

Акустическая метрология

Часть 6

Акустические измерения стереотелефонов

И.А. Алдошина

Завершая серию статей по акустической метрологии (перед началом новой серии «Акустическая аппаратура для систем озвучения»), нельзя не рассмотреть методы измерений основных параметров стереотелефонов. Во-первых, потому, что стереотелефоны широко используются во всех системах звукозаписи, звуковоспроизведения, звукоусиления и озвучения; во-вторых, в современных каталогах на стереотелефоны указываются весьма странные параметры, требующие специального разъяснения, например в каталоге на стереотелефон DT990 фирмы Beuerdynamic указывается частотный диапазон 5 Гц – 35 кГц. Учитывая, что лучшие контрольные агрегаты объемом 200 – 400 дм³ воспроизводят диапазон 30 – 40 Гц (да и то с большим спадом АЧХ), не ясно, как может стереотелефон с очень маленьким излучателем воспроизводить диапазон 5 Гц. Весь секрет заключен в методах измерений, именно они и будут рассмотрены в данной статье.

В соответствии с международными стандартами IEC 268-7, 581-10, 268-13 телефоном называется «электроакустический преобразователь, с помощью которого электрические сигналы преобразуются в акустические колебания, предназначенный для работы в условиях акустической связи с ухом», т.е. принципиальным отличием телефона от громкоговорителя является то, что он не пригоден для излучения звука в открытую окружающую среду, а может использоваться только при нагрузке на слуховой аппарат (рис. 1). Это существенно меняет методы его проектирования, а также методы измерения и оценки его параметров.

Главным телефоном называется «один или два телефона на оголовье», *стереофоническим* – «двухканальный головной телефон, предназначенный для индивидуального прослушивания стереофонических записей».

Головные стереофонические телефоны широко применяются в настоящее время в различных областях техники: студийной звукозаписи, при контроле звуковых программ в кино, на телевидении, радиовещании и

Примечание. Начало см. «Install Pro», 2001, №5 (13), №6 (14), 2002, №1 (15), №2 (16), №3 (17)

концертно-театральных представлениях, в системах домашнего и профессионального звуковоспроизведения, в различных служебных системах связи и оповещения.

За последние годы в технике проектирования и методах оценки качества стереотелефонов произошли существенные изменения благодаря внедрению новых технологий и применению цифровых адаптивных процессоров для передачи пространственного звукового образа, «выноса» стереообраза из головы и др.

Разработкой и производством современных стереотелефонов занимаются в настоящее время такие крупнейшие фирмы, как Koss, AKG, Sennheiser, Sony, Neumann, Shure и многие другие.

На рис. 2 показан внешний вид современного стереотелефона K-240 фирмы AKG. Стереотелефон состоит из двух телефонов, каждый из которых включает в себя преобразователь, заключенный в пластмассовый корпус, амбушюр, оголовье, кабель и соединитель. Преобразователь (излучатель) является основной частью акустико-механической системы телефона, включающей в себя корпус и амбушюр. *Корпус* предназначен для защиты преобразователя телефона от повреждений, обеспечения необходимой акустической нагрузки на него и для закрепления оголовья (при его наличии).

