



На правах рукописи

Пахомов Михаил Олегович

**МЕТОД ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
ЗВУКОВЫХ ТРАКТОВ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

05.12.04 - РАДИОТЕХНИКА, В ТОМ ЧИСЛЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА
ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ) на кафедре Радиосвязи и вещания (РС и В)

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки Российской Федерации

доктор технических наук, профессор Ковалгин Юрий Алексеевич

Официальные оппоненты:

Кривошейкин Анатолий Валентинович, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения (СПбГИКиТ), профессор кафедры «Радиотехники и информационных технологий» (РТиИТ), г. Санкт-Петербург.

Чесноков Михаил Александрович, кандидат технических наук, ведущий инженер-электроник Акционерного Общества «Научно-технический центр «Ядерно-физические исследования» (АО «НТЦ «ЯФИ»), г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (ФГБОУ ВО МТУСИ), г. Москва.

Защита состоится «27» декабря 2017 года в __ часов __ минут на заседании диссертационного совета Д212.238.03 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) и на сайте www.eltech.ru.

Автореферат разослан «26» октября 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.03
кандидат технических наук

М. Е. Шевченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Использование мобильных устройств занимает все более возрастающую роль в социальной жизни современных людей, при этом использование этих устройств вышло далеко за рамки коммуникации, сейчас это и проводник во всемирную сеть, и мобильный секретарь, и партнер для досуга. Все это приводит к тому, что качество воспроизведения звука через громкоговоритель мобильного устройства стало выходить на главные роли – далеко не всегда пользователь использует головные телефоны. Это означает, что при выборе между двумя похожими аппаратами пользователь учитывает и звучание мобильного телефона, что иногда даже может стать решающим фактором.

Для того, чтобы повысить качество воспроизведения, необходимо сравнивать разные варианты звучания мобильных телефонов, выбирая из них лучшие. При стандартном методе оценки качества звучания звуковых трактов (ЗТ) мобильных устройств происходит прослушивание аппаратов специально обученным экспертом. Так как ранжирование проходит по целому ряду характеристик такой метод оценки имеет ряд недостатков, относящихся к человеческому фактору: высокая стоимость работы квалифицированного эксперта; ограниченное время проведения экспертиз вследствие усталости эксперта; сложность количественной оценки качества при малых различиях между тестовыми сигналами; разница между оценками у разных экспертов. Замена эксперта на комплекс аппаратно-программного обеспечения, позволяющего выставить объективную оценку звучания, коррелирующую с субъективной экспертной оценкой, является перспективной задачей.

До конца 80х годов прошлого столетия проблема инструментальной оценки качества звучания решалась путем измерения таких характеристик, как отношение сигнал-шум, коэффициент гармоник, неравномерность АЧХ и т.п. После перехода к цифровым технологиям стали развиваться методы, основанные на учёте психоакустических свойств слуховой системы человека, наиболее важными из которых являются эффекты маскировки. Таким образом, исследования в психоакустике позволили разработать новые методы объективной оценки качества систем звуковоспроизведения различного назначения.

Из отечественных ученых наиболее существенный вклад в развитие методов объективной оценки качества звучания внесли И.А.Алдоцина, Ю.А.Ковалгин, С.Л.Мишенков, О.Б.Попов, С.Г.Рихтер. Следует отметить также работы, выполненные М.В.Зыряновым, С.А.Литвиным, Е.А.Хряниным.

Разработанные к настоящему времени методы оценки качества, такие как PEAQ (Perceptual Evaluation of Audio Quality), DIX (Disturbance Index), NMR (Noise-to-Masked-Ratio), OASE (Objective Audio Signal Evaluation), PAQM (Perceptual Audio Quality Measure), PERCEVAL (PERCеptual EVALuation), POM (Perceptual Objective Measurement) и прочие в основном специализированы на оценке заметности разницы между оригинальным и оцениваемым сигналами. Наиболее хорошо они подходят для оценки искажений, вносимых в оригинальный сигнал компрессией цифровых аудиоданных, поскольку уровень таких искажений сравнительно невелик. Попытки использовать эти методы для объективной оценки качества звучания звуковых трактов мобильных устройств показали их низкую достоверность при сравнительно высоком уровне искажений в оцениваемом сигнале.

Такое состояние дел в области оценки качества ЗТ мобильных устройств привело к необходимости создания универсального, информативного и достоверного метода объективной оценки качества (МООК) воспроизведения звуковых сигналов мобильными устройствами. Этот метод должен позволять организовывать оперативный контроль качества, а его результаты должны с необходимой точностью совпадать с результатами, полученными с помощью субъективно статистических экспертиз (ССЭ).

Таким образом, актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью разработки удобного в использовании метода объективной оценки качества воспроизведения звука мобильными устройствами, позволяющего не только осуществлять оперативный контроль качества такого оборудования, но также и достоверно оценивать эффект от изменений, вносимых в настройки ЗТ.

Объект исследования: звуковые тракты мобильных устройств.

Предмет исследования: методы объективной оценки влияния искажений на качество звучания, воспроизводимого звуковыми трактами мобильных устройств.

Соответствие паспорту специальности.

Содержание работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.12.04–Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения:

пункт 7. Разработка методов и устройств передачи, приема, обработки, отображения и хранения информации. Разработка перспективных информационных технологий, в том числе цифровых, а также с использованием нейронных сетей для распознавания изображений в радиотехнических устройствах;

пункт 9. Разработка научных и технических основ проектирования конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиотехнических устройств;

Цель работы и задачи исследований. Целью диссертационной работы является разработка метода объективной оценки качества ЗТ мобильных устройств и создание на его основе программного обеспечения, позволяющего организовывать оперативный контроль их качества.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Провести анализ искажений звуковых сигналов, возникающих при воспроизведении их мобильными устройствами. Классифицировать и оценить их степень влияния на субъективную оценку. Выделить наиболее значимые с точки зрения влияния на качество звучания. Провести анализ современных перцепционных методов оценки качества звуковых сигналов, стандартов и рекомендаций ИТУ, посвященных данной проблеме; оценить эффективность моделирования свойств слуховой системы человека, учитываемых при разработке этих методов; сформулировать научные и прикладные требования, предъявляемые к разрабатываемому методу объективной оценки качества звучания мобильных устройств;

2. Разработать метод объективной оценки качества звуковых трактов мобильных устройств: сформулировать концепцию и выбрать критерии оценки влияния величин и видов возникающих при этом искажений на частные и обобщённую оценки качества воспроизводимого аудиосигнала;

3. Сформулировать требования к создаваемой программе объективной оценки качества звучания и на их основе разработать концепцию, структуру и интерфейс программы оценки качества. Разработать и отладить программу оценки качества звуковых трактов мобильных устройств;

4. Обосновать способ проверки достоверности результатов, получаемых с помощью разработанной программы оценки качества, и провести испытания. Обработать результаты и сделать заключение о степени достоверности полученных объективных оценок качества и правильности выбора тех или иных научно-исследовательских и прикладных решений.

