

Часть 11

Громкость, ч.1

Ирина Алдошина

Как уже было отмечено в предыдущих статьях по психоакустике, звуковой сигнал (музыка, речь, шум и др.), поступающий на вход слуховых каналов, вызывает у слушателя определенные субъективные ощущения, основными из которых являются высота звука, громкость, тембр, пространственность и др. Каждое из этих ощущений сложным и неоднозначным образом связано с объективными параметрами звукового сигнала: интенсивностью, длительностью, спектральным составом, локализацией в пространстве и др. Установление этих связей и определение количественных соотношений между ними и есть одна из основных задач психоакустики.

Человеческий слух обладает удивительной способностью реагировать на слуховые сигналы как очень малой интенсивности (звуковое давление 2×10^{-5} Па - уровень 0 дБ), так и очень большой интенсивности (звуковое давление 20 Па - уровень 120 дБ), это соответствует динамическому диапазону 120 дБ.

Громкостью называется субъективное ощущение, позволяющее слуховой системе располагать звуки по определенной шкале от звуков низкой интенсивности ("тихие" звуки) к звукам большой интенсивности ("громкие" звуки).

Громкость связана прежде всего с таким физическим параметром звукового сигнала как его интенсивность (т.е. звуковая энергия). Интенсивность I и звуковое давление p связаны простым (для плоской волны) соотношением $I = p^2 / \rho c$, где ρ - плотность воздуха, c - скорость звука.

Общеизвестно, что чем больший уровень звукового давления (дБ) создает акустическая аппаратура, тем она громче звучит. Однако все далеко не так просто - можно создать звуковые сигналы очень большой интенсивности, и при этом никакого ощущения громкости не вызвать. И это при том, что слуховая система может быть даже повреждена - например, в случае, если эти сигналы будут слишком короткими (менее 35 мс) или слишком низкочастотными (ниже 100 Гц).

Происходит это потому, что громкость зависит не только от интенсивности звука, но и от его частоты, спектрального состава, длительности, локализации в пространстве и др.

Громкость звука - это субъективная величина, она характеризует ощущение слушателя, поэтому громкость не может быть измерена прямыми методами. Возможно, в ближайшем будущем это можно будет сделать на компьютерных моделях слуховой системы, которые сейчас усиленно развиваются.