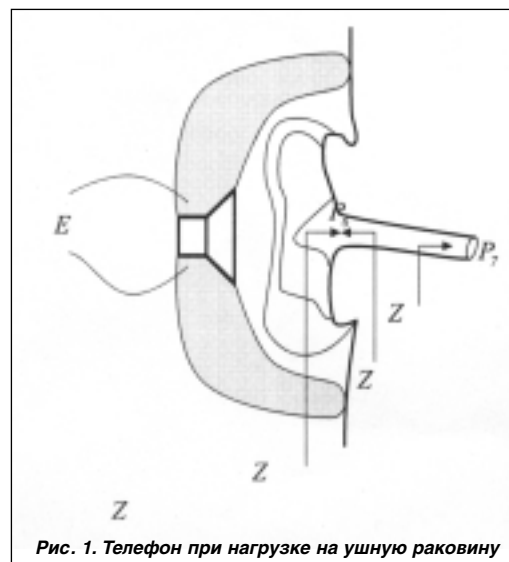


Рис. 1. Телефон при нагрузке на ушную раковину



Рис. 2. Стереотелефон K-240 фирмы AKG

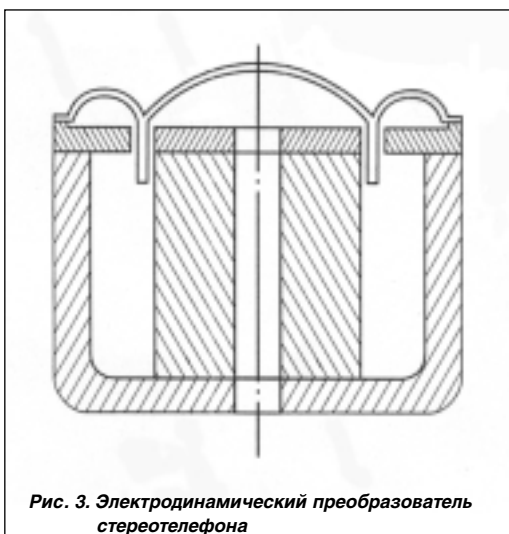


Рис. 3. Электродинамический преобразователь стереотелефона

Амбушюром называется деталь телефона, обеспечивающая акустическую связь телефона с ухом, которая представляет собой кольцевую прокладку из упругого материала. Оголовье предназначено для соединения двух телефонов и закрепления их на голове слушателя.

Классификация стереотелефонов может быть выполнена по различным признакам: по принципам преобразования электрической энергии в акустическую в используемых в них излучателях; по видам акустической нагрузки; по областям применения; по способам передачи к ним сигнала; по видам процессорной обработки и др.

По принципам преобразования применяемые в современных телефонах излучатели могут быть разделены на следующие типы: электродинамические, электростатические и пьезоэлектрические. В свою очередь, электродинамические преобразователи делятся на две группы: катушечные, цилиндрическая катушка которых находится в воздушном зазоре магнитной системы, и орто- и изодинамические.

Катушечные преобразователи имеются двух видов: с миниатюрной магнитной системой и легкой подвижной системой; на основе обычных головок громкоговорителей. Схематический поперечный разрез электро-

динамического катушечного преобразователя с легкой подвижной системой показан на рис. 3. Более детально о принципах устройства различных типов стереотелефонов постараемся рассказать в дальнейшем.

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

Открытыми называются телефоны, электроакустический преобразователь которых сообщается с открытым пространством как со стороны уха, так и с обратной стороны. Эта связь с передней стороны обеспечивается пористым амбушюром, а сзади – отверстиями в магнитопроводе и корпусе телефона (рис. 4).

По областям применения конструкции современных стереотелефонов имеют значительные различия. Из них можно выделить высококачественные студийные стереотелефоны для контроля качества записи; «ушные» мониторы, в которых закрытый преобразователь непосредственно вкладывается в ушной канал со специальной заглушкой, такие мониторы работают с радиоприемником в диапазоне частот 450 – 900 МГц, который имеет специальную систему регулировок, необходимую для контроля качества записей. Стереотелефоны для работы с телевизионными приемниками отличаются от остальных телефонов длиной соединительного шнура (не менее 5 м) или использованием инфракрасных приемников, применением встроенных регуляторов громкости и баланса. Имеются специальные конструкции стереотелефонов, совмещенные с микрофоном (типа «оголовье»), в частности для работы с компьютером, а также миниатюрные стереотелефоны для плееров и др.

По способам передачи к ним сигнала стереотелефоны могут быть разделены на проводные и беспроводные. Все стереотелефоны до последнего времени относились только к группе проводных. За последние годы появилось два типа беспроводных стереотелефонов: инфракрасные (IR) – wireless и радиотелефоны RF (cordless).

По видам процессорной обработки стереотелефоны представляют собой такой вид аппаратуры, где процессорная обработка звука нашла наиболее широкое применение; воссоздание пространственной панорамы звука и «вынос» звукового образа из головы; уменьшение уровня шумов с использованием активного шумоподавления; увеличение субъективного ощущения низких частот и др.

Приведенных выше кратких сведений о классификации стереотелефонов достаточно для того, чтобы перейти к описанию их методов измерений. Надеемся, что в серии статей, посвященных акустической аппаратуре для озвучения, будет возможность рассказать о стереотелефонах более подробно.