Методы проведения исследований. Для решения поставленных задач использовались методы цифровой обработки звуковых сигналов, программирование на языках С и С++, программное обеспечение «Adobe Audition» и Microsoft Excel, математическая статистика, математический анализ и субъективно-статистические экспертизы.

Научная новизна и новые полученные результаты. В существующих методах не уделяется достаточного внимания проблеме комплексной оценке качества звуковых трактов мобильных устройств.

На основе выполненных в диссертационной работе исследований закономерностей слухового восприятия разработаны перцепционные методы объективной оценки влияния различных типов искажений на качество ЗТ мобильных устройств, в частности:

1. Метод оценки нелинейных искажений объединивший в себе процедуры построения референсного многотонального сигнала, выделения сигнала нелинейных искажений, дифференцированной оценки отдельных характеристик сигнала нелинейных искажений, а также их совокупного влияния на обобщённую оценку качества;

2. Методы оценки частотных и динамических искажений, учитывающие различия энергетических спектров и воспринимаемой громкости референсного и оцениваемого сигналов;

3. Метод перехода от оценки слуховой заметности отдельных видов искажений к обобщенной оценке качества звуковых трактов мобильных устройств одним числом с использованием для получения весовых коэффициентов модели множественной регрессии.

Достоверность полученных результатов и выводов. Основой разработанного метода объективной оценки качества (МООК) являются научные труды ведущих отечественных и зарубежных ученых в данной области, корректное применение математического аппарата, обсуждения результатов работы на научных российских и международных конференциях, публикации в рецензируемых научных журналах и трудах общества аудиоинженеров AES, положительными результатами его проверки в лабораториях LG Electronics. Высокая корреляция как отдельных характеристик качества так и обобщенной оценки с результатами субъективно-статистической экспертизы (ССЭ) подтверждает достаточность набора выходных переменных и правильность учета закономерностей слухового восприятия различных типов искажений.

Научные положения, выносимые на защиту.

На основе выполненных в работе исследований закономерностей слухового восприятия разработаны перцепционные методы объективной оценки влияния различных типов искажений на качество звучания ЗТ мобильных устройств:

1. Метод оценки нелинейных, частотных и динамических искажений музыкальных сигналов, возникающих в звуковых трактах мобильных устройств, позволяющий на основе психоакустического моделирования получить для каждого из них критерии, дающие результаты адекватные их слуховой заметности. Разработанный метод обеспечивает корреляцию субъективной и объективной оценок качества $\rho > 0,85$.

2. Метод обобщенной оценки качества звуковых трактов мобильных устройств, основанный на переходе от частных оценок величин нелинейных, частотных и динамических искажений с помощью метода множественной регрессии, позволяющий получить результаты, совпадающие с данными субъективно-статистических экспертиз с требуемой для практики точностью.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Сформирован набор специальных звуковых сигналов, необходимых для выявления и последующей количественной оценки каждого типа искажений, вносимых звуковыми трактами мобильных устройств;

2. Разработанная и реализованная в диссертации программа оценки качества звуковых трактов мобильных устройств позволяет осуществлять оперативный контроль качества звучания тестируемых устройств и с достаточной для практики точностью (не превышающей доверительный интервал ССЭ) предсказывать результаты ССЭ, а также использовать её для проведения дальнейших научных исследований в данной области;

3. Разработано программное обеспечение, позволяющее организовывать автоматический поиск наилучших с позиций слухового восприятия настроек звуковых трактов тестируемых мобильных устройств;

4. Проведены испытания, подтверждающие достоверность получаемых с помощью разработанной программы результатов оценки качества.

Реализация и внедрение результатов исследований.

Результаты исследований и созданный аппаратно-программный комплекс используются в процессе настройки звуковых трактов мобильных устройств (мобильные телефоны, ноутбуки, планшетные компьютеры и пр.), производимых компанией LG Electronics, что подтверждено соответствующим актом внедрения от 24 апреля 2017 года.

Результаты диссертации внедрены также в учебный процесс в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при выполнении научно-исследовательских и выпускных квалификационных работ магистров, обучающихся по направлениям (акт внедрения в учебный процесс):

-11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» профиль «Системы и сети радиосвязи, радиовещания и радиодоступа» при изучении дисциплины «Аудиотракты систем радиосвязи, радиовещания и радиодоступа» и

-11.04.01 – Радиотехника, профиль «Аудиовидеосистемы и медиакommunikации» при изучении дисциплины «Формирование, передача и воспроизведение аудиоконтента в медиакommunikациях».

Апробация результатов работы и публикации.

Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на: VI-ой Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», СПб., СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 3-4 марта 2015 года; 139-ой конференции общества аудио инженеров (139th AES Convention) в Нью-Йорке, 29 октября 02 ноября 2015 года; 141-ой конференции общества аудио инженеров (141st AES Convention) в Лос Анжелесе, 29 сентября 2016 года.

Публикации. По тематике диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ, из которых 3 в журналах из Перечня ВАК, 3 работы в материалах международных научных конференций.

Личное участие автора в получении научных результатов.

В исследованиях, результаты которых приведены в диссертационной работе, автору принадлежит определяющая роль. Диссертант лично разрабатывал психоакустические модели, методы и критерии объективной оценки различных типов искажений, обрабатывал результаты ССЭ, выполнял анализ и обобщение полученных результатов. Научным руководителем д.т.н., профессором Ю.А.Ковалгиным, осуществлялся контроль и обсуждение получаемых результатов.

