, влияющим на чувствительность по свободному полю и упомянутым в разделе 6, ниже указаны составляющие общей неопределенности [1], такие как неопределенность метода, приборная неопределенность и тщательность проведения градуировки. Факторы, известным

образом влияющие на результаты градуировки, должны быть измерены или рассчитаны с максимально возможной точностью, для того чтобы уменьшить их влияние на общую неопределенность.

7.2 Электрический передаточный импеданс

Для измерения электрического передаточного импеданса с необходимой точностью имеются различные методы, но ни одному из них нельзя отдать предпочтение. Напряжение питания, используемое для микрофона-излучателя, должно быть таким, чтобы влияние гармоник на неопределенность в измерении чувствительности по свободному полю было мало по сравнению со случайной неопределенностью измерений. Шумы или другие помехи (такие как перекрестные помехи) акустического или другого происхождения не должны чрезмерно влиять на чувствительность по свободному полю. Для улучшения отношения сигнал/шум можно использовать полосовые фильтры.

Наличие электрических перекрестных помех приводит к появлению заметных отклонений от закона $1/r$, имеющих периодичность с длиной волны.

7.3 Затухание звука в воздухе

В практических условиях звуковые волны, распространяющиеся в свободном поле, будут затухать из-за эффектов молекулярной релаксации и тепловых потерь. Это затухание зависит от частоты звука, содержания водяных паров и температуры воздуха. Оно учитывается реальной частью α (коэффициент затухания) комплексного коэффициента распространения γ в уравнении (5).

Значения коэффициента затухания звука в воздухе, выраженные в неперах на метр, должны быть рассчитаны из уравнений, указанных в приложении Б.

7.4 Отклонение от идеальных условий свободного поля

Во время проведения градуировки должны быть выполнены определенные акустические требования (6.4). Градуировку следует проводить в свободном поле. Это условие наиболее часто достигается в безэховой камере (далее — камера), где отсутствует ветер, а шумы воздушного происхождения минимальны. Из-за несовершенства звукопоглощающего материала, которым облицованы стены, и конечных размеров камеры существуют зависящие от частоты отражения от стен, которые приводят к отклонениям модуля звукового давления от закона $1/r$. Значение отклонения зависит от направления звука и расстояния от источника звука. Для заданной частоты эти отклонения в зависимости от расстояния будут носить периодический характер в пределах от половины до полной длины волны, в соответствии с изменением направления падения отраженной волны (от параллельного до перпендикулярного) по отношению к прямой волне.

Обычно наименьшие отклонения достигаются вблизи центра камеры и для направления, которое оказывается ни параллельным, ни перпендикулярным к любой из стен камеры. Однако наличие в камере скоб, решеток, кабелей, различного рода подставок и т.п. также вызывает искажение звукового поля.

Влияние этих нежелательных отражений можно свести к приемлемому только благодаря большой тщательности при установке системы микрофонов для градуировки и проведении процедуры градуировки.

Рекомендуется, чтобы во время градуировки отклонения от закона обратно пропорциональной зависимости давления от расстояния (исключая затухание звука в воздухе) не превышали 0,05 дБ в области между источником звука и микрофоном-приемником, если соответствующие поправки нельзя ввести.

Кроме того, необходимые условия поля плоской волны в окрестности микрофона-приемника могут быть обеспечены, если расстояние между двумя микрофонами во время градуировки будет не менее чем в 10 раз превышать номинальный диаметр микрофонов.

7.5 Напряжение поляризации

При определении напряжения поляризации необходимо принять меры для его измерения непосредственно на контактах микрофона. Это особенно важно, если напряжение поляризации подается от высокоимпедансного источника, поскольку микрофон имеет конечное сопротивление изоляции. С другой стороны, имеются обоснованные способы измерения напряжения поляризации в удалении от микрофона на низкоомном выходе источника напряжения, если достоверно известно, что сопротивление изоляции микрофона достаточно высоко.

7.6 Физические величины

Основные физические величины, описывающие свойства воздуха, входят в выражения для расчета чувствительностей микрофонов или влияют на зависимость чувствительности от внешних условий. Эти величины зависят от внешних условий, например от статического давления, температуры и влажности. Значения величин и их зависимости от внешних условий даны в приложении МЭК 61094-2.