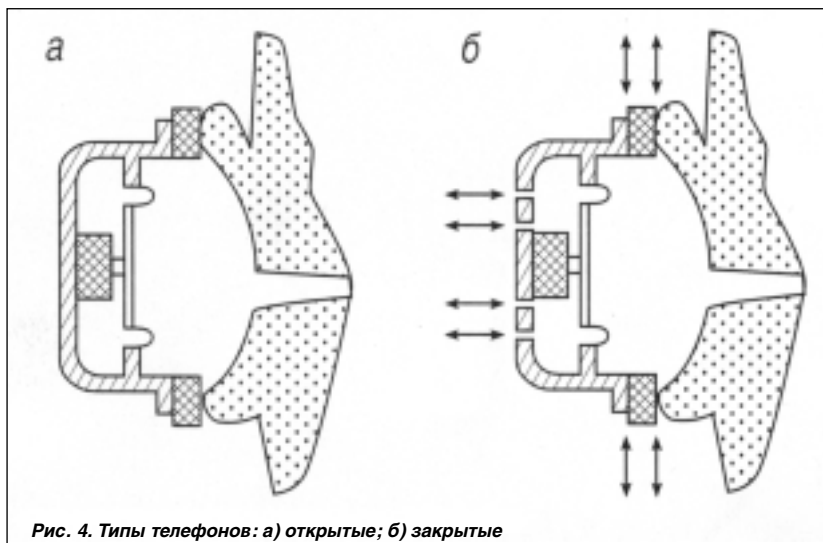


Рис. 4. Типы телефонов: а) открытые; б) закрытые



Рис. 5. Зонд в слуховом канале



Рис. 6. «Искусственная голова»

Методы измерения основных параметров

Минимальные требования к электроакустическим параметрам стереотелефонов, методам их измерения и оценке качества звучания изложены в международных документах МЭК(IEC) – Standart 268-7 part 7; 581-4 part 10; 268-4 part 13; DIN-45619 p.1,2; ITU-Recommendations of the CCIR no.708.Vol.X, part 1, Geneva, 1990.

Качество воспроизведения звуковых программ через стереотелефоны зависит от уровня вносимых ими линейных и нелинейных искажений, так же как и других электроакустических преобразователей.

Соответственно, так же как и у других излучателей (громкоговорителей, звуковых колонок и др.), основным критерием линейных искажений является форма амплитудно-частотной характеристики звукового давления. Специфика состоит в том, что под амплитудно-частотной характеристикой звукового давления в данном случае понимается зависимость от частоты уровня звукового давления, развиваемого телефоном либо на входе слухового канала, либо на барабанной перепонке, при подведении к телефону напряжения постоянного значе-

ния синусоидальной формы или полосового шума. Под уровнем звукового давления понимается 20 десятичных логарифмов отношения модуля звукового давления к давлению $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Учитывая особенности работы стереотелефонов, измерения АЧХ производятся либо с помощью зонда, помещенного в слуховой канал слушателя (рис. 5); либо на «искусственной голове» (рис. 6); либо методом сравнения громкости в свободном звуковом поле сигналов от громкоговорителя и стереотелефона, надетого на уши слушателя; либо с помощью измерений на специальном устройстве, называемом «Искусственное ухо» (ИУ).

Начнем с последнего метода: конструкция и параметры измерительного устройства «Искусственное ухо», соответствующие требованиям международных стандартов, показаны на рис. 7. «Искусственное ухо» представляет собой камеру, состоящую из трех полостей, соединенных между собой через узкие щели и отверстия. Объемы полостей соответственно равны: $V_1 = 2,5 \text{ см}^3$, $V_2 = 1,8 \text{ см}^3$, $V_3 = 7,5 \text{ см}^3$. В «Искусственное ухо» входит измерительный конденсаторный микрофон (приемник звукового давления). Модуль полного входного сопротивления ИУ в диапазоне частот 50 – 10000 Гц соответствует модулю входного сопротивления среднего человеческого уха. В зависимости от типа стереотелефона (охватывающие, прижимные или вкладные) они по-разному устанавливаются на «Искусственное ухо». Звуковое давление, развиваемое телефоном в камере ИУ, преобразуется микрофоном в напряжение, которое усиливается микрофонным усилителем и регистрируется на самописце. Запись производится в логарифмическом масштабе при постоянстве напряжения на входе телефона. Запись АЧХ стереотелефонов можно производить также при подведении шумового сигнала или специального частотно-модулированного сигнала.

