

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИЧЕСКИХ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ НА СЛУХОВУЮ ЗАМЕТНОСТЬ ПЕРЕХОДНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

М.О. Пахомов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал корпорации LG Electronics Inc.

Санкт-Петербург, 191123, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: mpakhomov39@gmail.com

## Информация о статье

УДК 621.391.832.43

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Пахомов М.О. Исследование влияния электромеханических характеристик динамических громкоговорителей на слуховую заметность переходных искажений // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 1. С. 31–40. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-1-31-40

**Аннотация:** Исследователи и разработчики акустических систем в основном обращают внимание на два наиболее заметных с точки зрения слухового восприятия типа искажений, вносимых в акустический сигнал звуковыми трактами – частотные и нелинейные. Эффект переходных искажений, проявляющийся в субъективных тестах прослушивания при сравнении динамических громкоговорителей с совпадающими амплитудно-частотными характеристиками и отсутствием слышимых нелинейных искажений, до сих пор недостаточно описан в научных работах. В настоящей исследовании проведены объективные измерения динамических громкоговорителей и сформулировали субъективные признаки качества звучания для определения степени влияния электромеханических характеристик громкоговорителя на восприятие переходных искажений. Также в представленной работе сделана попытка определить количественные отношения между этими характеристиками и субъективными оценками.

**Ключевые слова:** электродинамические громкоговорители, параметры Тилля-Смолла, переходные искажения, время атаки, пик-фактор, воспринимаемый динамический диапазон.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Слушатели часто используют такие определения звучания как тонкий, гулкий, яркий или тусклый, чистый или мутный и т. д., чтобы выразить субъективное восприятие качества звучания. Но что стоит за этими прилагательными, и можно ли предсказать описание звука динамического громкоговорителя исходя из знания его объективных характеристик? Эти термины описывают некоторые свойства громкоговорителя, которые будем называть динамическими характеристиками. Субъективные характеристики звука зависят от количества и характера динамических и переходных искажений, которые также зависят от способности громкоговорителя воспроизводить отношение (установленное в исходном сигнале) между среднеквадратическими и пиковыми значениями в эффективном динамическом и частотном диапазоне [1].

Известно, что музыкальный сигнал содержит низкочастотные сигналы разной длительности, например, звук органа, трубы и бас-барабана. Также известно, что точность воспроизведения этих звуков различными динамическими преобразователями будет разной: звук органа будет воспроизводиться достаточно точно, в то время как короткий удар басового барабана будет искажаться во временной области. Воспроизведение сигналов других музыкальных инструментов, чьи спектры и динамические характеристики имеют промежуточные значения, будет происходить с большей или меньшей точностью.

Целью данного исследования является определение набора электромеханических характеристик, которые оказывают наибольшее влияние на переходные искажения, и получение зависимостей между этими характеристиками и субъективными показателями качества.

## 2. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРИЧИНЫ ПЕРЕХОДНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

### 2.1. Теоретические предпосылки

Типичным примером управляемых затухающих гармонических колебаний является движение подвижной части электродинамического громкоговорителя [2]. Хорошо известна модель последнего с сосредоточенными параметрами, колебательное движение которой математически описывается неоднородными линейными дифференциальными уравнениями второго порядка:

$$M_{ms} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + R_m \frac{dx(t)}{dt} + K_m x(t) = Bl i(t), \quad (1)$$

$$L_e \frac{di(t)}{dt} + R_e i(t) + Bl \frac{dx(t)}{dt} = e(t), \quad (2)$$

где  $L_e$  – электрическая индуктивность;  $R_e$  – электрическое сопротивление;  $M_{ms}$  – масса подвижной системы;  $K_m$  – механическая жесткость;  $R_m$  – механическое сопротивление;  $Bl$  – силовой фактор.

Данные уравнения обеспечивают очень точные оценки отклонения звуковой катушки при условии, что указанные электромеханические параметры являются постоянными.

В конечном итоге решение неоднородного дифференциального уравнения является суммой общего решения связанного однородного уравнения (переходного решения) и частного решения (стационарного решения) неоднородного уравнения и может быть записано в виде:

$$x(t) = x_{g.h.}(t) + x_{p.n.}(t), \quad (3)$$

где  $x_{g.h.}$  – общее однородное решение;  $x_{p.n.}$  – частное неоднородное решение.