Структура и объем диссертационной работы.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка принятых сокращений, списка литературы и приложения.

Объем диссертации 149 страниц текста, 60 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 98 наименований, приложение на 6 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** проводится анализ актуальности темы работы и краткий обзор проблемы качества звучания и разработки технологии объективной оценки. Описаны цели работы, практическая ценность результатов, представлены выносимые на защиту положения.

Первая глава представляет собой обзор и анализ существующих объективных методов оценки качества звучания звукового оборудования. Рассмотрены различные типы искажений акустического сигнала, вносимые в исходный сигнал звуковыми трактами (ЗТ) и перечислены традиционные метрики количественной оценки вносимых ими искажений. Приведены основные принципы создания перцепционных методов объективной оценки качества (ПМООК) звучания, рассмотрены различные концепции построения таких методов. Сделан краткий обзор процессов, протекающих в слуховой системе человека, и перечислены основные принципы моделирования этих процессов. Обзор существующих методов объективной оценки качества (ООК) включает описание традиционных и перцепционных методов, анализируются их преимущества и недостатки. Подробно рассматривается один из наиболее широко распространенных ПМООК – РЕАQ, объясняются причины расхождения результатов субъективно-статистической экспертизы и рассчитанной с помощью РЕАQ оценки качества звучания. В заключение первой главы формулируются требования к разрабатываемому ПМООК и создаваемой на его основе программы оценки качества (ПОК).

Вторая глава включает в себя: анализ искажений, характерных для исследуемых ЗТ мобильных устройств; формирование набора искажений, вносящих наибольший вклад в деградацию качества музыкальных сигналов; разработку психоакустической модели МООК; критериев и алгоритмов вычисления количественных характеристик искажений; разработку метода пересчета полученных частных оценок слуховой заметности отдельных видов искажений в обобщенную оценку качества ЗТ.

В процессе воспроизведения музыкальных сигналов звуковыми трактами в оригинальный сигнал вносятся искажения следующих типов (в порядке снижения их влияния на оценку качества): частотные искажения (ЧИ); нелинейные искажения (НИ) гармонические и интермодуляционные искажения; динамические искажения (ДИ); переходные искажения (ПИ) и сдвиг частоты; фазовые искажения (ФИ) и прочие малозаметные факторы. По результатам проведенных исследований принято решение при разработке ПМООК ограничиться учетом частотных, нелинейных и динамических искажений, как наиболее характерных для ЗТ мобильных устройств.

Основная идея разрабатываемого МООК заключается в отдельной оценке искажений, вызванных разными факторами, с последующим объединением полученных дифференциальных оценок в обобщенную объективную оценку качества звучания одним числом. Таким образом, необходимо обеспечить моделирование слуховой заметности искажений различных типов для обеспечения возможности субъективного ранжирования искаженных сигналов по предпочтению. Также выбранные процедуры психоакустического анализа процесса восприятия (далее психоакустическая модель), используемые в работе, должны обеспечивать дифференцированную оценку искажений, вносимых в музыкальный сигнал звуковым трактом. Для этого необходимо обеспечить:

- точное выделение сигнала аддитивных шумов из тестового сигнала и возможность последующего сравнения образцов возбуждения, сформированных сигналом аддитивных шумов и порогом маскировки образованным «чистым» тестовым сигналом;
- оценку ширины полосы воспроизводимых частот;
- оценку равномерности АЧХ;
- оценку эффективного (воспринимаемого) ДД.

Как показывает опыт, нелинейные искажения по-разному влияют на субъективную оценку качества в зависимости от своей природы. Так, гармоники высоких порядков при очень незначительном энергетическом вкладе в сигнал искажений имеют определяющее значение при прослушивании, что делает задачу выделения сигнала нелинейных искажений крайне важной.

Для эффективного и точного выделения сигнала нелинейных искажений в случае одновременного присутствия искажений других типов был разработан специальный метод, объединивший в себе несколько различных подходов, применяемых при объективной оценке НИ. В основе предложенного метода лежит способ выделения сигнала искажений из искусственно созданного многотонального сигнала.

Как известно, величина и спектр нелинейных искажений, вносимых звуковыми трактами мобильных устройств, зависят от характеристик воспроизводимого ими музыкального сигнала. Следовательно, создаваемый многотональный сигнал должен обладать схожим спектральным

составом с оригинальным музыкальным сигналом, т.е. огибающая спектра искусственного сигнала должна соответствовать огибающей спектра исходного сигнала в каждый момент времени.

Разработанный в работе метод получения многотонального тестового сигнала в своей базовой части основан на процедурах обработки звуковых сигналов, применяемых в психоакустической модели 1, используемой в стандарте MPEG-1 ISO/IEC 11172-3.

В конце процедуры синтеза многотонального тестового сигнала создается его паспорт, который содержит информацию о длине выборки, наборе номеров (индексов) спектральных компонент и информацию о типе каждой компоненты (тональная или шумоподобная). Также, для удобства синхронизации записанного сигнала, прошедшего ЗТ мобильного устройства, с исходным перед многотональным тестовым сигналом и после него добавляются специальные тональные импульсы известной длины и частоты.

Результаты работы изложенного выше алгоритма создания многотонального тестового сигнала показаны на рисунке 1. Как видно (рисунок 1) спектры исходного и полученного многотонального тестового сигналов практически совпадают.