Конструкция и акустические свойства установки «Искусственное ухо», несмотря на удобство ее использования при серийном производстве телефонов, лишь приблизительно соответствуют реальным условиям размещения стереотелефонов на голове, поэтому корреляция между измеренными таким образом параметрами и субъективной оценкой качества телефонов относительно невелика.

Поэтому в целом ряде международных стандартов IEC 581-10, DIN 45500 p. 1,2 и др. предложены методы определения амплитудно-частотных характеристик стереотелефонов путем сравнения громкости сигналов от громкоговорителей и стереотелефонов в свободном звуковом поле. Сравнение громкости производится в специально оборудованной заглушенной камере (см. «Install Pro», 2002, №3, с. 83, рис. 2). Схема измерения амплитудно-частотной характеристики телефонов в свободном поле методом сравнения громкостей приведена на рис. 8. В рабочую точку, расположенную на расстоянии 2 м от рабочей плоскости громкоговорителя по его рабочей оси, устанавливают измерительный микрофон и градуируют громкоговоритель при подведении к нему испытательного сигнала, т. е. записывают величины напряжения, при которых громкоговоритель в точке установки микрофона обеспечивает на всех частотах уровень давления 70 дБ.

Затем в свободном поле (заглушенной камере) размещают эксперта так, чтобы геометрический центр его головы совпадал с рабочей точкой. Эксперт поочередно прослушивает сигнал от громкоговорителя и от телефона. На громкоговоритель на каждой частоте (полосе частот) подают напряжение, которое должно обеспечивать уровень звукового давления в рабочей точке 70 дБ. На телефоне эксперт устанавливает значение напряжения, чтобы различие уровней громкости, полученных воздействием звукового давления от громкоговорителя и от телефона, было минимальным. В диапазоне частот 20 – 630 Гц используется синусоидальный сигнал, а в диапазоне частот 630 – 20 000 Гц – третьоктавные полосы розового шума. Эксперт прослушивает цикл тестов-сигналов в следующей последовательности: частоту испытательного сигнала увеличивают от 630 до 20 000 Гц, далее уменьшают от 20 000 до 20 Гц, затем сигнал увеличивают от 20 до 630 Гц. Экспертизу проводят с участием восьми экспертов.

За результат измерений принимают чувствительность телефона по свободному полю: $M = p/U_{cp}$, где p – звуковое давление, создаваемое измерительным громкоговорителем на расстоянии 2 м, Па; U_{cp} – величина напряжения, подводимого к телефону, равная среднеарифметическому по показаниям восьми экспертов, В.

Кроме прямого метода сравнения громкости, используется еще *метод замещения*, в котором вместо громкоговорителя применяется головной телефон, заранее отградуированный по свободному полю. Методика измерения аналогична методике прямого измерения. К эталонному телефону подводят напряжения, величины которых были установлены при сравнении последнего с громкоговорителем в свободном поле. Эксперт, попеременно надевая эталонные и испытуемые телефоны, добивается равенства громкостей обоих телефонов, регулируя подведение напряжения к испытуемому телефону.

Наконец, наиболее точные измерения амплитудно-частотной характеристики стереотелефонов могут выполняться с помощью *зонда, установленного в слуховом канале*. Измерения могут производиться как в свободном, так и в диффузном поле, т.е. в реверберирующей (сильно отражающей) камере (по свободному полю: DIN 45619 1,2-1975; IEC Standart 268-7 part 7, по диффузному полю DIN 45619 ч.3, /ITU/Recommendations of the CCIR no.708. Vol.X, part 1, Geneva, 1990).

При этом зонд, т.е. измерительный микрофон с насадкой, представляющей собой тонкую трубку, плотно примыкающую к приемной части микрофона, помещается у входа в слуховой канал испытуемого, между амбушуром телефона и выемкой ушной раковины (см. рис. 5).