Решения этих уравнений хорошо известны, поэтому приведем только полученные выражения. Общее решение однородного дифференциального уравнения – это решение уравнения затухающих колебаний (правая часть уравнения равна нулю). Общим однородным решением является:

$$x_{g.h.}(t) = e^{-\beta \omega_0 t} (c_1 \cos(\omega_d t) + c_2 \sin(\omega_d t)), \quad (4)$$

где  $\omega_0$  – резонансная частота; константы  $c_1$  и  $c_2$  определяются из начальных условий; коэффициент демпфирования  $\beta = \frac{R_m}{2\sqrt{K_m M_{ms}}}$ ;  $\omega_d$  – собственная частота с учетом демпфирования, вычисляемая как:

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (5)$$

Общее решение состоит в том, что экспоненциально убывающая функция с коэффициентом затухания  $\beta$  не зависит от функции воздействия.

Частным неоднородным решением являются вынужденные колебания угловой частоты  $\omega$ , равной частоте движущей силы:

$$x_{p.n.}(t) = A_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (6)$$

где  $A_0$  – амплитуда вынужденных колебаний;  $\omega$  – частота возбуждения;  $\varphi$  – фазовый сдвиг между смещением и возбуждением.

Кроме того,  $\beta$  определяет амплитуду колебаний  $A_0$  (7) на частотах вблизи резонанса и разность фаз  $\varphi_z$  (8) между возбуждающей силой и положением генератора:

$$A_0 = \frac{F_0}{M_m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\beta\omega)^2}}, \quad (7)$$

$$\varphi_z = \arctg \left( Q \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right), \quad (8)$$

где  $F_0(t) = Bl \cdot i(t)$  – возбуждающая сила.

Чтобы амплитуда колебаний достигла величины  $A_0$  (7), колебательной системе необходимо передать энергию, равную полной энергии  $E_T$  при этой амплитуде:

$$E_T = E_P + E_K = \frac{M_{ms} A_0^2 \omega^2}{2} \cos^2(\omega t + \varphi_0) + \frac{M_{ms} A_0^2 \omega^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi_0) = \frac{M_{ms} A_0^2 \omega^2}{2}, \quad (9)$$

где  $E_P$  – потенциальная энергия;  $E_K$  – кинетическая энергия колебательной системы.

Время, необходимое для этого, помимо величины тока, протекающего через звуковую катушку, также зависит от отношения  $Bl/M_{ms}$ . Часто это отношение называют фактор ускорения.

Переходные процессы в колебательных системах определяются общим решением однородного уравнения, которое определяется величиной затухания в системе. В случае с электродинамическими громкоговорителями нас в первую очередь интересует, как его механическая  $Q_{ms}$ , электрическая  $Q_{es}$  и полная добротность  $Q_{ts}$ , силовой фактор  $Bl$  и масса подвижной системы  $M_{ms}$  влияют на воспроизведение сигналов с коротким временем атаки.

### 2.2. Расхождение в результатах вычислений параметров Тиля-Смолла

В «аналоговую эру» многие исследователи замечали, что измеренные характеристики электродинамического громкоговорителя меняются в зависимости от параметров тестового сигнала. В 1980–90-х годах проводились исследования для изучения зависимости формы и параметров кривой импеданса от скорости увеличения частоты сигнала синусоидальной развертки [3, 4]. Тогда акустические измерения проводились с использованием аналоговых устройств, например, картографов В&К и RFT. Было отмечено, что в то время как сигнал развертки проходил область основной резонансной частоты громкоговорителя  $F_s$  с разными скоростями, форма и параметры кривой полного сопротивления громкоговорителя изменялись в пределах нескольких процентов (рисунок 1).