7.7 Неопределенность чувствительности по свободному полю

Определение уровня чувствительности по свободному полю при градуировке методом взаимности при контролируемых условиях оценивают с неопределенностью менее чем 0,2 дБ в диапазонах частот от 1 до 20 кГц и от 2 до 20 кГц для лабораторных эталонных микрофонов типов LS1P и LS2P, соответственно, при коэффициенте охвата, равном 2.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

Данные о положении акустического центра микрофона

А.1 Исходя из определения, положение акустического центра микрофона зависит от ориентации, частоты и расстояния точки наблюдения от преобразователя. Для достаточно удаленных точек наблюдения влияние положения акустического центра на неопределенность градуировки уменьшается. На таких расстояниях за акустический центр можно принять центр мембраны микрофона. Однако для расстояний от 150 до 600 мм, обычно используемых при градуировке микрофонов методом взаимности, могут быть приняты значения, указанные на рисунке А.1 и в таблице А.1. Данные о положении акустического центра в зависимости от частоты приведены по отношению к поверхности мембраны на главной оси для микрофонов типов LS1P и LS2P. Положительный знак указывает на то, что акустический центр находится перед мембраной.

Погрешность определения значений, данных в таблице А.1 и на рисунке А.1, оценена менее чем в 2 мм для частот ниже резонансной частоты микрофона. Для микрофонов типа LSF такие данные в настоящее время отсутствуют.

Таблица А.1 — Приближенные значения для положения акустического центра микрофонов типов LS1P и LS2P в зависимости от частоты относительно мембраны при нормальном падении звуковой волны

Таблица А.1 Расстояние в миллиметрах

Частота, кГц	LS1P	LS2P	Частота, кГц	LS1P	LS2P
0,63	9,0	—	4,0	5,7	3,9
0,8	8,9	—	5,0	5,0	3,6
1,0	8,7	5,0	6,3	4,2	3,2
1,25	8,4	4,9	8,0	3,3	2,8
1,6	8,0	4,8	10,0	2,2	2,3
2,0	7,5	4,7	12,5	0,9	1,8
2,5	7,0	4,4	16,0	—0,4	1,2
3,15	6,4	4,2	20,0	—1,9	0,5

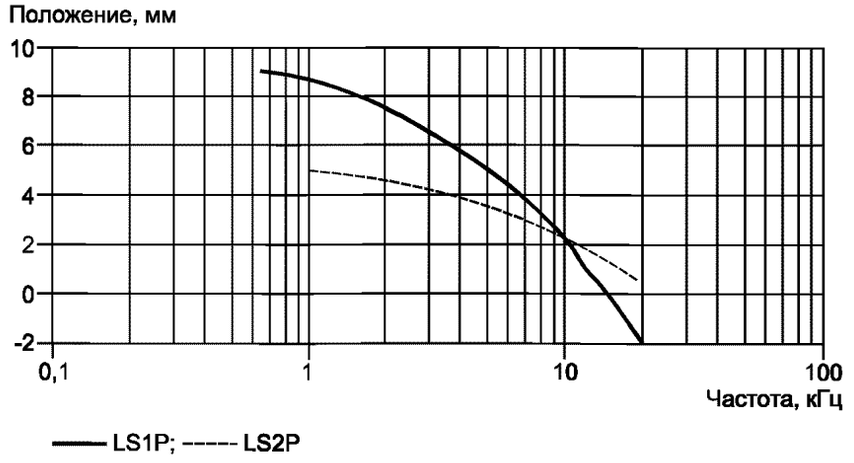


Рисунок А.1 — Приближенные значения для положения акустического центра микрофонов типов LS1P и LS2P в зависимости от частоты (см. таблицу А.1) относительно мембраны при нормальном падении звуковой волны

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(справочное)

Данные о коэффициентах затухания звука в воздухе

Б.1 Методы расчета коэффициентов затухания в воздухе даны в ИСО 9613-1. В настоящем приложении описана физика этого явления и приведены формулы для расчета коэффициента затухания в зависимости от частоты, температуры, статического давления и влажности. Методика расчета, описанная ниже, соответствует требованиям ИСО 9613-1.

