

# МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЗВУКОВЫХ ТРАКТОВ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

## METHOD OF OBJECTIVE ASSESSMENT OF AUDIO QUALITY OF COMPACT SOUND SYSTEMS

**M. Pakhomov  
V. Rognov  
U. Kovalgin**

*Summary.* Presented a method of objective assessment of audio quality, which allows mapping the objective characteristics of distortion on the generalized evaluation of the quality in terms of the listening preferences

*Keywords:* objective assessment of sound preference.

**Пахомов Михаил Олегович**

Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
Им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
mpakhomov39@gmail.com

**Рожнов Виктор Сергеевич**

Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
Им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

**Ковалгин Юрий Алексеевич**

Д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

*Аннотация.* Изложены метод объективной оценки качества звуковых трактов мобильных устройств, основанный на учете особенностей слухового восприятия, и результаты его экспериментальной проверки на реальных звуковых сигналах, подтверждающие высокую точность, полученных с его помощью результатов с данными субъективно-статистических экспертиз.

*Ключевые слова:* объективная оценка качества звучания

## Введение

Представленный в работе метод позволяет проводить объективную оценку качества звуковых трактов (ЗТ) мобильных устройств. В его основе лежит оригинальная психоакустическая модель, учитывающая особенности слухового восприятия. Реализован метод объективной оценки качества (МООК) ЗТ мобильных устройств в виде программы оценки качества (ПОК). В начале программой оценки качества (ПОК) рассчитываются объективные характеристики воспринимаемого слушателем сигнала — выходные переменные модели оценки качества (MOV, Model Output Variables). Далее с помощью искусственной нейронной сети (ИНС) проводится взвешивание полученных значений MOVs. После обучения ИНС и получения набора весовых коэффициентов для каждой из характеристик сигнала ПОК готова к практической работе. Результаты экспериментов подтверждают высокую точность оценки качества звуковых трактов мобильных устройств.

Искажения звуковых сигналов (ЗС), возникающие при их прохождении через ЗТ мобильных устройств, могут быть разделены на линейные (частотные и фазовые), динамические, нелинейные и переходные. В рамках данного МООК было решено ограничиться учетом частотных (ЧИ), динамических (ДИ) и нелинейных (НИ) искажений,

как наиболее сильно влияющих на качество звучания мобильных устройств. Звуковые тракты мобильных устройств, как правило, работают в режимах близких к предельно возможным значениям, необходимым для создания требуемого при комфортном прослушивании звукового давления, что приводит к значительным нелинейным и динамическим искажениям.

Переходные искажения (ПИ) более характерны для полноразмерных акустических систем. Они наиболее заметны на низких частотах и на головках громкоговорителей с тяжелой подвижной системой. Ввиду крайне малой массы подвижной части головки громкоговорителя (от 20 до 40 мг) в мобильных устройствах и невысокой их добротности, переходные процессы обычно протекают не дольше 1–2 периодов колебаний (их длительность не превышает 3–10 мс) и, как правило, не заметны на слух.

В числе искажений воспроизводимого сигнала также следует отметить фазовые искажения (ФИ). Одной из причин их появления является использование нескольких излучателей в одной акустической системе. Разнесение головок громкоговорителей в пространстве и использование частотных фильтров приводит к нелинейной фазо-частотной характеристике (ФЧХ). Однако в случае мобильных устройств эти факторы не являются актуальными, так как их линейные размеры очень

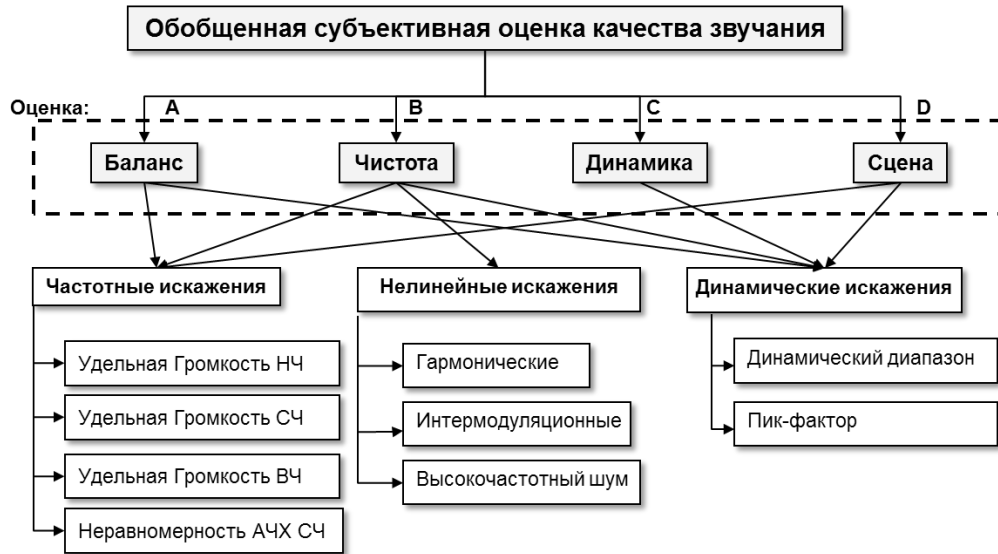


Рис. 1. Связь между субъективными оценками качества и объективными характеристиками сигнала искажений

малы, кроме того большинство *мобильных устройств* использует единственный широкополосный излучатель [5]. Предварительные исследования показали, что ФИ можно не учитывать при оценке качества звучания мобильных устройств.