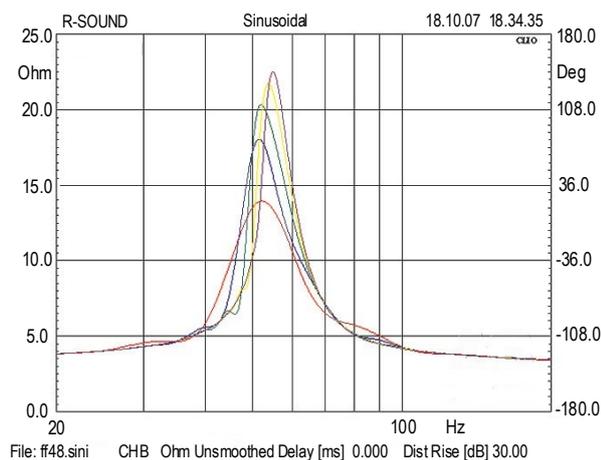


Рис. 1. Аналоговые измерения кривых импеданса для 8-дюймового мидбаса

На рисунке 1 показан набор кривых импеданса, полученных для 8-дюймового среднечастотного громкоговорителя при различных настройках скорости изменения частоты сигнала развертки. Этот параметр, выраженный временем прохождения диапазона частот 10–10000 Гц, варьировался от 30 до 0,3 с. Самая высокая кривая на графике соответствует наибольшему времени прохождения, самая низкая кривая – наименьшему времени прохождения, соответственно. Разница в результатах определяется вкладом решений уравнения в результирующую амплитуду смещения. В длинном сигнале основной вклад в амплитуду колебаний вносит частное неоднородное решение (6), и пик близок к частоте  $\omega_0$ , когда используется короткий сигнал, похожий на импульс, основной вклад вносит общее однородное решение (4) с пиком на частоте  $\omega_d$ . Разница в форме кривой обусловлена различием добротности системы  $Q_{ts}$ . В случае короткого импульса  $Q$  системы в основном определяется величиной  $Q_{es}$ . В случае длинного сигнала подвижная часть успевает раскачаться до амплитуды, определенной уравнением (6), и  $Q_{ms}$  начинает вносить значительный вклад.

Поэтому для обнаружения и измерения переходных искажений во время тестов прослушивания нам необходимо использовать сигналы, близкие в их временной форме к импульсным сигналам.

Ниже будет показано влияние физических параметров динамического преобразователя на излучаемый им звук и предложены количественные характеристики, рассчитанные на основе излучаемых акустических сигналов, для оценки переходных процессов.

### 3. ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИЗМЕРЕНИЙ

Для проведения экспериментов и измерений необходимо подготовить набор тестовых электродинамических громкоговорителей, измерить их электрические и механические характеристики, выбрать тестовые сигналы для оценки акустиче-

ского отклика динамических преобразователей и для тестов прослушивания. Также необходимо определить атрибуты качества звука, описывающие субъективное восприятие переходных и динамических искажений, выбрать опытных слушателей и провести тесты прослушивания.

Для этого исследования были выбраны десять громкоговорителей разных производителей, которые охватывают широкий спектр электрических и механических параметров. Преобразователи этого класса играют важную роль в воспроизведении звука в широком диапазоне от 60 Гц до 4 кГц. Кроме того, они имеют резонанс в диапазоне 60–80 Гц, который соответствует резонансу ударных инструментов: басового барабана и малого барабана. Эти инструменты отвечают за динамику музыкального произведения и имеют короткое время атаки и затухания.

#### 3.1. Измерение электромеханических и частотных характеристик

Выбранные преобразователи были тщательно проанализированы с помощью программно-аппаратного комплекса Klippel R&D. Результаты измерений для выбранных моделей динамических преобразователей приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Основные характеристики выбранных громкоговорителей

№	$F_s$	$Q_{ms}$	$Q_{ts}$	$M_{ms}$	$BI$	$BI/M_{ms}$
1	73,3	4,8	0,75	13,3	4,95	0,37
2	61,1	3,9	0,54	14,9	5,7	0,38
3	64,3	14,5	0,72	15,1	3,84	0,25
4	94,9	9,62	1,2	9,38	2,84	0,3
5	88,1	12,7	1	12,9	3,8	0,3
6	78,6	8,96	1,67	9,01	2,76	0,3
7	82,8	6,72	1,75	7,86	2,47	0,31
8	74,5	7,62	0,88	13,3	3,43	0,26
9	87,5	7,34	1,3	8,76	3,22	0,37
10	82,4	7,38	1,53	10,6	3,06	0,29

Таблица 1 показывает, что выбранные модели электродинамических громкоговорителей обеспечивают широкий разброс значений основных электрических и механических характеристик. Например, разброс значений механической добротности составляет от 3,9 до 14,5, а разброс масс подвижной системы составляет от 7,9 до 15,1 г. В то же время фактор ускорения имеет гораздо меньший относительный разброс: от 0,25 до 0,38. Резонансные частоты выбранных образцов находятся в диапазоне от 61 до 95 Гц.