Обозначения:

T_{20} = 293,15 К — опорная термодинамическая температура, К;
T_{01} = 273,15 К — термодинамическая температура тройной точки воды, К;
T — абсолютная температура, К;
p_s — статическое давление, кПа;
p_m — давление насыщенных паров, кПа;
H — относительная влажность, %;
h — фракционная молярная концентрация водяных паров;
f_{rO} — частота релаксации кислорода, Гц;
f_{rN} — частота релаксации азота, Гц.

Методика расчета:

Шаг 1: Определяют давление насыщенных паров, используя формулу

$$p_m/p_{s,\,r} = 10^D, \text{ где } D = 4{,}6151 - 6{,}8346\,(T_{01}/T)^{1{,}261}.$$

Шаг 2: Определяют молярную концентрацию водяных паров:

$$h = (H/100)(\,p_m/p_{s,\,r})(\,p_{s,\,r}/p_s).$$

Шаг 3: Определяют частоты релаксации:

$$f_{rO} = (p_s/p_{s,\,r})[24 + 4{,}04\cdot10^6 h(0{,}2 + 10^3 h/3{,}91 + 10^3 h)],$$

$$f_{rN} = (p_s/p_{s,\,r})(T/T_{20})^{-1/2}\{9 + 28\cdot10^3 h \exp[-4{,}170((T/T_{20})^{-1/3} - 1)]\}.$$

Шаг 4: Определяют коэффициент затухания в воздухе α в неперах на метр (Нп/м):

$$\alpha = f^2\{18{,}4\cdot10^{-12}(p_s/p_{s,\,r})^{-1}(T/T_{20})^{1/2} + (T/T_{20})^{-5/2}[0{,}01275\exp(-2239{,}1/T)/(f_{rO} + (f^2/f_{rO})) +$$
$$+ 0{,}1068\exp(-3352{,}0/T)/(f_{rN} + (f^2/f_{rN}))]\}.$$

Погрешность расчета коэффициента затухания в воздухе составляет ± 10 % для следующих внешних условий:

Температура воздуха от минус 20 °С до плюс 50 °С.

Статическое давление менее 200 кПа.

Молярная концентрация водяных паров от $0{,}5\cdot10^{-3}$ до $50\cdot10^{-3}$.

Отношение частота/давление от 0,4 Гц/кПа до 10^4 Гц/кПа.

Значения затухания звукового давления в воздухе, рассчитанные согласно ИСО 9613-1, для внешних условий, рекомендуемых для лабораторий при проведении градуировки по свободному полю методом взаимности, приведены в таблице Б.1. Значения, приведенные в таблице Б.1, равны 8,686 α и выражены в децибелах на метр (дБ/м).

Таблица Б.1 — Затухание звукового давления в воздухе

в дБ/м

f, кГц	t = 21 °С; p_s = 101,325 кПа			t = 23 °С; p_s = 101,325 кПа			t = 25 °С; p_s = 101,325 кПа		
	H = 25 %	H = 50 %	H = 80 %	H = 25 %	H = 50 %	H = 80 %	H = 25 %	H = 50 %	H = 80 %
1,0	0,0054	0,0048	0,0054	0,0054	0,0052	0,0059	0,0054	0,0057	0,0063
1,25	0,0075	0,0059	0,0063	0,0072	0,0062	0,0069	0,0070	0,0067	0,0076
1,6	0,0111	0,0075	0,0077	0,0104	0,0078	0,0083	0,0099	0,0082	0,0091
2,0	0,0162	0,0099	0,0093	0,0149	0,0099	0,0099	0,0140	0,0102	0,0107
2,5	0,0240	0,0134	0,0116	0,0220	0,0132	0,0121	0,0203	0,0132	0,0129
3,15	0,0365	0,0192	0,0153	0,0332	0,0184	0,0155	0,0304	0,0180	0,0161
4,0	0,0565	0,0287	0,0212	0,0514	0,0271	0,0210	0,0469	0,0259	0,0212
5,0	0,0846	0,0426	0,0299	0,0773	0,0397	0,0291	0,0706	0,0374	0,0287
6,3	0,1267	0,0649	0,0441	0,1170	0,0601	0,0421	0,1076	0,0561	0,0407
8,0	0,1882	0,1010	0,0673	0,1767	0,0933	0,0635	0,1645	0,0866	0,0605
10,0	0,2643	0,1527	0,1013	0,2539	0,1411	0,0949	0,2405	0,1308	0,0896
12,5	0,3578	0,2292	0,1535	0,3537	0,2131	0,1434	0,3429	0,1980	0,1347
16,0	0,4771	0,3541	0,2435	0,4885	0,3327	0,2275	0,4889	0,3115	0,2132
20,0	0,5929	0,5139	0,3682	0,6266	0,4901	0,3452	0,6468	0,4641	0,3240
25,0	0,7123	0,7256	0,5514	0,7737	0,7061	0,5207	0,8224	0,6794	0,4910
31,5	0,8421	1,0019	0,8244	0,9332	0,9998	0,7876	1,0166	0,9828	0,7491
40,0	0,9947	1,3445	1,2191	1,1136	1,3795	1,1847	1,2326	1,3915	1,1419
50,0	1,1758	1,7135	1,7083	1,3157	1,8007	1,6930	1,4636	1,8612	1,6594