Измерение АЧХ телефонов в диффузном поле, так же как и в свободном, может производиться двумя методами. Прямой метод основан на сравнении звуковых давлений, создаваемых в слуховом канале эталонным звуковым полем и головным телефоном (рис. 9). Косвенный метод использует вместо звукового поля громкоговорителя эталонный головной телефон, калиброванный по прямому методу, при котором измерения производятся сравнением уровней напряжения на выходе зонда, введенного в слуховой канал испытуемого, при попеременном измерении сигналов от головного телефона и

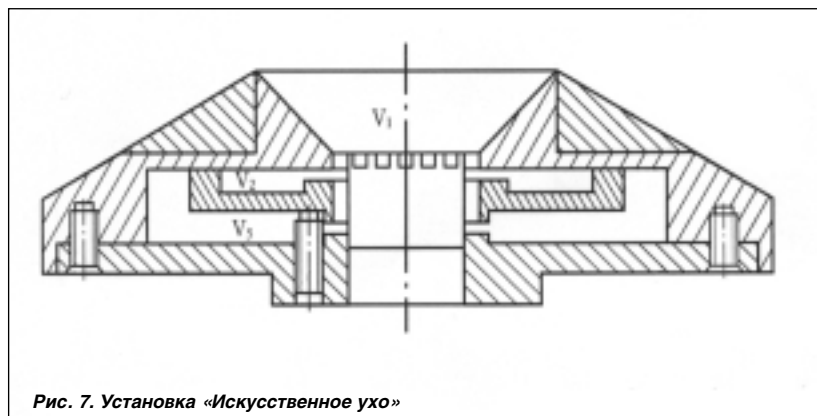


Рис. 7. Установка «Искусственное ухо»

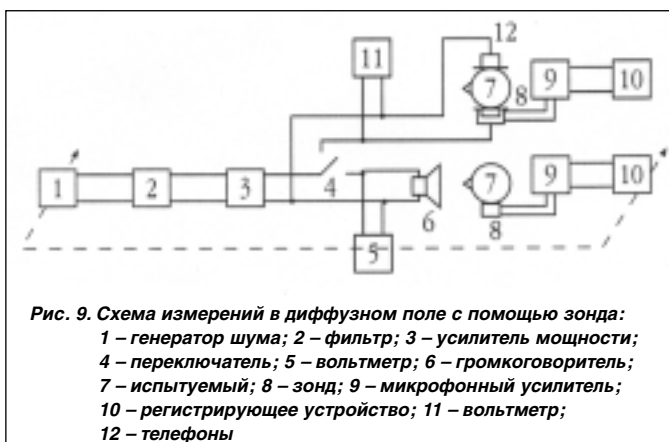
громкоговорителя. Обычно используются сигналы розового шума в третьоктавных полосах. Измерения звукового давления в слуховом канале должны выполняться не менее чем на восьми испытуемых. Перед началом измерений зонд вводится в слуховой канал испытуемого. Точка измерения в слуховом канале должна находиться не менее чем на 4 мм в глубине канала. На испытуемого воздействует шумовой сигнал, излучаемый громкоговорителем, при этом измеряется напряжение на выходе зонда. После этого испытуемый надевает головные телефоны, и измеряется напряжение на выходе зонда, затем измерения повторяются. Величины напряжений первого и второго измерений усредняются, и по этим данным вычисляется АЧХ телефона по диффузному и свободному полю. Эти методы измерений чрезвычайно трудоемки, но дают достаточно точное значение амплитудно-частотной характеристики телефонов при их реальных условиях работы, т.е. при тесном контакте с ушной раковиной и слуховым каналом.

Кроме линейных искажений, стереотелефоны обладают и нелинейными искажениями, характеризующимися появлением новых спектральных составляющих, искажающих временную структуру подводимого сигнала. Нелинейные искажения обычно оцениваются полным (суммарным) коэффициентом гармонических искажений, равным корню квадратному из суммы квадратов коэффициентов гармонических искажений всех заданных порядков. Измерения производят по методу, аналогичному для громкоговорителей (см. «Install Pro», 2001, №6, с. 64) в диапазоне 100 – 3000 Гц на частотах 100,



Рис. 8. Схема измерений методом сравнения громкостей в свободном поле:

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



200, 400, 800, 1600 и 3000 Гц при звуковом давлении 94 и 100 дБ на установке «Искусственное ухо». Напряжение на выходе ИУ измеряется с помощью селективного вольтметра или анализатора спектра. Коэффициент гармоник на частоте nf вычисляются по формуле:

$K_{Гн} = p_{nf}/p_i$, где p_{nf} – звуковое давление с частотой nf , Па; p_i – звуковое давление, развиваемое в ИУ при подаче сигнала с частотой f_i , Па. Полный суммарный коэффициент гармонических искажений определяется как: $K_{Г} = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$.