### 1. Искажения сигналов в звуковых трактах мобильных устройств и критерии для их оценки

В основе разработанной психоакустической модели МООК лежит идея отдельной оценки искажений, вызванных разными факторами, с последующим их объединением в обобщенную оценку качества звучания одним числом. Выше уже был обоснован выбор типов искажений, учитываемых в МООК, здесь же рассмотрим выбор выходных переменных психоакустической модели (ПАМ), на основе которых будет вычисляться обобщенная объективная оценка качества звучания.

При проведении субъективно-статистических экспертиз (ССЭ) группа экспертов прослушивает репрезентативный набор музыкальных отрывков, каждый из которых наилучшим образом дает представление о том или ином виде искажений, вносимых в сигнал ЗТ мобильного устройства. Общая субъективная оценка качества звучания вычисляется на основании набора оценок по каждой из частных характеристик, определяющих качество: баланс, сцена, чистота и динамика. Общий принцип взаимосвязи между отдельными характеристиками ЗС, отобранных для тестирования ЗТ мобильных устройств, и обобщенной субъективной оценкой качества звучания представлен на рис. 1.

Мобильные устройства обычно оборудованы звуковыми процессорами, в которых сигнал подвергается дополнительной обработке для компенсации тех или иных недостатков. Чаще всего применяется сжатие динамического диапазона ЗС, при этом отношение амплитуд входного и выходного сигналов обычно имеет нелинейный характер. Также применяются статические и динамические эквалайзеры. В результате, выделение тех или иных искажений из ЗС, обработанного в звуковом тракте мобильного устройства, представляется чрезвычайно трудной задачей.

Рассмотрим подробнее основные виды искажений, возникающих в ЗТ мобильных устройств и выбранные методы для количественной оценки их величины.

#### 1.1. Нелинейные искажения

Известно, что традиционные методы объективной оценки нелинейных искажений (НИ) имеют весьма слабую корреляцию с субъективной оценкой качества звучания. Причиной этого является либо отсутствие в применяемом методе учета психоакустических факторов, либо неадекватная слуховому восприятию процедура выделения сигнала нелинейных искажений из тестового сигнала [1,2]. Несмотря на относительно незначительный энергетический вклад НИ в общий сигнал искажений они могут приводить к существенному снижению субъективной оценки качества звучания.

Основная идея разработанного метода оценки влияния НИ на качество звучания заключается в том, чтобы чувственную (perceptual) субъективную оценку качества воспроизведения проводить на оригинальных (специально отобранных) музыкальных сигналах, а соответ-

ствующую объективную оценку — с использованием искусственного многотонального сигнала, созданного на основе оригинальных музыкальных сигналов. Известно [7], что величина и спектр НИ, вносимых ЗТ мобильных устройств, зависят от характеристик самого музыкального сигнала. Следовательно, многотональный сигнал должен обладать схожим спектральным составом с оригинальным музыкальным сигналом, т.е. огибающие спектра мультитонального и исходного сигналов должны быть одинаковыми в каждый текущий момент времени. В своей базовой части алгоритм получения многотонального сигнала основан на процедурах обработки ЗС в психоакустической модели 1 стандарта MPEG-1 ISO/IEC11172-3 [8]. Методике его получения, а также и процедурам оценки нелинейных искажений с его помощью ранее были посвящены статьи [1, 2].

Используемый в данном случае метод обнаружения и слуховой оценки величины искажений в выходном сигнале мобильного устройства основан на процедурах, реализуемых в психоакустических моделях DIX, PEAQ. В качестве выходных переменных модели выступают вычисленные для всех выборок ЗС и усредненные по времени отношения шум-маска (NMR) для трех частотных диапазонов (низкие, средние и высокие частоты), относительное количество сильно искаженных выборок (Relative Disturbed Frames), вероятность обнаружения искажений и среднее искажение сигнала выборки.

## 1.2. Частотные искажения

В настоящее время объективная оценка частотных искажений, вносимых мобильными устройствами, в основном ограничивается измерением неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и ширины эффективно-воспроизводимого диапазона частот [3].

Особенности конструкции мобильных устройств предполагают установку одного или, в крайнем случае, двух широкополосных громкоговорителей. При этом нижняя граница эффективного диапазона воспроизводимых частот находится обычно в районе 200 Гц, верхняя граница — около 14 кГц.

Эффективно воспроизводимый частотный диапазон обычно разделяют на несколько поддиапазонов с точки зрения восприятия музыкального материала:

- ◆ низкочастотный (160 Гц — 500 Гц, 3–5 барк);
- ◆ низкий средний (500 Гц — 1,2 кГц, 6–10 барк);
- ◆ высокий средний (1,2–3,7 кГц, 11–17 барк);
- ◆ высокий (3,7–9,5 кГц, 18–22 барк);
- ◆ сверхвысокий (выше 9,5 кГц, 23–24 барк).

Величины частотных искажений вычисляются на основе расчета разницы между энергиями референсного

и воспринимаемого слушателем сигналов в соответствующих полосах частот. Предварительно сигналы выравниваются по уровню энергии в опорном частотном диапазоне (800 Гц — 4 кГц). Для вычисления энергий в указанных выше полосах частот используемые сигналы разбиваются на выборки, длительностью каждая около 50 мс и для них вычисляется энергия в каждом частотном поддиапазоне  $E_{sb}$  по формуле:

$$E_{sb}(Z, n) = 10 \cdot \lg \sum_{k \in n} 10^{x(k)/10}, \quad (1)$$

Здесь и ниже  $n$  — номер выборки,  $Z$  — номер анализируемого частотного диапазона,  $x(k)$  — уровень  $k$ -той спектральной компоненты в дБ.