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(справочное)

Влияние окружающей среды на чувствительность микрофона

Настоящее приложение дает информацию о влиянии статического давления и температуры на чувствительность по полю микрофонов типов LS1P и LS2P. Для микрофонов типа LSF в настоящее время такие данные отсутствуют. Исчерпывающие сведения о влиянии внешних условий на чувствительность микрофонов по давлению даны в приложении МЭК 61094-2. Кроме того, импеданс излучения и дифракция звука, вызванная микрофоном, также зависят от внешних условий.

Конструктивные особенности микрофона определяют относительное влияние внешних условий. Считают, что скорость звука, плотность и вязкость воздуха пропорциональны температуре и (или) статическому давлению. Далее рассмотрены усредненные температурные коэффициенты и коэффициенты статического давления микрофонов, которые определены как отношение чувствительности по свободному полю при опорных условиях к чувствительности по свободному полю при заданном значении статического давления или температуры, соответственно. Примеры относятся к чувствительности по свободному полю при распространении звука вдоль главной оси к внешней стороне мембраны микрофона.

В.1 Зависимость от статического давления

Графики для коэффициентов статического давления чувствительности микрофонов по давлению приведены в МЭК 61094-2. Дополнительное влияние, вызванное импедансом излучения, слегка видоизменит этот график, но усредненный коэффициент статического давления, соответствующий чувствительности по свободному полю, обычно зависит от частоты так, как показано на рисунке В.1. В общем случае коэффициент статического давления зависит от конструктивных особенностей микрофона и его фактические значения могут существенно различаться для двух однотипных микрофонов разных производителей. Поэтому коэффициенты статического давления (рисунок В.1) не следует применять к конкретным микрофонам.

Значение коэффициента статического давления в диапазоне низких частот обычно лежит между минус 0,01 и минус 0,02 дБ/кПа для микрофонов типа LS1P, и между минус 0,003 и минус 0,008 дБ/кПа для микрофонов типа LS2P.

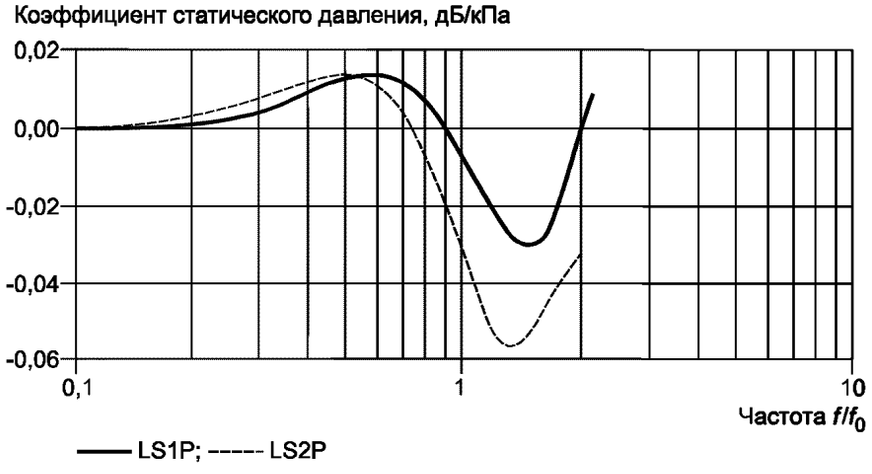


Рисунок В.1 — Зависимости коэффициента статического давления чувствительности по свободному полю микрофонов типов LS1P и LS2P от безразмерной частоты f/f_0, где f_0 — резонансная частота микрофона

В.2 Зависимость от температуры

Графики температурных коэффициентов чувствительности микрофонов по давлению приведены в МЭК 61094-2. Дополнительное влияние, вызванное изменением температуры окружающего воздуха, немного изменит этот график, но усредненный температурный коэффициент, соответствующий чувствительности по свободному полю, обычно зависит от частоты так, как показано на рисунке В.2.