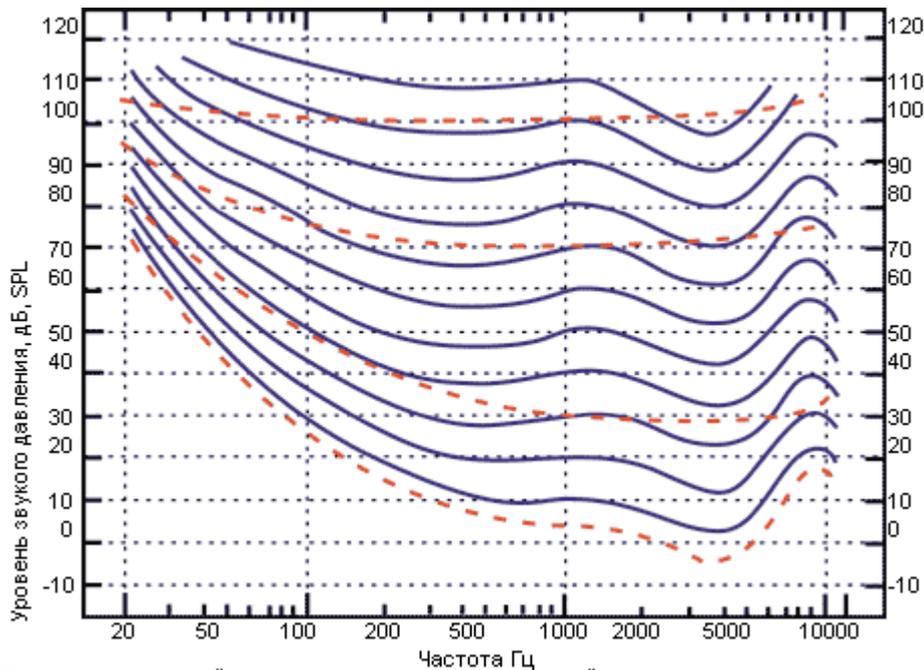


Рис 1 Кривые равной громкости для различных значений уровня сигнала

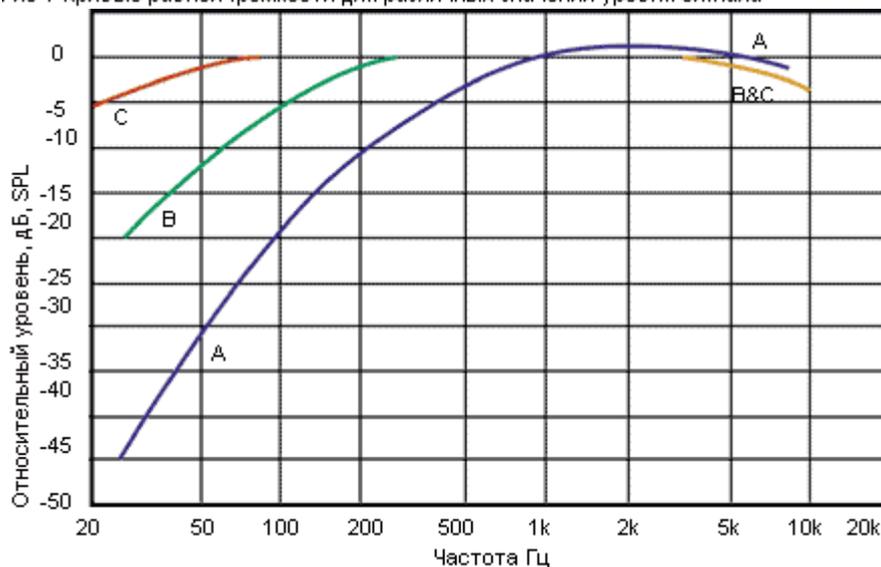


Рис 2 Взвешенные кривые А,В,С для измерения уровней шума

Понимание механизмов ощущения громкости и ее зависимости от основных объективных параметров звукового сигнала имеет чрезвычайно важное значение для практики работы звукорежиссеров - так, например, если запись музыкального произведения и его прослушивание происходит на разных уровнях интенсивности, то ощущение баланса громкости и, следовательно, тембра звучания будет совершенно разным у звукорежиссера и у слушателя, что следует учитывать при записи и при воспроизведении.

Шкалирование звуков по громкости и установление влияния на него основных параметров сигнала было выполнено, прежде всего, для тональных сигналов различной интенсивности, частоты и длительности, что послужило основой для оценки громкости сложных музыкальных, речевых и шумовых сигналов.

Поскольку техника оценки абсолютной громкости и ее связей с интенсивностью, частотой и длительностью звуковых сигналов достаточно сложна, то широкое распространение получили методы относительной оценки уровней громкости.

Уровни громкости определяются с помощью экспериментов.

В настоящее время оценки ощущения громкости при изменении различных параметров звукового сигнала получают методом субъективных экспертиз: либо сравнением с эталонным звуком, либо абсолютной оценкой. Процессы эти очень трудоемки, требуют проведения большого количества экспериментов, накопления статистических данных. Исследования процессов ощущения громкости все время продолжают в ведущих научных институтах, как отечественных так и зарубежных. Постоянно появляются публикации об уточнении известных соотношений и о новых результатах. Наиболее известные ученые, труды которых используются в этом направлении - Бекеш, Стивенс, Цвиккер, Гельфанд, Мур.

Понимание механизмов ощущения громкости и ее зависимости от основных

Выставляется уровень звукового давления эталонного звука на частоте 1000 Гц (например, 40 дБ), затем испытуемому предлагается прослушать сигнал на другой частоте (например, 100 Гц), и отрегулировать его уровень таким образом, чтобы он казался равногромким эталонному. Сигналы могут предъявляться через телефоны или через громкоговорители. Если проделать это для разных частот, и отложить полученные значения уровня звукового давления, которые требуются для сигналов разной частоты, чтобы они были равногромкими с эталонным сигналом - получится одна из кривых на рис. 1.

Например, чтобы звук с частотой 100 Гц казался таким же громким, как звук с частотой 1000 Гц с уровнем 40 дБ, его уровень должен быть выше, около 50 дБ. Если будет подан звук с частотой 50 Гц, то, чтобы сделать его равногромким с эталонным, нужно поднять его уровень до 65 дБ и т.п. Если теперь увеличить уровень эталонного звука до 60 дБ и повторить все эксперименты, то получится кривая равной громкости, соответствующая уровню 60 дБ...