Разница в энергии между референсным и воспроизводимым ЗТ сигналами в анализируемой полосе частот вычисляется по формуле:

$$dE_{sb}(Z, n) = E_{sb(test)}(Z, n) - E_{sb(ref)}(Z, n), \quad (2)$$

В соответствии с принятым разделением диапазона частот необходимо вычислить 5 выходных переменных, характеризующих разницу энергий в соответствующих субполосах:  $dE_{Low}$ ,  $dE_{LowMid}$ ,  $dE_{Mid}$ ,  $dE_{High}$ ,  $dE_{UHigh}$ .

Неравномерность АЧХ внутри поддиапазонов частот также оказывает влияние на субъективную оценку, причем, как показывают экспертные прослушивания, наиболее сильно для речевого диапазона частот (300 Гц — 3 кГц). Для данного диапазона частот критичными являются отклонения АЧХ от средней линии как в сторону усиления отдельных частот, так и в сторону ослабления.

В качестве критерия для оценки влияния неравномерности АЧХ на слуховое восприятие ЗС было решено использовать величину среднего отклонения, вычисляемую по формуле:

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| Spl_{test}(i) - \overline{Spl}_{test}(i) \right|, \quad (3)$$

где  $Spl_{test}(i)$  — усредненное звуковое давление для  $i$ -й субполосы,  $\overline{Spl}_{test}(i)$  — среднее значение звукового давления в оцениваемом диапазоне частот. Субполосы, в которых происходит усреднение, выбираются как половины критических полос слуха, входящих в оцениваемый диапазон частот.

## 1.3. Динамические искажения

Очевидно, что результат работы компрессора динамического диапазона (КДД), а вместе с этим и уровень вносимых в сигнал динамических искажений, зависит

не только от амплитудных и временных параметров КДД, но и от характеристик самого сигнала. Также на воспринимаемый динамический диапазон сигнала, воспроизводимого звуковым трактом (ЗТ), оказывает сильное влияние форма АЧХ оцениваемого ЗТ мобильного устройства.

Таким образом, для комплексного учета всех ДИ недостаточно знания только параметров устройства. Для обеспечения высокой корреляции объективной и субъективных оценок необходимо анализировать записи сигналов, которые использовались при проведении субъективно-статистических экспертиз (ССЭ). В качестве выходных переменных модели оценки качества решено использовать разницу в величине воспринимаемого динамического диапазона (ДД) для референсного и воспроизводимого ЗТ мобильного устройства сигналов и разницу между значениями пик-факторов для соответствующих отрезков этих сигналов.

Для оценки динамических искажений вычисляется распределение громкости референсного и тестового сигналов во времени (на основе алгоритма вычисления громкости, предложенного [8]). Далее происходит определение минимальной, максимальной и средней громкости каждого сигнала. Разница между максимальной и минимальной громкостями каждого сигнала определяет воспринимаемый динамический диапазон, а разница между максимальной и средней громкостью — значение пик-фактора.

Выходными переменными модели оценки качества являются разница воспринимаемых ДД и значениях пик-фактора воспроизводимого ЗТ и референсного сигналов.

## 2. Оценка отдельных видов искажений

Испытания МООК проводились на базе акустической лаборатории филиала корпорации LG Electronics inc. в Санкт-Петербурге. В качестве экспертов выступали шесть сотрудников компании, прошедшие предварительный отбор на предмет выявления дефектов слуха и обучение у профессионального эксперта в области музыкальной акустики. Средний возраст экспертов составил 28,5 лет. В качестве испытательных сигналов использовались звуковые отрывки, рекомендованные экспертом для проведения ССЭ и позаимствованные с диска EBU SQAM. Все фонограммы были представлены в формате Windows PCM, частота дискретизации 44,1 кГц и разрядность 16 бит/отсчет.

Шкала оценки качества, используемая в МООК, соответствует пятибалльной шкале, применяемой обычно при проведении ССЭ. При этом получаемые оценки

качества лежат в интервале от 1 до 5 баллов, где 1 балл соответствует наиболее предпочтительному качеству звучания, а 5 баллов соответствует звучанию, оцененному как наиболее плохое для представленного набора тестовых фонограмм.

Проведенные испытания можно разделить на два основных этапа, каждый из которых разделяется на составляющие. На первом этапе проводятся ССЭ для отдельной оценки частотных, нелинейных и динамических искажений (разд. 2). На втором этапе комплексной субъективной оценке качества подвергались звуковые тракты мобильных устройств из референсного их набора.

### 2.1. Частотные искажения (ЧИ)

В субъективной оценке ЧИ представлены в двух частных оценках качества звучания (рис. 1): баланс и сцена. Баланс характеризуется соотношением энергий воспроизводимого ЗТ мобильного устройства сигнала в разных полосах частот, а сцена равномерностью АЧХ и шириной эффективного диапазона частот.

Для моделирования частотных искажений и статистической обработки результатов ССЭ были использованы коммерческие программные продукты: Adobe Audition 6.0 и MS Excel 10.

Программа исследования ЧИ состоит из двух частей: моделирование изменения общего количества энергии ЗС в диапазоне частот и моделирование неравномерности распределения энергии ЗС внутри полного диапазона отдельно для низких средних и высоких средних частот.