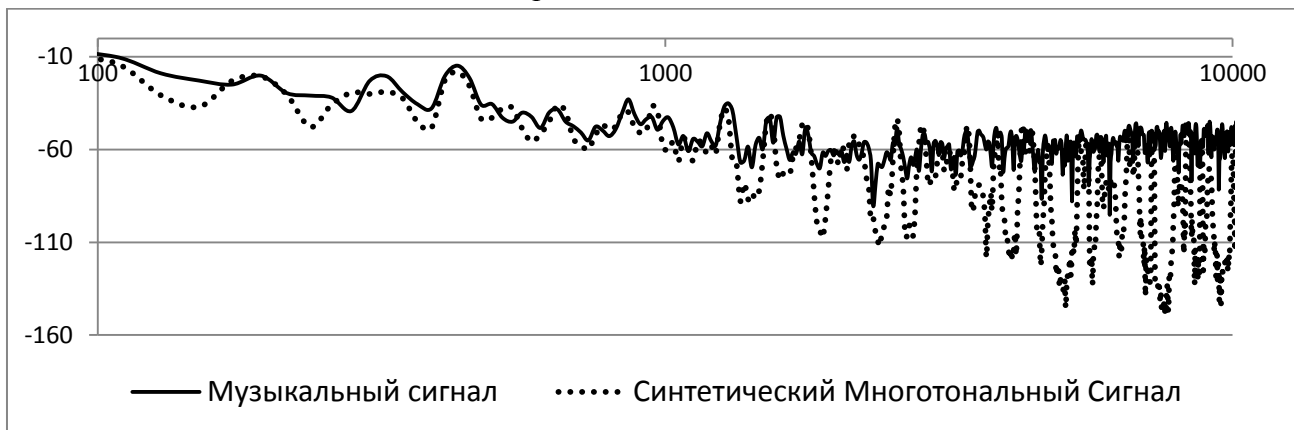


Рисунок 1 Сравнение спектров соответствующих выборок музыкального и искусственно созданного на его основе многотонального сигнала

Алгоритм выделения сигнала искажений, предлагаемый в данной работе, также опирается на использовании процедур обработки звуковых сигналов, применяемых в психоакустической модели 1 стандарта MPEG-1 ISO/IEC 11172-3. На рисунке 2 приведены графики глобального порога маскировки для произвольной выборки сигнала и спектр соответствующей выборки сигнала аддитивных шумов.

Используемый в работе метод обнаружения и слуховой оценки величины искажений в воспроизводимом акустическом сигнале мобильного устройства основан на процедурах, реализуемых в психоакустической модели PEAQ. Для его реализации отобраны выражения, заслуживающие наибольшего доверия. К их числу относятся:

- *отношение шум-маска в диапазоне частот (NMR_{band});*
- *относительное количество сильно искаженных выборок (RDF);*
- *средняя длительность искаженных блоков (ADB);*

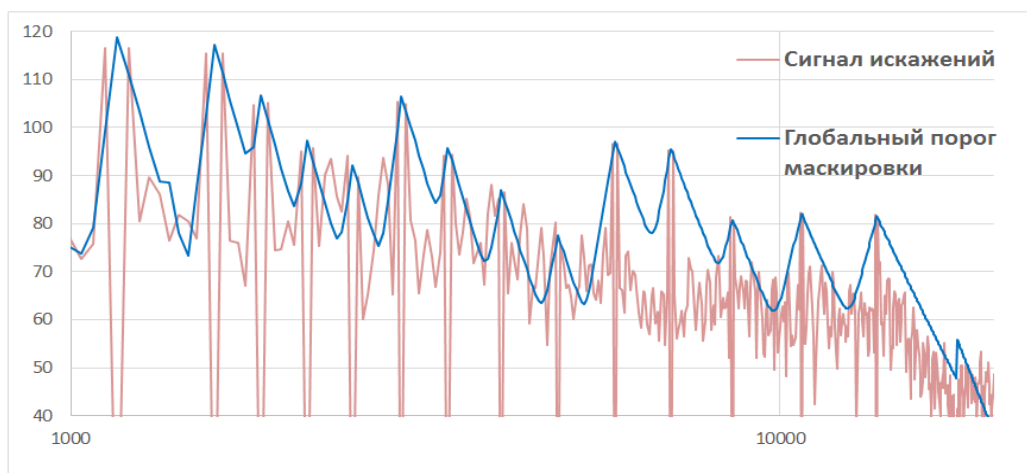


Рисунок 2 Глобальный порог маскировки и спектр сигнала аддитивных шумов для произвольной выборки записанного многотонального сигнала.

Разработанный в работе метод выделения сигнала нелинейных искажений из акустического сигнала мобильного устройства, на основе полученного многотонального сигнала, позволяет реализовать дифференцированный подход к задаче объективной оценки качества звучания. Наличие паспорта исходного сигнала, описывающего структуру многотонального сигнала, позволяет быстро и точно выделить компоненты, появившиеся в сигнале после прохождения через звуковой тракт тестируемого устройства, а применение классической психоакустической модели оценить слуховую заметность тех или иных компонент на фоне полезного сигнала и сигнала шумов помещения прослушивания. Дополнение классической психоакустической модели разделом анализа природы слышимых аддитивных шумов позволяет проводить более точную оценку субъективного восприятия искажений, превышающих порог маскировки. Это, в свою очередь, позволяет повысить корреляцию между объективной и субъективной оценками качества работы звуковых трактов мобильных устройств.

Особенности конструкции мобильных устройств предполагают установку одного широкополосного громкоговорителя. Нижняя граница эффективного диапазона воспроизводимых частот составляет в зависимости от класса устройства от 100 Гц для портативных Bluetooth колонок до 400 Гц для мобильных телефонов. Верхняя граница, соответственно составляет 15 кГц и 12 кГц.

Частотный диапазон обычно разделяют на несколько поддиапазонов с точки зрения восприятия музыкального материала. В данной работе используется разделение на следующие частотные диапазоны: диапазон низких частот Z_1 (до 260 Гц), диапазон низких средних Z_2 (260-900 Гц) и высоких средних Z_3 (900-4400 Гц), диапазоны высоких Z_4 (4,4-9,5 кГц) и сверхвысоких частот Z_5 (>9,5 кГц).

Для оценки частотных искажений используются два типа референсных сигналов: первый тип - линейно-частотно-модулированный сигнал с уровнем -6 dBFS и диапазоном частот от 100 Гц до 14 кГц или белый шум с уровнем 0 dBFS; второй тип - репрезентативный набор фрагментов из реальных музыкальных композиций, используемых при проведении ССЭ.

При анализе искажений на втором типе тестовых сигналов производится подстройка уровня сигнала с целью добиться равного значения средней громкости для тестового и референсного сигналов.