Выбранные преобразователи были установлены в одном корпусе с задним объемом 30 л, после чего измерялись их частотные характеристики. Сводная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) образцов представлена на рисунке 2.

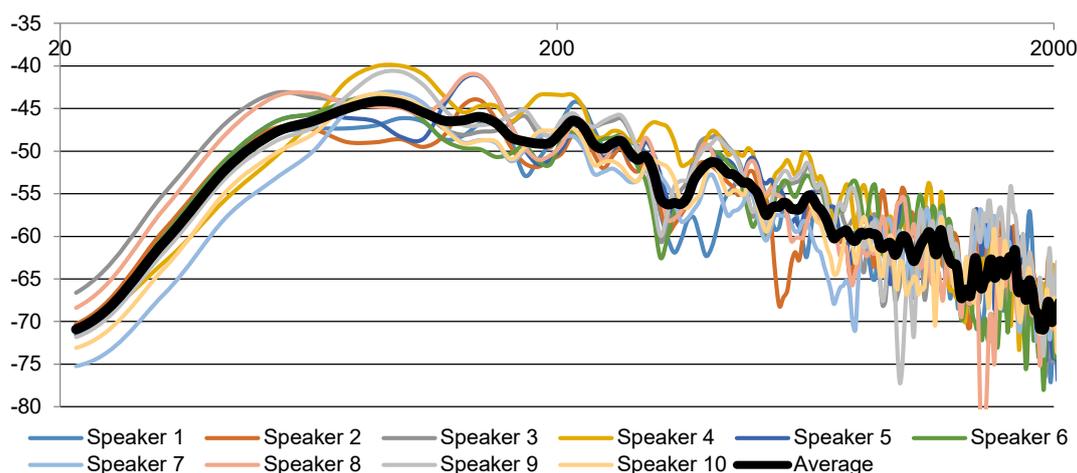


Рис. 2. АЧХ (в том числе, усредненная – Average) выбранных образцов (Speaker 1–10)

### 3.2. Атрибуты для объективной оценки

Как было упомянуто выше, заметность переходных искажений зависит от временной формы сигнала, то есть от того, насколько быстро уровень сигнала изменяется во времени. Однако легко заметить, что сигнал также изменяется в частотной области, и эти изменения наиболее заметны, когда частота возбуждения меньше, чем резонансная частота колебательной системы. В случае коротких сигналов основной вклад в амплитуду смещения вносит общее однородное решение (4). Колебания возникают на частоте  $\omega_d$  (5), которая отличается (в общем случае) от частоты возбуждающего воздействия.

Для количественной оценки переходных искажений, вносимых в сигнал громкоговорителями, было решено использовать следующие характеристики сигнала [5]:

- частота, соответствующая максимуму АЧХ сигнала;
- динамический диапазон;
- пик-фактор;
- продолжительность импульса.

### 3.3. Выбор тестовых сигналов

Для количественного анализа переходных искажений было решено использовать акустические сигналы, создаваемые ударными музыкальными инструментами: большими и маленькими барабанами. Эти сигналы имеют короткое время атаки, большой динамический диапазон. Энергия сигнала сосредоточена в узком диапазоне, который включает в себя резонансные частоты тестируемых образцов [6].

Всего было выбрано четыре разных сигнала. Три сигнала имеют максимальную энергию на частотах около 60 Гц и разную длительность. Четвертый сигнал имеет максимальную энергию на частоте 127 Гц, а также очень короткое время атаки и затухания. Интересующие нас характеристики сигнала приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Характеристики тестовых сигналов

Характеристики	№ образца			
	1	2	3	4
Динамический диапазон, дБ	16,5	18,5	12,3	22
Частота максимума энергии, Гц	55	52	65	127
Длительность, мс	400	250	100	50
Пик-фактор, дБ	12	11	10	12

В исследованиях также использовался искусственный сигнал – последовательность тоновых импульсов 40–120 Гц с шагом 10 Гц. Каждый импульс имел длительность 10 периодов и постоянную амплитуду (рисунок 3).