Для проведения процедуры субъективного ранжирования музыкальных сигналов по величине ЧИ был разработан набор фильтров, моделирующих частотные искажения в соответствующих полосах (рис. 2) и подготовлен набор тестовых фонограмм, представляющих собой референсную фонограмму, обработанную описанными выше цифровыми фильтрами.

Экспертам предлагалось ранжировать фонограммы, имеющие разницу в одном из частотных диапазонов по предпочтительности. Наиболее предпочтительное звучание получило оценку 1 балл, наименее предпочтительное 5 баллов. Ниже приведены зависимости субъективных оценок экспертов от величины разницы энергии сигнала в соответствующей полосе.

На заключительном этапе эксперты оценивали звучание фонограмм, имеющих разницу в уровне энергий в нескольких диапазонах частот одновременно. Всего

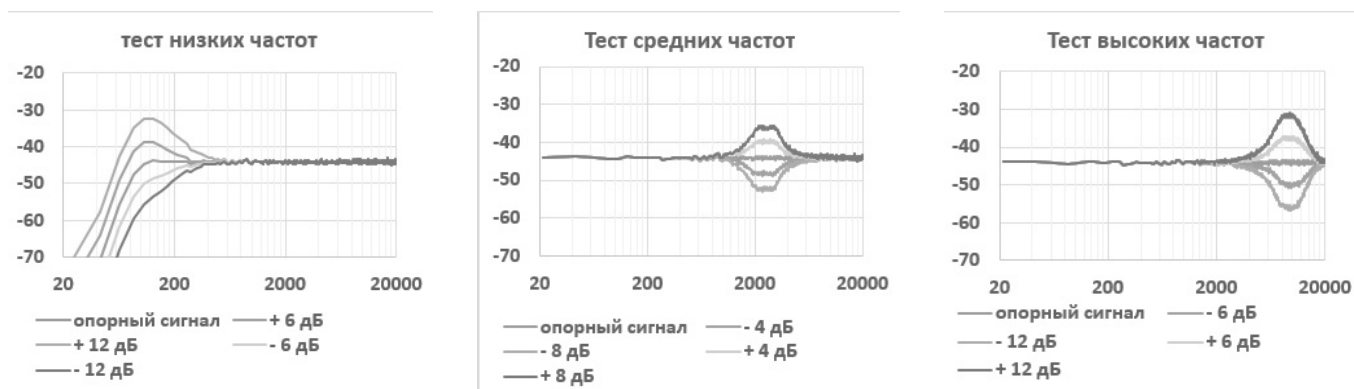


Рис. 2. Результаты применения фильтров к белому шуму

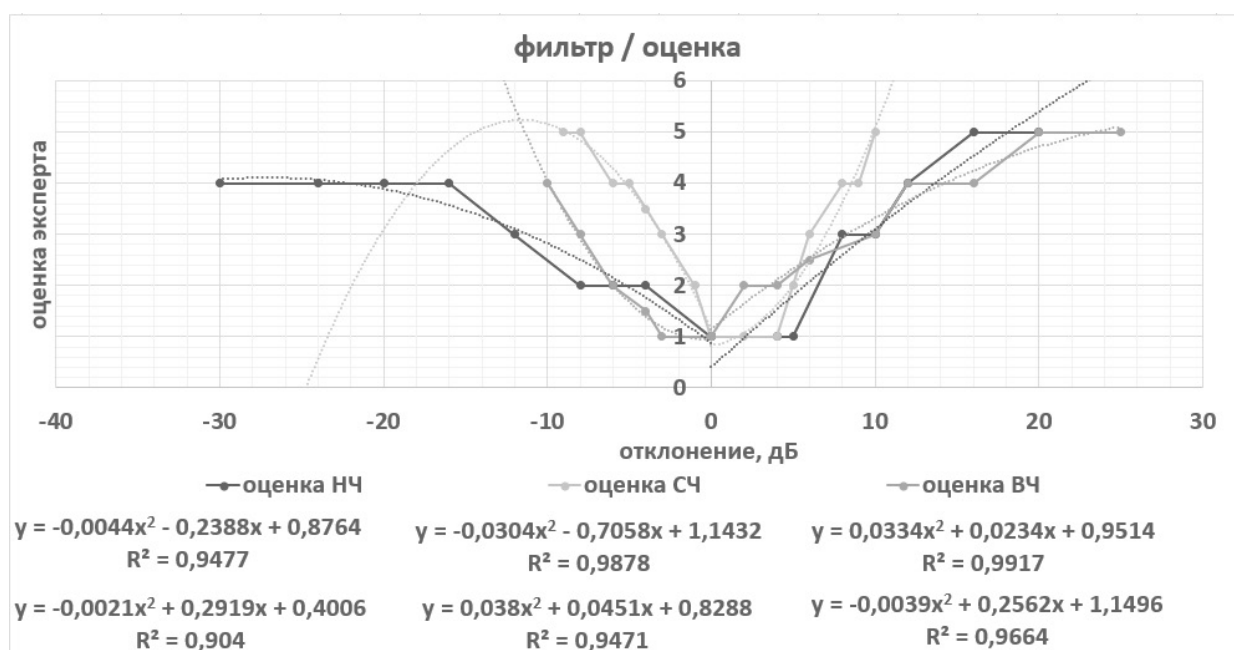


Рис. 3. Зависимости экспертных оценок от величины ЧИ в отдельной полосе частот

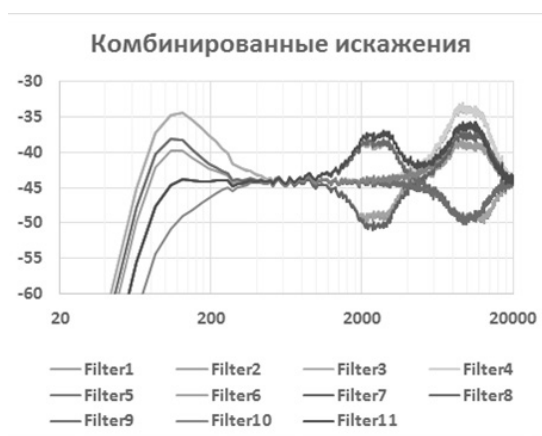


Рис. 4 АЧХ фильтров для оценки комбинированных искажений

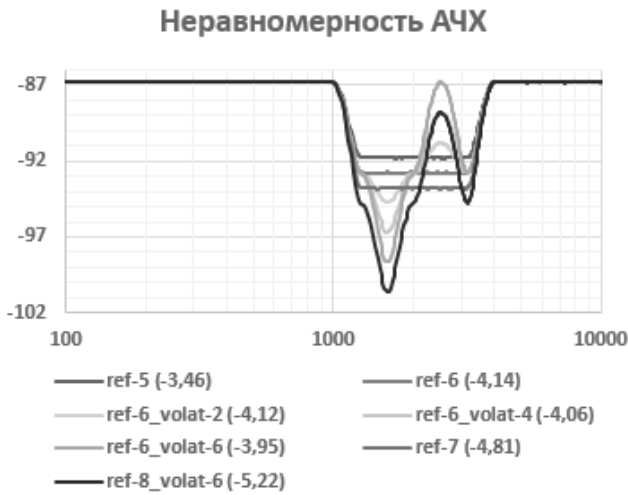


Рис. 5 Примеры АЧХ фильтров для оценки влияния неравномерности на оценки эксперта

было подготовлено около 50 различных комбинаций, некоторые примеры АЧХ приведены на рис. 4.

Поскольку других искажающих сигнал факторов при этом не имеется, то обобщенная оценка ЧИ зависит только от значений частных оценок ( $Bal_{low}$ ,  $Bal_{mid}$ ,  $Bal_{high}$ ,  $Bal_{ulhigh}$ ), умноженных на соответствующие весовые коэффициенты:

$$Bal_{Low} \cdot W_{Low} + Bal_{Mid} \cdot W_{Mid} + Bal_{High} \cdot W_{High} + Bal_{UHigh} \cdot W_{UHigh} = Bal_{total} \quad (4)$$

где