Для согласования телефонов со звуковоспроизводящей аппаратурой изготовитель задает значение номинального сопротивления или модуля полного электрического сопротивления. Последний равен модулю комплексной величины отношения напряжения на выходе телефона к результирующему току. Измерение модуля полного электрического сопротивления может производиться также методами, аналогичными для громкоговорителей (см. наши предыдущие статьи) или в режиме постоянства тока, или в режиме постоянства напряжения.

Кроме измерения объективных параметров, экспертной оценке подвергаются основные потребительские параметры телефонов – качество звучания и комфортность при эксплуатации. Методика проведения экспертиз регламентируется международным документом МЭК (публикация 268, часть 13) и отечественным стандартом ОСТ 4.202.003. Экспертиза оценки качества звучания телефонов проводится методом парного сравнения с эталонным образцом по семибальной шкале. Итоговая оценка вычисляется по формуле:

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m L_{ij}$$



где $i = 1, 2, 3...$ – номер эксперта; $j = 1, 2, 3...$ – номер фрагмента; L_{ij} – оценка, вынесенная i -м экспертом на j -ом фрагменте.

Заключительная оценка выносится в соответствии с полученными усредненными оценками: если диапазон оценок $(-3 - -0,5)$, то качество звучания имеет оценку «хуже» по сравнению с эталоном; если $(-0,5 - +0,5)$ – равноценно; если $(-0,5 - +3)$ – лучше.

Кроме того, все стереофонические телефоны, предназначенные для индивидуального прослушивания стереофонических программ от бытовой звуковоспроизводящей аппаратуры, должны удовлетворять таким же требованиям по надежности и климатомеханической устойчивости, как у всей этой аппаратуры. Требования по надежности изложены в ГОСТ 21317-87. Виды климатомеханических испытаний и нормы даны в ГОСТ 11473-88.

Основные технические характеристики

Требования к параметрам стереотелефонов зависят от области их применения, например, если стереотелефоны используются для снятия аудиограмм, их частотная характеристика должна быть максимально плоской. Если они используются для передачи обычных коммерческих музыкальных программ (или контроля качества записей), предназначенных для передачи через стереосистемы громкоговорителей, то они должны обеспечивать такое же качество звучания, как и громкоговорители в помещении прослушивания. Эти требования накладывают очень жесткие ограничения на частотную характеристику стереотелефонов, принципиально отличающиеся от требований на АЧХ громкоговорителей. Как уже было отмечено выше, для снятия частотных характеристик используются или субъективные методы (оценка по громкости), или запись с помощью зонда. Однако для установления того, какими же должны быть допустимые нормы на частотный диапазон и неравномерность АЧХ, до настоящего времени использовались лишь субъективные методы.

Попытки разработать объективные критерии для оценки параметров стереотелефонов были предприняты только в последнее время, в частности большой объем работ был выполнен в Aalborg University (Дания). При прослушивании через стереотелефоны звуковой сигнал имеет принципиальные отличия от сигнала при прослушивании через акустические системы (АС): во-первых, значительно различаются такие параметры, как АЧХ, КНИ, ХН и др., в акустических системах, предназначенных для воспроизведения высококачественных программ, и в малогабаритных излучателях в стереотелефонах; во-вторых, при прослушивании через АС звуковой сигнал проходит обработку в помещении прослушивания (рис. 10), которая зависит от его акустических характеристик (времени реверберации, структуры отражений и др.), и подвергается дополнительной фильтрации на голове, ушных раковинах и т.д. Вся эта обработка, а также перекрестные сигналы, поступившие от противоположных АС, при прослушивании через стереотелефоны отсутствуют, поэтому параметры сигналов, поступивших в слуховой канал через АС и через стереотелефоны, должны сильно отличаться, соответственно