Семейство таких кривых для различных уровней 0, 10, 20...110дБ показано на рис. 1. Эти кривые называются кривыми равной громкости. Они были получены учеными Флетчером и Мэнсоном в результате обработки данных большого числа экспериментов, проведенных ими среди нескольких сотен посетителей Всемирной выставки 1931 года в Нью-Йорке.

В настоящее время в международном стандарте ISO 226 (1987 г.) приняты уточненные данные измерений, полученные в 1956году. Именно данные из стандарта ISO и представлены на рис.1, при этом измерения выполнялись в условиях свободного поля, то есть в заглушенной камере, источник звука располагался фронтально и звук подавался через громкоговорители. Сейчас накоплены новые результаты, и предполагается в ближайшем будущем уточнение этих данных. Каждая из представленных кривых называется изофоной и характеризует уровень громкости звуков разной частоты.

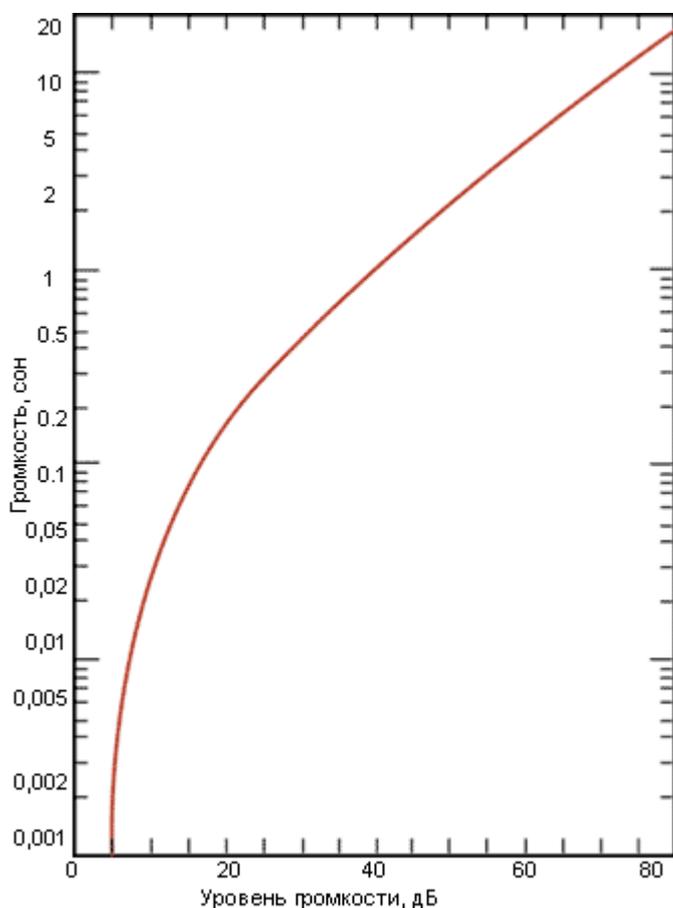


Рис 3 Связь между громкостью и уровнем громкости

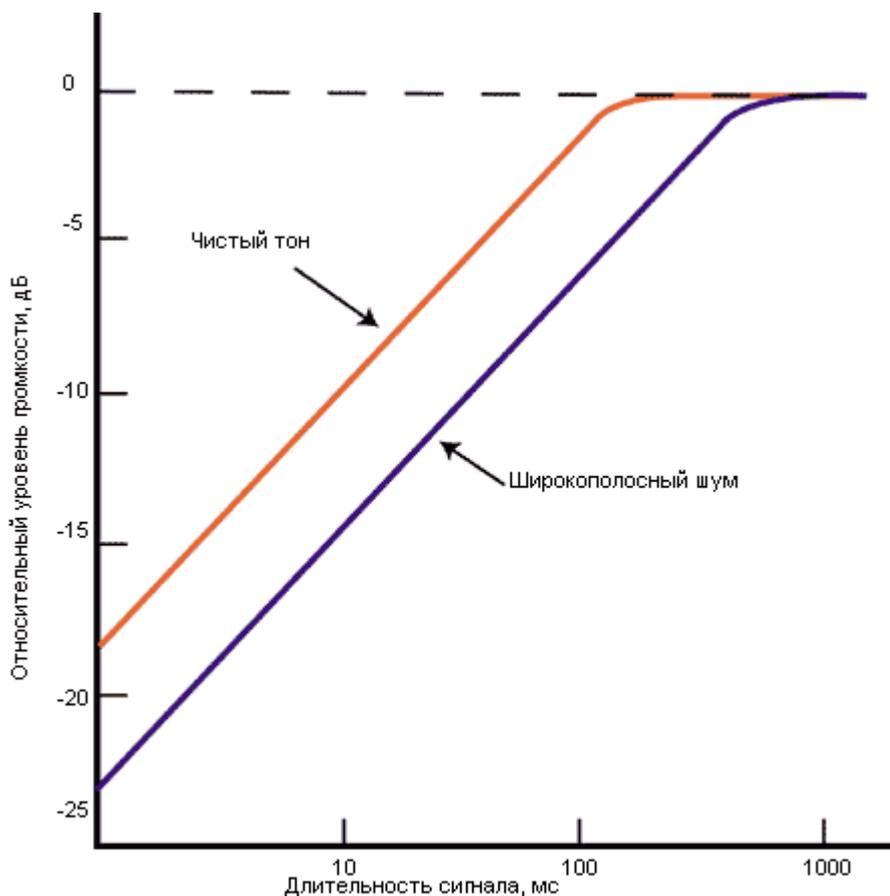


Рис 4 Возрастаение уровня громкости при увеличении длительности сигнала

Под уровнем громкости данного звука понимается уровень звукового давления равногромкого с данным эталонного звука на частоте 1000 Гц. Уровень громкости измеряется в специальных единицах - фонах.