$Bal_i = a_i \cdot dE_i^2 + b_i \cdot dE_i + c_i$ ;  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  — соответственно коэффициенты полинома для аппроксимации оценки качества в зависимости от разницы энергии в поддиапазоне (рис. 2),  $W_i$  — весовой коэффициент для  $i$ -го диапазона,  $i$  — номер поддиапазона.

Для оценки влияния неравномерности АЧХ ЗТ мобильных устройств на качество звучания был подготовлен набор сигналов, различающихся величиной среднего отклонения АЧХ в выбранном диапазоне, при этом общий уровень энергии в соответствующих полосах был выбран одинаковым.

В результате экспериментов было установлено, что незначительное влияние на качество звучания оказывает только неравномерность АЧХ в диапазоне средних частот (рис. 5).

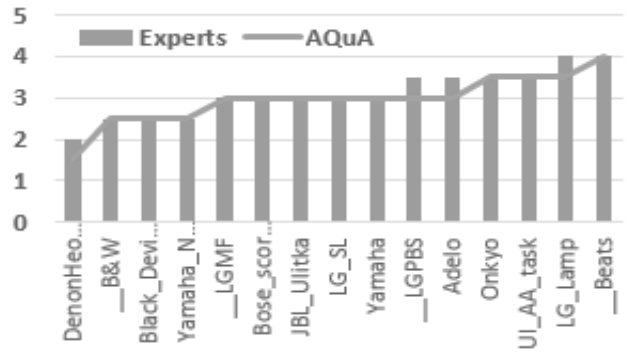


Рис. 6 Корреляция субъективных и объективных оценок баланса звучания

Таблица 1. Весовые коэффициенты

Диапазон	Вес
Низкие частоты	0,293
Средние частоты	0,49
Высокие частоты	0,128
Сверхвысокие частоты	0,088

Для остальных диапазонов встречающаяся в реальных устройствах неравномерность АЧХ не оказывает заметного влияния на субъективную оценку.

Таким образом, было принято решение учитывать влияние неравномерности АЧХ только в диапазоне средних частот как некоторую добавку ( $Dev_{mid}$ ) к оценке  $Bal_{mid}$ .

После завершения ССЭ полученные результаты были загружены в искусственную нейронную сеть для получения значений весовых коэффициентов, представленных ниже в табл. 1.

Сравнительные результаты, полученные ССЭ и МООК, для оценки баланса звуковой картины приведены на рис. 6, подтверждают их высокую корреляцию.

## 2.2. Нелинейные искажения

В субъективной оценке нелинейные искажения представлены в одной частной оценке качества звучания (рис. 1): прозрачность.