Для связи субъективного восприятия частотных искажений музыкального сигнала с объективными характеристиками искажений было принято решение воспользоваться изменениями величины энергии тестового сигнала относительно референсного сигнала в каждом из частотных диапазонов. При анализе сигнал разбивается на выборки длительностью 2048 отсчетов и для каждой выборки сигнала вычисляется разница между энергиями референсного и тестового сигналов, приходящимися на соответствующие критические полосы слуха (КПС).

Для вычисления энергии в полосе частот используется формула (1):

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

Здесь и ниже n – номер выборки, Z_i – анализируемый частотный диапазон, $X(k)$ – энергия спектральных компонент выборки в дБ.

Разница в удельной энергии между референсным и тестовым сигналами в анализируемой полосе частот вычисляется по формуле (2):

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

Соответственно необходимо вычислить 5 выходных переменных, характеризующих разницу в удельных громкостях для выделенных диапазонов частот: dE_{Low} , dE_{LowMid} , dE_{Mid} , dE_{High} , dE_{UHigh} .

Неравномерность АЧХ внутри выбранных 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.

При расчете неравномерности АЧХ звукового тракта мобильного устройства удобнее использовать референсный сигнал первого типа. Как следует из опыта, на субъективную оценку влияют отклонения АЧХ от среднего уровня как в сторону усиления отдельных частот, так и в сторону ослабления. Целевой (идеальной) АЧХ в нашем случае является плоская АЧХ.

В качестве критерия для оценки влияния неравномерности АЧХ на слуховое восприятие ЗС было решено использовать величину среднего отклонения, вычисляемую по формуле (3):

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

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

Для оценки динамических искажений (ДИ) вычисляется распределение громкости референсного и тестового сигналов во времени (на основе рекомендации МСЭ-R BS.1770-3). 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 для оценки влияния ДИ на качество воспроизведения являются разница между диапазоном громкости тестового и референсного сигналов, а также разница в значениях пик-фактора.

Все предложенные выше механизмы оценки различных искажений основаны на учете особенностей (механизмов) функционирования слуховой системы и, в конечном итоге, позволяют, используя метод множественной линейной регрессии, перейти к обобщённой оценке качества исследуемого сигнала одним числом. При этом получаемая обобщенная оценка качества звучания тестируемого устройства должна с достаточной степенью точности совпадать с результатами ССЭ, т.е. с субъективной оценкой, для которой, как известно, применяется бальная шкала деградации качества.

На вход разрабатываемой модели поступают 14 величин (количественных характеристик искажений), которые имеют прямую связь с восьмью частными оценками качества, образующими первый слой частных оценок качества (качественных характеристик) $x[i]$ (рисунок 3).

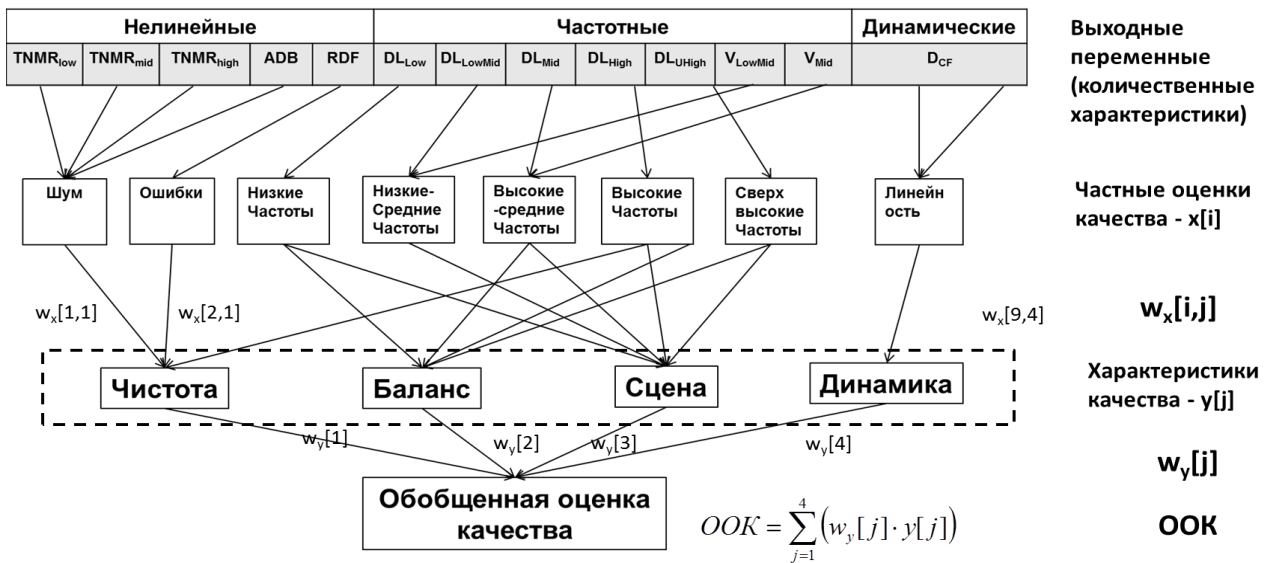


Рисунок 3 Схема отображения нескольких выходных величин к оценке качества звучания одним числом.

Зависимости между количественными характеристиками искажений и частными оценками качества находятся в результате обработки данных ССЭ.

Второй слой образуют узлы, которые можно связать с составляющими субъективной оценки – балансом, динамикой, чистотой и сценой.

Выходным значением модели является объективная оценка качества (ООК) получаемая как взвешенная сумма частных характеристик качества.

Для установления связей между простыми качественными оценками искажений и характеристиками качества ($w_x[i,j]$), а также между характеристиками качества и ООК ($w_y[j]$)

было принято решение использовать алгоритм функции отображения, построенный на основе множественной регрессионной модели.

Третья глава содержит описание программно-аппаратного комплекса для проведения исследований ЗТ мобильных устройств, анализа полученных результатов и предсказания субъективной оценки качества. Обобщенная схема ПОК приведена на рисунке 4.