Цифры, которые стоят над кривыми на рисунке 1, соответствуют числу фон, которые равны числу децибел звука с частотой 1000 Гц. Зная частоту данного сигнала и его уровень звукового давления, можно, пользуясь представленными кривыми, определить его уровень громкости в фонах.

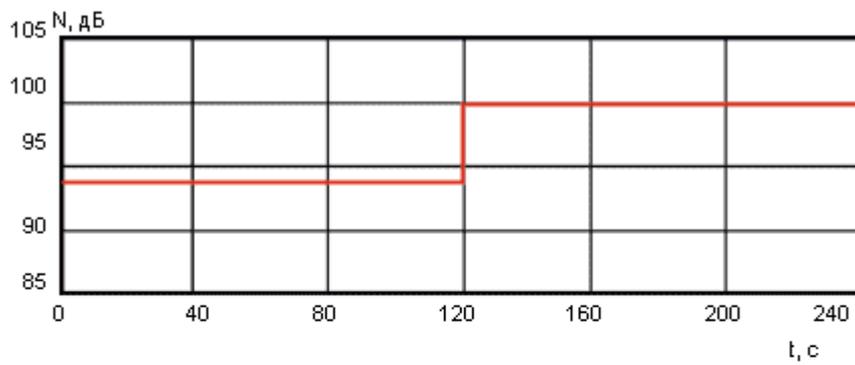
Например, если тональный звук с частотой 100 Гц имеет уровень звукового давления 60 дБ, то, проведя прямые,

соответствующие этим значениям на рис. 1, находим на их пересечении изофону, соответствующую уровню 50 фон, - значит, этот звук имеет уровень громкости 50 фон.

Если проанализировать эти кривые, то видно, что при малых уровнях звукового давления оценка уровня громкости очень сильно зависит от частоты - слух менее чувствителен к низким и высоким частотам, и требуется создать гораздо большие уровни звукового давления, чтобы звук стал звучать равногромко с эталонным звуком 1000 Гц. При больших уровнях изофоны выравниваются, подъем на низких частотах становится менее крутым - происходит более быстрое нарастание громкости звуков низкой частоты, чем средних и высоких. Таким образом, при больших уровнях низкие, средние и высокие звуки оцениваются по уровню громкости более равномерно.