Референсные музыкальные сигналы воспроизводились тестируемыми устройствами с разными уровнями громкости в безэховой камере. Поскольку величина нелинейных искажений зависит от уровня воспроизведения, то изменение уровня громкости на тестируемом устройстве позволяет получить несколько записей с разным уровнем искажений. В результате для последующего анализа и оценки были отобраны около 50

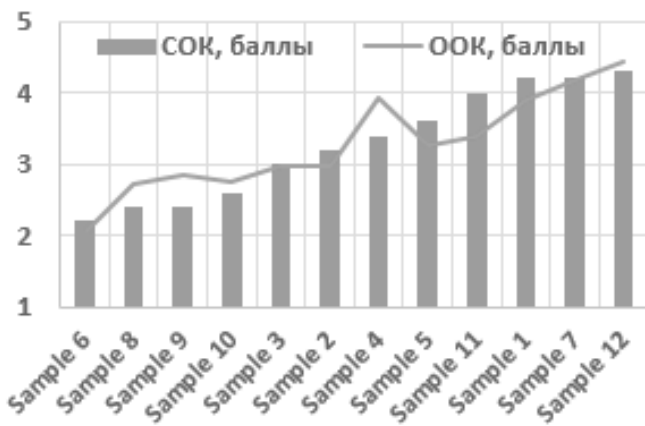


Рис. 7 Субъективная оценка качества (СОК) (синий) и объективная оценка качества (ООК) (красный) для записей на различных устройствах

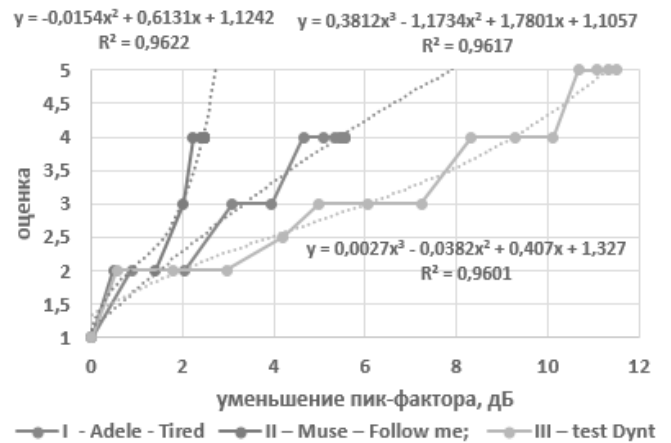


Рис. 8. Зависимость субъективной оценки от уменьшения пик-фактора

наборов записей. Каждому набору был поставлен в соответствие порядковый номер для устранения влияния имени бренда на субъективное предпочтение.

Для исключения влияния разницы АЧХ оцениваемых устройств на субъективную оценку качества, все записанные образцы были приведены к единой по форме АЧХ, которая представляла собой усредненную АЧХ референсных устройств. На заключительном этапе все тестовые сигналы были нормированы к уровню 0 dBFS.

Экспертная оценка тестируемых мобильных устройств осуществлялась методом парных сравнений. Для данной задачи этот метод заслуживает большего доверия, чем ранжирование, поскольку, с точки зрения эксперта, проранжировать большое количество слабо отличающихся объектов иногда бывает весьма трудно, в то время как попарно их сравнить гораздо легче. Основным недостатком этого метода — возможное нарушение транзитивности в нашем случае сведен к минимуму, поскольку сравнение происходит по одному критерию — слышимость нелинейных искажений.

В каждой паре оцениваемых сигналов экспертам требовалось выбрать более предпочтительный сигнал с точки зрения заметности нелинейных искажений. Для ускорения времени ранжирования всего массива записей использовался метод аналогичный методу быстрой сортировки (сортировки Хоара) [9]. Далее средняя запись в сортированном списке получала оценку 3 балла и оставшиеся пары звучаний оценивались в соответствии с их местом и субъективной разницей с соседями. Шкала оценок принималась 5 балльная, с шагом 0,1 балла. Шкала разрабатывалась специально для мобильных устройств. Оценка 1 балл соответствует максимальному

субъективному качеству звучания, оценка 5 минимальному. Если разница в предпочтении минимально различимая, то разница в оценке сравниваемых пар сигналов составляет 0,1 балла. На заключительном этапе ССЭ оценки, полученные разными экспертами для соответствующих устройств, усреднялись.

На рис. 7 приведено сравнение результатов ССЭ и объективной оценки.

Высокая корреляция оценок свидетельствует о правильном выборе общей концепции, а также отдельных механизмов учета свойств слуха человека, положенных в основу реализованного алгоритма, предназначенного для объективной оценки восприятия нелинейных искажений.

### 2.3. Динамические искажения

В субъективной оценке динамические искажения (ДИ) представлены в двух частных оценках качества звучания (рис. 1): динамика и сцена.

Для их оценки тесты проводились на четырех музыкальных отрывках разных жанров с разными значениями величины динамического диапазона и пик-фактора.