Ядром комплекса является программа оценки качества (ПОК) – AQuA (Audio Quality Assessment – оценка качества звука) предназначенная для работы в операционной системе Windows. Данная программа включает в себя: набор пользовательских интерфейсов, реализованных в различных окнах, позволяющих проводить объективную оценку качества звуковых трактов на основании вычисления выходных переменных модели и подготовленного набора весовых коэффициентов; управлять процессом воспроизведения референсных фонограмм и записью тестовых фонограмм, вызовом процедур объективного анализа тестовых фонограмм, получением результатов анализа, их хранением и обеспечением доступа к данным. Также обеспечивается доступ к базе данных референсных фонограмм и базе данных записанных тестовых сигналов. Для удобства анализа результатов осуществляется импорт результатов анализа в таблицы Excel.

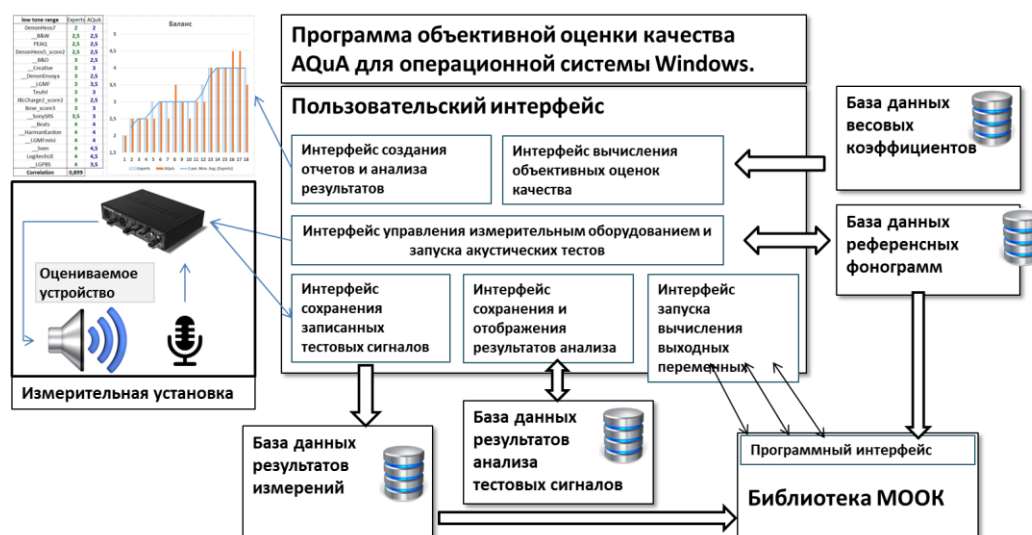


Рисунок 4 Обобщенная схема ПОК AQuA.

Четвертая глава содержит описание процедур настройки и тестирования перцепционного MOOK.

Субъективная оценка качества (СОК) тестируемого ЗТ мобильного устройства вычисляется на основе субъективных оценок, полученных для частных характеристик качества: чистоты звучания, баланса, сцены и динамики и представляет собой взвешенную сумму этих характеристик (рисунок 1).

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

Испытания проводились на базе акустической лаборатории филиала корпорации LG Electronics inc. в Санкт-Петербурге. В качестве экспертов выступали сотрудники 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 они были представлены в формате Windows PCM, частота дискретизации 44,1 кГц и разрядность 16 бит/отсчет. Шкала оценки качества, используемая в ПОК, соответствует пятибалльной шкале ССЭ. При этом получаемые объективные оценки качества лежат в интервале от 1 до 5 баллов, где оценка 1 балл соответствует наиболее предпочтительному качеству звучания, а оценка 5 баллов соответствует звучанию, оцененному как наиболее плохое для представленного набора тестовых фонограмм.

Оценка частотных искажений основана на идее исследования зависимостей качества звучания от вносимых искажений отдельно для каждого частотного диапазона. Для этих целей с помощью инструмента Adobe Audition 6.0 был разработан набор фильтров, моделирующих частотные искажения в анализируемых диапазонах частот. Далее указанными фильтрами были обработаны музыкальные фонограммы и полученный набор таких тестовых фонограмм был предложен экспертам для прослушивания. Полученные тестовые фонограммы воспроизводились с помощью высококачественного звукового тракта класса Hi-End (Bowers & Wilkins CM series CM9 S2).

На первом этапе экспертам предлагалось ранжировать фонограммы, имеющие определенную разницу в одном из частотных диапазонов, по предпочтительности звучания. Ниже (рисунок 5) приведены графики и аппроксимации зависимостей субъективных оценок от величины разницы энергии (2) в соответствующей полосе частот.

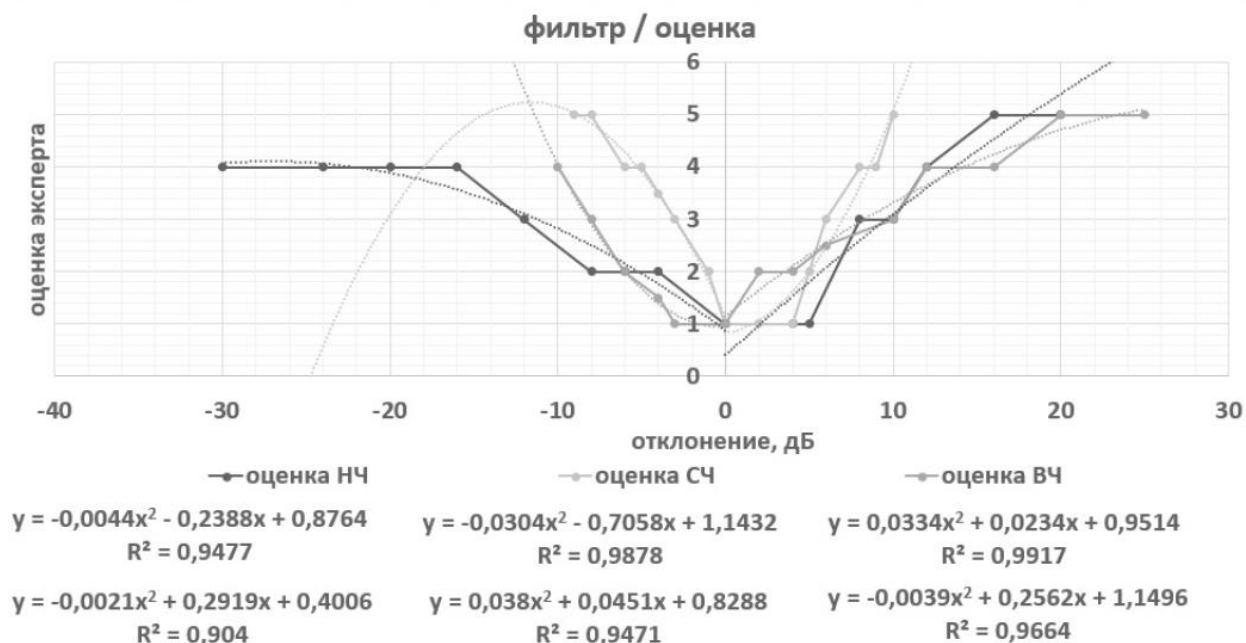


Рисунок 5 Зависимости экспертных оценок от величины ЧИ в отдельной полосе частот и их аппроксимации полиномами 2-й степени