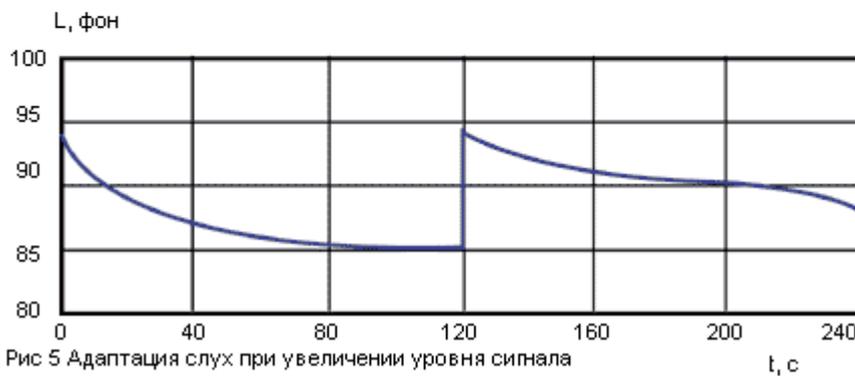
Это свойство слуха имеет огромное значение для техники звукозаписи, т.к. относительная громкость звуков разной частоты изменяется при изменении общего уровня записи, но только в том случае, если запись воспроизводится на том же уровне, что и оригинальный источник. Тогда в ней сохраняется естественный баланс по громкости. Если же запись воспроизводится на более низких уровнях, низкие и высокие частоты как бы пропадают, баланс нарушается. Это одна из причин того, почему пение и речь кажутся бубнящими при воспроизведении на высоких уровнях через громкоговорители: слушатель воспринимает в них низкие частоты значительно более громкими, чем при прослушивании естественного источника на более "тихих" уровнях.

Это свойство слуховой системы - по-разному оценивать уровень громкости сигнала в зависимости от его частоты и уровня звукового давления - учитывается в современных приборах для измерения уровней шума и других сложных звуков. В них применяются взвешенные корректирующие кривые, аналогичные кривым "слуховых" фильтров, которые ослабляют низкие частоты в зависимости от уровня сигнала так, как это делает слуховая



система.

Обычно используются три вида взвешенных кривых (рис.2):
 - кривая А со спадом -30 дБ на уровне 50 Гц по отношению к уровню на 1000 Гц;
 - кривая В со спадом -12 дБ;
 - кривая С со спадом -2 дБ.



Если эти кривые перевернуть "сверху вниз" (зеркально по горизонтальной оси), и нанести на изофоны (пунктирные линии на рисунке 1), то видно, что кривая А примерно соответствует изофоне 30 фон. Таким образом, проводя измерения с использованием

Рис 5 Адаптация слух при увеличении уровня сигнала

этой кривой (значения уровня сигнала выдаются в дБА) мы как бы оцениваем уровень громкости этого сигнала так, как это делает слуховая система на слабых уровнях (30 дБ на 1000 Гц), кривая В (значения в дБВ) соответствует изофоне 70 дБ, кривая С - изофоне 100 дБ (дБС).

Разумеется, использование таких приборов позволяет оценить уровень громкости только очень приблизительно, т.к. при оценке громкости сложных сигналов слуховая система использует более сложные механизмы, о которых поговорим дальше.

Оценка уровня громкости не эквивалентна оценке изменения абсолютной громкости.

Например, если имеется два сигнала с уровнями громкости 40 и 80 фон, то это не значит, что один громче другого в два раза. Связь уровня громкости с абсолютной оценкой громкости носит достаточно сложный характер.

Наряду с созданием методов сравнительной оценки уровня громкости, постоянно продолжают попытки построения шкалы для оценки абсолютного ощущения громкости в зависимости от интенсивности, частоты, длительности и других объективных параметров сигнала. Задача эта намного сложнее, чем предыдущая - достаточно сравнить методы оценки качества звучания методом парного сравнения (для этого в качестве экспертов можно привлекать широкий круг слушателей) и оценку качества звучания по абсолютной шкале - это доступно только экспертам с большим музыкальным опытом, например, музыкантам и звукорежиссерам.