Изменение температуры оказывает воздействие не только на скорость звука, т.е. на длину волны, но также и на коэффициент дифракции $\underline{S}(f, \Theta)$ [см. уравнение (3)]. Это воздействие зависит от угла падения звука и может быть значительным на высоких частотах при определенных углах падения и при минимальной чувствительности.

Кроме воздействия на заключенный в замкнутых полостях воздух, изменения температуры воздействуют на механические детали микрофона.

Изменение температуры приводит, в основном, к изменению в натяжении мембраны и, таким образом, к постоянному изменению чувствительности в диапазоне, контролируемом гибкостью, и к небольшому изменению резонансной частоты.

В общем случае температурный коэффициент зависит от конструкции деталей микрофона и его фактические значения могут существенно различаться для двух однотипных микрофонов разных производителей. Поэтому данные о температурном коэффициенте C_t, приведенные на рисунке В.2, не следует применять к конкретным микрофонам.

Значение температурного коэффициента в диапазоне низких частот обычно находится в пределах ± 0,005 дБ/К для микрофонов типов LS1P и LS2P.

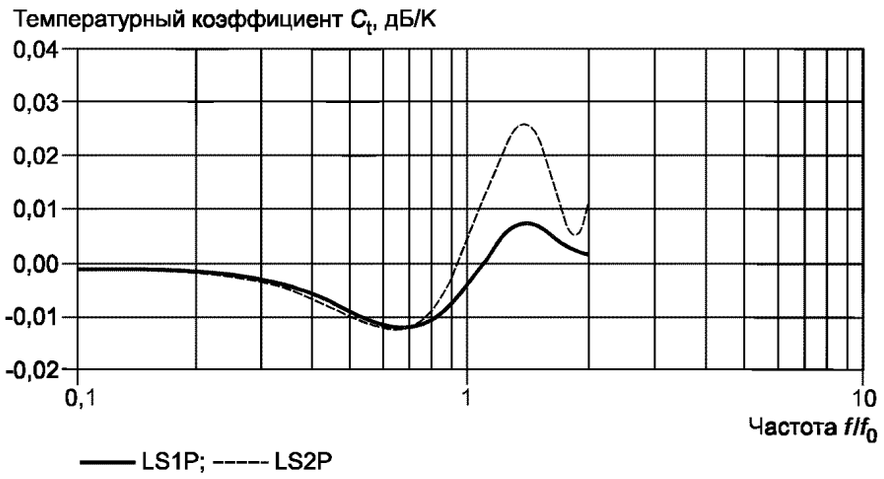


Рисунок В.2 — Типичная форма зависимости составляющей части C_t температурного коэффициента чувствительности по свободному полю от безразмерной частоты f/f_0 (f_0 — резонансная частота микрофона), вызванной изменениями импеданса воздуха в замкнутых полостях и около микрофона, для микрофонов типов LS1P и LS2P

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(справочное)

Библиография

[1] МИ 2552—99 Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений»

УДК 534.612.2.018:083.74:006.354 ОКС 17.020 33.160.50 Т88.9 ОКСТУ 0008

Ключевые слова: эталонные микрофоны, метод взаимности, акустический импеданс

Редактор *Л.В. Афанасенко*
Технический редактор *О.Н. Власова*
Корректор *В.И. Варенцова*
Компьютерная верстка *О.В. Арсеевой*

Изд. лиц. № 02354 от 14.07.2000. Сдано в набор 30.08.2001. Подписано в печать 17.10.2001. Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 1,60.
Тираж 239 экз. С 2353. Зак. 980.

ИПК Издательство стандартов, 107076, Москва, Колодезный пер., 14.
gost.e-ecolog.ru e-mail: gost.e-ecolog.ru
Набрано в Издательстве на ПЭВМ
Филиал ИПК Издательство стандартов — тип. «Московский печатник», 103062, Москва, Лялин пер., 6.
Плр № 080102

gost.e-ecolog.ru