На втором этапе для оценки влияния неравномерности АЧХ ЗТ мобильных устройств на качество звучания был подготовлен набор сигналов, различающихся величиной среднего отклонения АЧХ в выбранном диапазоне. В результате экспериментов было установлено, что незначительное влияние на качество звучания оказывает только неравномерность АЧХ в диапазоне средних частот. 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} .

На третьем этапе эксперты оценивали звучание фонограмм имеющих разницу в уровне энергий в нескольких диапазонах частот одновременно. Всего было подготовлено около 50 различных комбинаций. Перед началом субъективного тестирования референсные фонограммы были выравнены по громкости, а после завершения субъективных тестов, оцениваемые фонограммы были масштабированы таким образом, чтобы усредненные уровни энергии в полосе частот от 300 Гц до 4 кГц совпали с усредненным уровнем энергии референсного сигнала. Затем для каждой фонограммы были рассчитаны величины разницы энергии в каждом из оцениваемых поддиапазонов и подстановкой в формулы зависимости субъективной оценки от величины разницы энергии в соответствующей полосе частот получены частные оценки качества: оценка низких частот - Bal_{Low} , оценка низких средних частот - Bal_{LowMid} , оценка высоких средних частот - $Bal_{HighMid}$, оценка высоких частот - Bal_{High} и оценка сверхвысоких частот - Bal_{UHigh} .

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

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

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 диапазоне частот dE_i (рисунок 6), W_i – весовой коэффициент для i -го диапазона, i – номер диапазона.

После завершения ССЭ на основе полученных результатов с помощью метода множественной регрессии были получены значений весовых коэффициентов:

- Низкие частоты: 0,41
- Низкие средние частоты: 0,18;
- Высокие средние частоты: 0,25;
- Высокие частоты: 0,11;
- Сверхвысокие частоты: 0,05;

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

Для оценки нелинейных искажений был сформирован набор музыкальных сигналов, которые воспроизводились тестируемыми устройствами в заглушенной камере. В результате для последующего анализа и оценки были отобраны около 50 наборов записей. Для исключения влияния частотных искажений, вносимых оцениваемыми устройствами, на субъективную оценку качества, все полученные записи были приведены к единой АЧХ. Затем все полученные

записи были выравнены по громкости и приведены к уровню 80 дБ (согласно рекомендации ITU-R 1770.2) для всех сессий ССЭ. Записи воспроизводились с использованием высококачественных головных телефонов Sennheiser HD800, имеющих крайне низкий уровень нелинейных искажений по сравнению с тестируемыми устройствами.

ССЭ осуществлялась методом парных сравнений: эксперты оценивали звучание тестовых сигналов в каждой паре с точки зрения слышимости нелинейных искажений и их влияния на субъективное предпочтение. Полученный массив записей был отсортирован в порядке возрастания субъективной оценки, затем полученные результаты обработаны для получения весовых коэффициентов.

При тестировании разработанного метода удалось обеспечить корреляцию результатов ССЭ и объективной оценки выше 0,85. Высокая корреляция субъективных и объективных оценок подтверждает правильность выбранной психоакустической модели и эффективность разработанного метода оценки влияния нелинейных искажений на качество звучания.

Оценка влияния ДИ на качество звучания проводилась аналогичным образом с помощью моделирования ДИ инструментом Adobe Audition. Результаты исследования показали значительное влияние динамических характеристик референсной фонограммы на зависимость качества звучания от величины ДИ.

На заключительном этапе исследований проводилась комплексная оценка качества работы ПМООК. Были проведены ССЭ референсных устройств, при этом для подтверждения независимости полученных результатов от характеристик референсных фонограмм, исследование влияния отдельных видов искажений на качество звучания проводилось на фонограммах, отличных от используемых при проведении ССЭ.

С целью определения степени совпадения объективных и субъективных оценок были рассчитаны 95% доверительные интервалы, средняя квадратичная ошибка, коэффициент корреляции. Полученные результаты приведены на рисунке 6.