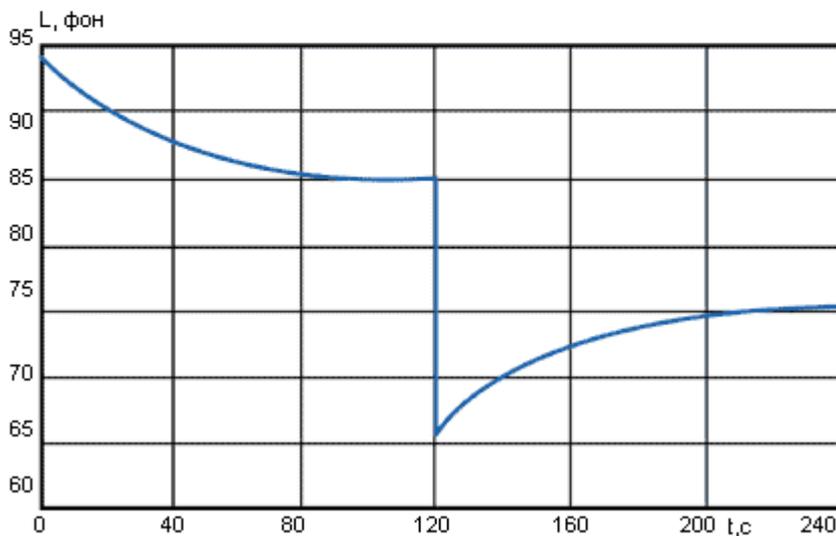
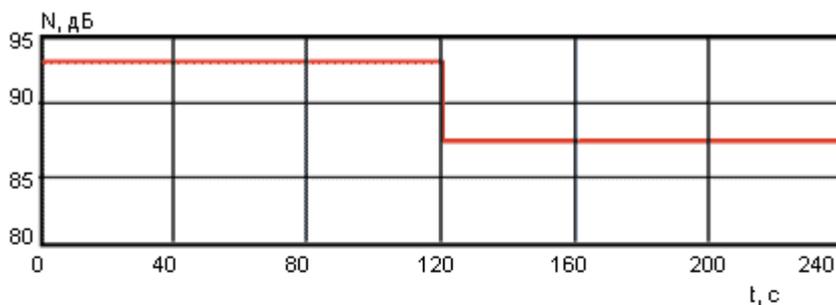


Рис 6 Адаптация слуха при уменьшении уровня сигнала

Обычно для решения такого рода задач (в наиболее известных работах Стивенса) использовались два метода.

Первый: испытуемым предъявлялись звуки разной интенсивности, и их просили присвоить численно оценить (в баллах) каждый звук в зависимости от воспринимаемой громкости.

Второй метод: подавался эталонный звук, и испытуемых просили оценить громкость измеряемого звука относительно заданного, например, в два раза, в три раза и т.д. Обработка большого количества статистических данных позволила построить графики зависимости ощущаемой громкости от

уровня звукового давления. Для количественной оценки абсолютной громкости была принята специальная единица сон. Громкость в 1 сон - это громкость синусоидального звука с частотой 1000 Гц и уровнем 40 дБ.

Количественно зависимость воспринимаемой громкости звука (в сонах) и его звукового давления (в Па) может быть представлена в следующем виде:

$S = C \times p^{0,6}$, где C - постоянная, зависящая от частоты сигнала.

Из этого соотношения следует, что зависимость является нелинейной, что подтверждает общий закон психофизики о том, что зависимость между изменением объективных параметров сигнала и возникающими при этом субъективными ощущениями носит нелинейный логарифмический характер. Из этого соотношения получается также, что при увеличении уровня звукового давления на 10 дБ громкость возрастает в два раза. Например, если на частоте 1000 Гц сигнал с уровнем 40 дБ создает ощущение громкости в 1 сон, то сигнал с уровнем 50 дБ соответствует громкости в 2 сона, 60 дБ - 3 сона и т. д.

Правда, в некоторых исследованиях установлено, что удвоение громкости вызывается увеличением уровня сигнала только на 6 дБ - особенно для низких частот.

Аналогично связи между значением звукового давления в Па и его уровнем в дБ, между абсолютным значением громкости в сонах S и значением уровня громкости в фонах L существует связь (в стандартах ISO): $S = 2^{L-40/10}$.

Графическая зависимость громкости в сонах от уровня громкости в фонах для частоты 1000 Гц показана на рисунке 3. Эта зависимость построена для измерений, выполненных в свободном поле при прослушивании через громкоговорители. Полученные количественные соотношения очень важны для определения громкости сложных звуков, которые будут рассмотрены дальше.