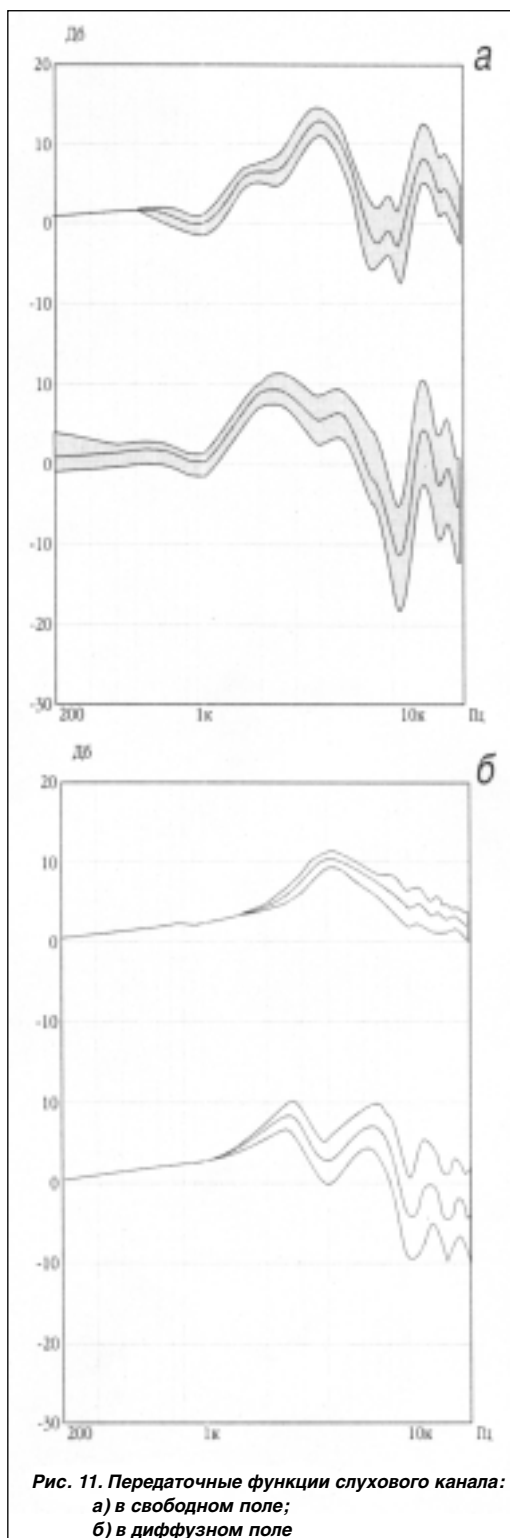


Рис. 11. Передаточные функции слухового канала:
а) в свободном поле;
б) в диффузном поле

должен отличаться и тембр звучания. Для разработки методов объективной сравнительной оценки формы АЧХ стереотелефонов, требуемых для создания качества звучания, аналогичного звучанию этих же сигналов через громкоговорители, была принята такая гипотеза: звуковое давление у барабанной перепонки, создаваемое стереотелефоном и акустическими системами, должно быть одинаковым на всех частотах, т.е. требует-

ся, чтобы совпадала форма АЧХ, измеренная у барабанной перепонки при наличии стереотелефонов и без них. Это условие может быть записано как:

$P_{\text{тел}}/E_{\text{тел}} = P_{\text{АС}}/E_{\text{АС}}$, где $P_{\text{тел}}$ – звуковое давление у барабанной перепонки при наличии стереотелефонов; $P_{\text{АС}}$ – звуковое давление при прослушивании через АС; $E_{\text{тел}}$, $E_{\text{АС}}$ – напряжение на входе соответственно телефонов и акустических систем. Таким образом, метод измерений предполагает определение передаточной функции стереотелефона ($P_{\text{тел}}/E_{\text{тел}}$) и сравнение ее с передаточной функцией акустических систем ($P_{\text{АС}}/E_{\text{АС}}$).