Для проведения процедуры субъективного ранжирования музыкальных сигналов по величине ДИ использовался инструмент, предоставленный Adobe Audition 6.0. Начальный коэффициент компрессии был установлен равным 1:1, при этом были выбраны следующие временные параметры компрессора: время атаки 1 мс, время спада 100 мс. В результате изменения величины коэффициента компрессии с шагом в 2 дБ и применения механизма сжа-

Таблица 2. Зависимость субъективной оценки от величины ДИ и характеристик сигнала

Уровень ограничителя	Субъективная оценка			Изменение ДД			Изменение Пик-Фактора		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
-2	2	2	2	0,69	0,55	0,6	0,89	0,49	0,57
-4	2	2	2	2,23	1,92	1,92	2,06	1,4	1,79
-6	3	3	2	3,79	3,47	3,23	3,09	2,01	2,96
-8	3	4	2,5	5,6	5,24	4,71	3,96	2,23	4,21
-10	4	4	3	7,53	7,13	5,78	4,65	2,39	5
-12	4	4	3	9,51	9,03	7,23	5,09	2,44	6,07
-14	4	4	3	11,51	10,75	8,92	5,34	2,45	7,23
-16	4	4	4	13,48	12,02	10,71	5,45	2,46	8,32
-18	4	4	4	15,41	12,31	12,57	5,49	2,46	9,3
-20	4	4	4	17,32	12,31	14,43	5,51	2,46	10,11
-22	4	4	5	19,17	12,31	16,28	5,53	2,46	10,67
-24	4	4	5	21,02	12,31	18,14	5,54	2,46	11,06
-26	4	4	5	22,91	12,31	20,1	5,55	2,46	11,34
-28	4	4	5	24,75	12,31	21,93	5,55	2,46	11,5

тия ДД, был получен набор тестовых сигналов с разницей в динамическом диапазоне до 28 дБ и величине пик-фактора до 11 дБ (табл. 2). И в этом случае при проведении ССЭ по заметности ДИ и их ранжированию по величине слуховой заметности по-прежнему использовалась 5-ти бальная шкала оценки и метод парных сравнений.

Порог заметности изменения величины пик-фактора составляет 1–2 дБ в зависимости от динамических параметров композиции. На рис. 8 представлены усредненные результаты ранжирования тестовых фонограмм в зависимости от величины пик-фактора.

Итак, для правильной объективной оценки ДИ необходимо учитывать динамические параметры референсной фонограммы.

### 3. Комплексная оценка качества звучания

На заключительном этапе испытаний экспертам предлагалось оценить качество звучания набора референсных устройств. Перед ССЭ были подготовлен набор выровненных по громкости бинауральных записи тестовых сигналов, полученных с помощью макета головы с торсом G.R.A.S. 45BB-3 KEMAR Head & Torso. Указанные записи воспроизводились звуковым трактом уровня Hi End (Bowers & Wilkins CM series CM9 S2). Таким образом, заменив прослушивание оцениваемых звуковых трактов прослушиванием бинауральных записей воспроизводимых ими сигналов, удастся устранить влияние имени производителя и разницы в громкости звучания тестируемых мобильных устройств на субъективную оценку. Иначе говоря, эксперты слушают не непосредственное звучание тестируемых ЗТ, а записи их звучания, воспро-

изводимые высококачественным оборудованием. Влияние формы ушных раковин макета головы слушателя устраняется с помощью инверсных слуховых фильтров (HRTF). Одновременно с записями для проведения ССЭ записывались тестовые сигналы для вычисления выходных переменных ПОК. Полученные оценки сводились в единую таблицу для последующей статистической обработки.

С целью определения степени совпадения объективных и субъективных оценок были рассчитаны доверительные интервалы субъективных оценок, средняя квадратичная ошибка, коэффициент корреляции (таб. 3).

Количество экспертов для каждого тестируемого устройства равно шести. Поскольку размер выборки невелик, а дисперсия распределения оценок для всех слушателей заранее неизвестна, то использовался метод построения доверительного интервала через критическое значение t-статистики (коэффициент Стьюдента):

$$\left( \bar{x} - t_{\alpha, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{\alpha, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \right), \quad (5)$$

где  $s$  — стандартное отклонение,  $n$  — количество экспертных оценок для каждого устройства,  $t_{\alpha, n-1}$  — критическое значение t-статистики (распределения Стьюдента) с уровнем значимости  $\alpha$ , числом степеней свободы  $n-1$ , которое определяется по специальным статистическим таблицам (в нашем случае  $t_{\alpha, n-1}=2.57$ ),  $\alpha$  — уровень значимости, принимаем  $\alpha=0,05$ .

Для оценки качества предсказания субъективной оценки с помощью разработанной модели использует-



Таблица 3. Результаты тестирования мобильных устройств ПОК разработанного МООК

	DenonHeos7	DenonHeos5	Denon Envaya	PEAQ	B&W	Teufel	Yamaha_NX50	Bose SL	Creative	SvenHA1410T	LG MF	JBLCharge2	Yamaha	Onkyo	B&O	Bose	Sony SRS	LG_BigMusicFlow	Sony_Ball	Adelo	LG MFmini	Logitech UE	UE_AA_task	LG_Lamp	Beats	Harman Kardon
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
СОК	2,14	2,4	2,65	2,8	2,81	2,97	2,99	3,03	3,06	3,17	3,19	3,26	3,37	3,38	3,41	3,43	3,44	3,48	3,53	3,55	3,69	3,69	3,71	3,94	4,29	4,38
ООК	2,1	2,27	2,73	2,73	3,16	2,89	2,75	2,72	2,98	3,06	3,23	3,11	3,03	3,16	3,37	3,32	3,29	3,32	3,47	3,47	3,58	3,66	3,87	3,73	4,25	4,31
АО	0,04	0,13	0,08	0,07	0,35	0,08	0,24	0,31	0,08	0,11	0,04	0,15	0,34	0,22	0,04	0,11	0,15	0,16	0,06	0,08	0,11	0,03	0,16	0,21	0,04	0,07
ДИ	0,74	0,52	0,52	0,74	0,74	0,74	0,74	0,52	0,52	0,74	0,74	0,74	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,74	0,74	0,52	0,52	0,74	0,74	0,52	0,52
СКО	0,2																									
$\rho$	0,96																									