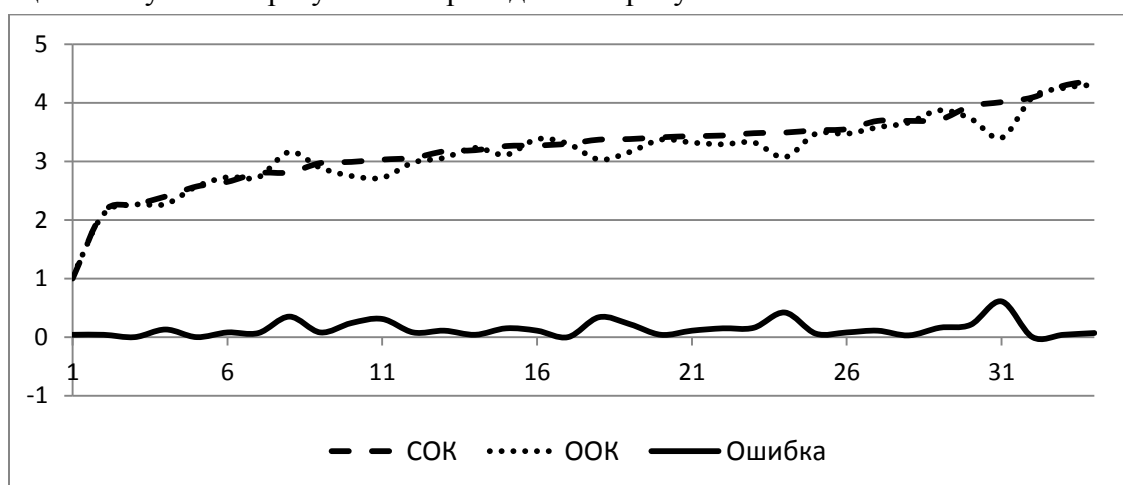


Рисунок 6 Результаты тестирования ПМООК АQuA

Значения абсолютных отклонений в 100% случаев являются меньшими, чем доверительный интервал данных СОК. В свою очередь средняя квадратичная ошибка, составляющая 0,2 балла, является меньшей, чем средний доверительный интервал для данных, полученных при СОК, который равен 0,62 балла. Выбросов (случаев отклонения результатов

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. Значение средней квадратичной ошибки, вычисленное в ходе сравнения субъективных и объективных оценок качества отдельных характеристик звучания, (0,29 балла) также не превышает усредненный доверительный интервал ССЭ для отдельных характеристик звучания (0,71 балла). Коэффициент корреляции, вычисленный для 34 пар данных СОК и ООК, составил около 0,92.

Полученных данных достаточно, чтобы судить о достоверности получаемых с помощью ПОК результатов ООК звучания звуковых трактов мобильных устройств.

Заключение содержит выводы по результатам работы, формулировку основных научных и практических результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Целью настоящей работы являются разработка перцепционного метода объективной оценки качества звучания, обеспечивающего высокую корреляцию результатов объективной оценки с данными ССЭ. Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

1. Подобраны, проработаны и проанализированы публикации и нормативные документы, посвященные проблеме оценки качества звукового оборудования. Изучены современные субъективные и объективные методы контроля качества воспроизведения звуковых сигналов, а также наиболее распространенные варианты их реализаций. Особое внимание уделено получившим в настоящее время широкое распространение алгоритмам оценки качества звучания, построенным на основе учета психоакустических свойств слуха.

2. Выявлены основные типы искажений, вносимых в воспроизводимые сигналы ЗТ мобильных устройств, разработаны критерии для оценки влияния каждого из выявленных искажений на слуховое восприятие. Изучены различные концепции построения перцепционных методов объективной оценки качества звукового оборудования, предложена и обоснована идея отдельной оценки искажений различных типов с последующим переходом к обобщенной оценке качества одним числом.

3. На основе всестороннего изучения проблемы влияния нелинейных искажений (НИ) на качество звучания предложен оригинальный метод, позволяющий эффективно выделять сигнал НИ из тестового сигнала, оценивать распределение энергии НИ по спектру и учитывать психоакустические закономерности слухового восприятия. В разработанном методе объективной оценки НИ, возникающих в звуковых трактах мобильных устройств, реализованы: новый метод создания испытательного многотонального сигнала с требуемыми спектральными и энергетическими характеристиками, метод кратковременного спектрального анализа сигналов с помощью БПФ, учёт эффектов маскировки, собственных шумов и передаточной характеристики слуховой системы человека. Количественной оценке подвергаются: соотношение шум-маска для разных частотных диапазонов, относительное количество сильно искаженных ЗТ фрагментов оцениваемого сигнала и вероятность обнаружения искажений.

4. Разработан метод объективной оценки частотных искажений (ЧИ), основанный на учете разницы между энергиями референсного и тестового сигналов для выбранных диапазонов частот, а также степень неравномерности АЧХ в отдельных частотных диапазонах.

5. Разработан метод оценки влияния динамических искажений (ДИ) на качество восприятия звуковых сигналов на основе учета изменения громкости тестовых сигналов во времени. Выбрана и обоснована количественная характеристика ДИ – разница в величинах усредненного значения пик-фактора референсного и тестового сигналов. Получена формула для пересчета выбранной характеристики ДИ в количественную характеристику качества звучания.

6. Разработан перцепционный метод обобщенной объективной оценки качества звучания ЗТ мобильных устройств одним числом и на его основе реализован программно-аппаратный комплекс для оценки их качества.

7. Проведены испытания разработанной программы оценки качества (ПОК) с целью определения степени достоверности получаемых с её помощью результатов. Сравнение объективных оценок с соответствующими результатами ССЭ позволило судить о степени их достоверности. Коэффициент корреляции между субъективными и объективными оценками качества для частных критериев составил: баланс – 0,92; чистота – 0,91; динамика – 0,89; сцена – 0,91; для обобщенной оценки качества около 0,92. Средняя квадратичная ошибка составила 0,2 балла, что не превышает средний доверительный интервал субъективных оценок качества, который равен 0,63 балла. Случаев явного расхождения объективных и субъективных оценок качества не зафиксировано.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из списка ВАК РФ

1. Пахомов М.О. Мультитональный испытательный сигнал для оценки слышимости нелинейных искажений / М.О. Пахомов, Ю.А. Ковалгин, В.С. Рожнов // Системы управления и информационные технологии. 2016. - Т.63. - №1. сс.72-78.

2. Пахомов М.О. Метод объективной оценки слышимости нелинейных искажений / М.О. Пахомов, В.С. Рожнов // Системы управления и информационные технологии. 2016. - Т.64. №2. сс.72-78.

3. Пахомов М.О. Метод и результаты объективной оценки качества звуковых тратов мобильных устройств / М.О. Пахомов, Ю.А. Ковалгин, В.С. Рожнов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки» 2017. - № 3-4. сс. 27-36.

Статьи в материалах конференций

4. Pahomov M. Method for Objective Evaluation of Nonlinear Distortion // Presented at the 139th AES Convention 2015 October 29–November 1, New York, USA

5. Pahomov M. Improving the Sound Balance with Dynamic Control of Membrane Excursion // Presented at the 141st AES Convention 2016 September 29–October 2, Los Angeles, USA

6. Пахомов М.О., Программное обеспечение для оценки качества воспроизведения звука мобильными устройствами // VI Международная НТК «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», СПб., СПбГУТ им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, 3-4 марта 2015 года;