Измерения передаточных функций по свободному полю при воспроизведении через АС (громкоговорители) были выполнены в заглушенной камере, где были установлены восемь громкоговорителей, расположенных на расстоянии 2 м по поверхности сферы. Измерения выполнялись на 40 испытуемых при поступлении сигнала по 97 направлениям. Полученные усредненные характеристики звукового давления по свободному полю, измеренные на открытом ушном канале (у барабанной перепонки) и на закрытом (на входе в канал), показаны на рис. 11, а. Аналогичные кривые, измеренные в диффузном поле, приведены на рис. 11, б. На кривых показаны коридоры, учитывающие индивидуальные разбросы у разных испытуемых. Метод измерений заключается в том, чтобы сравнить измеренные АЧХ стереотелефонов на искусственной голове (или на ушах испытуемых) с типовой средней кривой (жирная линия). Пример для 14 стереотелефонов, калиброванных по диффузному полю (рис. 12), показывает, что несмотря на то что у этих стереотелефонов была откалибрована АЧХ методом субъективного сравнения по громкости в диффузном поле, разброс очень большой и характеристики некоторых телефонов весьма далеки от реальной типовой кривой (кривые были выровнены по уровням на частоте 600 Гц). Поскольку в настоящее время проведено достаточно много измерений передаточных функций головы и типовые кривые для свободного и диффузного поля определены с достаточно большой точностью, измерения параметров стереотелефонов вышеуказанным методом являются достаточно точными и стабильными и, несомненно, будут внесены в ближайший период в стандарты.

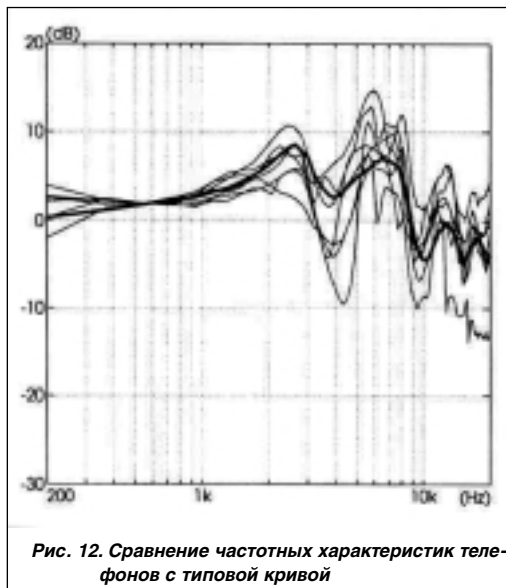
Таким образом, стереотелефоны не должны иметь плоскую форму АЧХ в отличие от громкоговорителей. Их форма АЧХ должна совпадать с той, которую создают громкоговорители в ушном канале при прослушивании в определенном помещении. Поэтому АЧХ телефонов сравниваются с определенными эталонными кривыми и имеют неравномерность до 20 – 22 дБ. Кроме того, поскольку телефоны работают на закрытый объем ушной раковины и слухового канала, в них могут быть измерены очень низкие частоты (от 5 – 10 Гц), естественно, если бы их измеряли просто микрофоном в свободном поле, излучаемые частоты начинались бы примерно с 150 – 200 Гц.

В каталогах на стереотелефоны обычно задаются следующие параметры:

- чувствительность (Sensitivity) – уровень звукового давления, развиваемого телефоном при 1 мВт входной

Семинар

s e m i n a r



мощности. В современных телефонах она находится в пределах 90 – 105 дБ/мВт;

- *суммарный коэффициент гармоник* (harmonic distortion) (при уровне звукового давления 94 дБ) –

обычно составляет 1%, однако имеются конструкции, где он достигает 0,2%;

- *максимальная шумовая* (паспортная) входная мощность (Max. input power) – в современных стереотелефонах находится в пределах 100 – 1000 мВт;
- *модуль полного электрического сопротивления* (Rated impedance) на частоте 500 Гц находится обычно в пределах 100 – 600 Ом.

В качестве примера можно привести технические характеристики высококачественного динамического стереотелефона фирмы AKG K 501:

чувствительность – 94 дБ/мВт; диапазон частот – 16 Гц – 30 кГц; максимальная входная мощность – 200 мВт; номинальный импеданс – 120 Ом.

Таким образом, методика измерения стереотелефонов является самой сложной и трудоемкой из всех видов электроакустической аппаратуры, однако учитывая требования, которые предъявляются в настоящее время к качеству звучания стереотелефонов, особенно при студийной звукозаписи, можно считать усилия на развитие современной метрологии для стереотелефонов вполне оправданными.