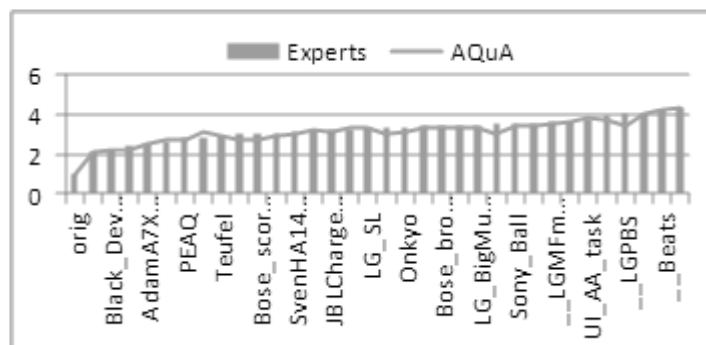


Рис. 9. Субъективная оценка качества (СОК) (синий цвет) и объективная оценка качества (ООК) (оранжевая кривая) мобильных устройств на отобранных испытательных сигналах

ся значение средней квадратичной ошибки  $s$  и коэффициента корреляции Пирсона  $\rho$  между наблюдаемыми усредненными субъективными оценками качества (СОК) и предсказанными объективными оценками качества (ООК):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (ООК_i - СОК_i)^2}{N}}, \quad (6)$$

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (ООК_i - \overline{ООК}) \cdot (СОК_i - \overline{СОК})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (ООК_i - \overline{ООК})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (СОК_i - \overline{СОК})^2}}, \quad (7)$$

где  $\overline{ООК}$ ,  $\overline{СОК}$  — средние значения объективной и субъективной оценки качества соответственно.

О степени совпадения субъективных и объективных оценок качества можно судить с помощью приведенных значений абсолютной ошибки, средней квадратичной ошибки, количества выбросов и коэффициента корреляции (табл. 4).

Значения абсолютных отклонений (АО) в 100% случаев являются меньшими, чем доверительный интервал СОК. В свою очередь средняя квадратичная ошибка, составляющая 0,2 балла, является меньшей, чем средний доверительный интервал СОК, который равен 0,62 балла. Выбросов (случаев отклонения значений ООК от СОК более

чем на удвоенный доверительный интервал СОК) не зафиксировано. Общий ход кривых деградации качества, полученных с помощью ПОК, соответствует аналогичным кривым, построенным по результатам ССЭ. Всё это позволяет утверждать, что объективные оценки качества звучания ЗТ, полученные с помощью МООК достаточно точно совпадают с соответствующими результатами ССЭ.

### Заключение

Высокая корреляция объективных оценок качества, получаемых с помощью разработанного метода, с субъективной оценкой позволяют говорить о правильности выбора набора объективных характеристик сигнала и разработанных критериев оценки их искажений, а также об эффективности предложенного МООК (рис. 9).

К недостаткам метода можно отнести недостаточную универсальность, которая заложена в модели — зависимость оценки качества от выбранного музыкального контента. В будущем планируется отобрать репрезентативный набор музыкальных композиций, выделить в них наиболее проблемные и информативные с точки зрения субъективной оценки качества участки и создать на их основе синтетический сигнал для использования в системах автоматического тестирования звуковых трактов мобильных устройств. Также планируется провести дополнительные исследования по влиянию фазовых и переходных искажений на качество звучания этих устройств с целью расширения области применения, разработанного МООК и соответствующей компьютерной ПОК.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пахомов М. О., Ковалгин Ю. А., Рожнов В. С. Мультитональный испытательный сигнал для оценки слышимости нелинейных искажений // Системы управления и информационные технологии, 2016, Т. 63, № 1, с. 72–78.
2. Пахомов М. О., Ковалгин Ю. А., Рожнов В. С. Метод объективной оценки слышимости нелинейных искажений // Системы управления и информационные технологии, 2016, Т. 64, № 2, с. 72–78.
3. BS.1387–1. Method for objective measurements of perceived audio quality. Rec. ITU-R, (1998–2001)
4. E. Zwicker and H. Fastl, Psychoacoustics, Facts and Models. Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 1990.
5. Blauert, J. and Laws, P. «Group Delay Distortions in Electroacoustical Systems» // Journal of the Acoustical Society of America Volume 63, Number 5, pp. 1478–1483 (May 1978)
6. Mark Wendl, Hyunkook Lee, The Effect of Dynamic Range Compression on Loudness and Quality Perception in Relation to Crest Factor. 136th AES Convention 2014 April 26–29 Berlin, Germany.
7. Вольф В. М. Динамический метод исследования нелинейных искажений // Радиотехника, 1953, т. 8, № 2, с. 27–37.
8. Ковалгин Ю. А. Психоакустика и компрессия цифровых аудиоданных. Монография, СПб.: СПбГУТ, 2013. — 300 с.
9. Левитин А. В. Глава 4. Метод декомпозиции: Быстрая сортировка // Алгоритмы. Введение в разработку и анализ — М.: Вильямс, 2006. — С. 174–179. — 576 с.

© Пахомов Михаил Олегович ( mprakhomov39@gmail.com ), Рожнов Виктор Сергеевич, Ковалгин Юрий Алексеевич.  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