Результаты шкалирования абсолютных значений громкости сильно зависят от ряда факторов: индивидуальных слуховых различий, порядка предъявления стимулов, тренированности и концентрации внимания экспертов. Поэтому для получения значимых результатов требуется большое количество экспериментов, и работы в этом направлении, как уже сказано, постоянно продолжаются. Следует отметить, что при количественной оценке громкости реальных сложных сигналов процесс зависит не только от временной и спектральной структур сигнала, но и от его смыслового содержания и окружающей пространственной обстановки.

Прежде, чем переходить к анализу громкости сложных звуков, остановимся еще на двух существенных моментах.

Ощущение громкости зависит от длительности сигнала: если на слуховой канал поступают два сигнала одинаковой интенсивности, то более короткий сигнал, воспринимается как менее громкий. Это полезно учитывать при обработке музыкальных и речевых сигналов. При увеличении длительности сигнала ощущение громкости постепенно возрастает, пока его длительность не достигает величины 100...200 мс, при этом возрастание уровня громкости происходит почти линейно с увеличением длительности сигнала (рис. 4).

Слуховая система обладает свойством адаптации, т.е. под воздействием длительных, громких, постоянных по величине звуков ощущаемая громкость звука постепенно уменьшается - слух адаптируется. Результаты изменения уровня звукового давления и ощущаемого уровня громкости (полученные знаменитым ученым Бекешем) показаны на рисунке 5.

При воздействии звука с уровнем 94 дБ в течение двух минут уровень громкости постепенно уменьшается на величину 9 фон, при этом к концу периода времени падение замедляется. Если при этом уровень сигнала резко увеличить, например с 94 до 100 дБ, то уровень громкости увеличивается, однако в меньшей степени, чем это должно было бы соответствовать значению уровня сигнала в 100 дБ. Затем уровень громкости начинает опять снижаться, и даже с большей скоростью, т.е. степень адаптации тем больше, чем громче звуковой сигнал. При этом происходит снижение чувствительности слуха и повышение слуховых порогов (о чем было рассказано в предыдущей статье).

Изменение уровня громкости проявляется и при внезапном уменьшении уровня воздействующего сигнала. Как показано на рисунке 6, при воздействии сигнала с уровнем 94 дБ происходит постепенная адаптация (как и в предыдущем случае, на 9 дБ), затем, при скачкообразном уменьшении уровня сигнала на 6 дБ, уровень ощущаемой громкости резко падает на 19 фон, а затем постепенно увеличивается, т.е. происходит адаптация к тихим звукам, и постепенно чувствительность восстанавливается.

Таким образом, слуховая система пытается защититься от громких звуков - при их длительном воздействии происходит постепенное снижение ощущения громкости, звуки кажутся более тихими. Степень адаптации зависит от громкости воздействующего сигнала - чем он громче, тем больше снижение ощущаемого уровня громкости. Однако возможности слуховой системы ограничены, и процесс имеет тенденцию к насыщению: например, при переходе от уровня 94 дБ к уровню 108 дБ разница в снижении уровня ощущаемой громкости происходит всего на 3 фона.

В основе процесса адаптации лежат механизмы, происходящие в среднем и внутреннем ухе. В статье, посвященной анализу высоты музыкального звука, был показан механизм работы среднего и внутреннего уха, при этом отмечено, что на больших уровнях сигнала срабатывает так называемый "акустический рефлекс". При этом стремечко отводится от овального окна и предохраняет внутреннее ухо от передачи слишком громких звуков. Рефлекс начинает

срабатывать для звуков с уровнем 85 дБ и выше, и обеспечивает защиту до 20 дБ. Кроме того, процесс колебаний базилярной мембраны является сугубо нелинейным - при слишком больших смещениях мембраны происходит компрессия сигнала за счет действия наружных волосковых клеток.

Однако защитная способность слуха, как уже сказано, ограничена; кроме того, она обладает определенной инерцией - акустический рефлекс начинает срабатывать только через 30...40 мс после начала звука, и полная защита еще не достигается и при 150 мс, поэтому, наряду с опасностью для слуховой системы воздействия длительных громких звуков, еще более опасным для нее является воздействие коротких громких импульсов.

Таким образом, ощущение громкости сложным нелинейным образом зависит от интенсивности воздействующего сигнала, его частоты и длительности. Однако еще большую проблему представляет определение зависимости ощущаемой громкости от спектрального состава сложных музыкальных и речевых сигналов, что будет рассмотрено во второй части данной статьи.