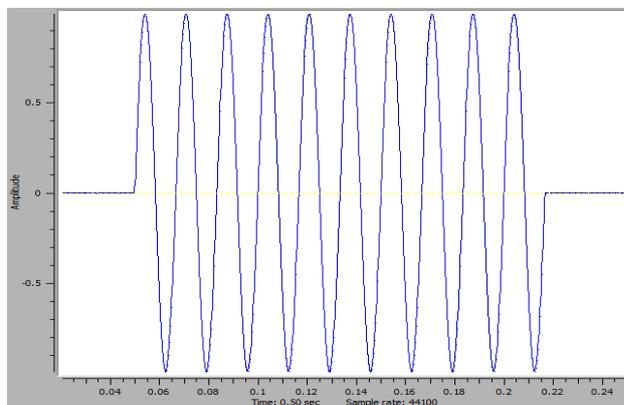


Рис. 3. Временная форма тонального импульса 60 Гц

Для тестов прослушивания был подготовлен набор музыкальных программ с преобладанием ударных инструментов, высоким пик-фактором и максимумом звуковой энергии в диапазоне 40–90 Гц [6]. Фонограммы, отобранные для тестов прослушивания, и их основные характеристики приведены в таблице 3.

Из таблиц 2 и 3 следует, что выбранные тестовые сигналы и музыкальные программы для прослушивания тестов близки по своим основным характеристикам.

**ТАБЛИЦА 3. Музыкальные программы и их основные характеристики**

Название	Тип	Частота максимума энергии $F_0$ , Гц	Длительность импульсов, мс	Пик-фактор импульсов, дБ
Michael Jackson «Billie Jean»	Electric bass	65, 127	300, 80	30
Yim Hok Man «Poem of Chinese Drum»	Big Drum slam	60	600	14
Black Eyes Peas «Boom Boom Pow»	Electric bass	70	280	13

#### 4. МЕТОД ТЕСТОВ ПРОСЛУШИВАНИЯ

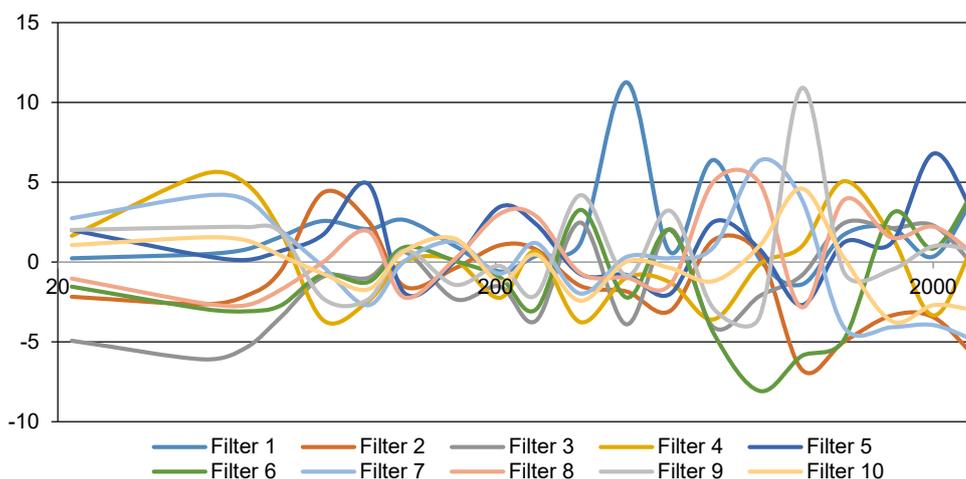
##### 4.1. Выравнивание амплитудно-частотной характеристики

Как показано на рисунке 1, выбранные модели имеют некоторые различия в частотных характеристиках. Разницу было решено компенсировать, предварительно обработав тестовые программы в Adobe Audition.

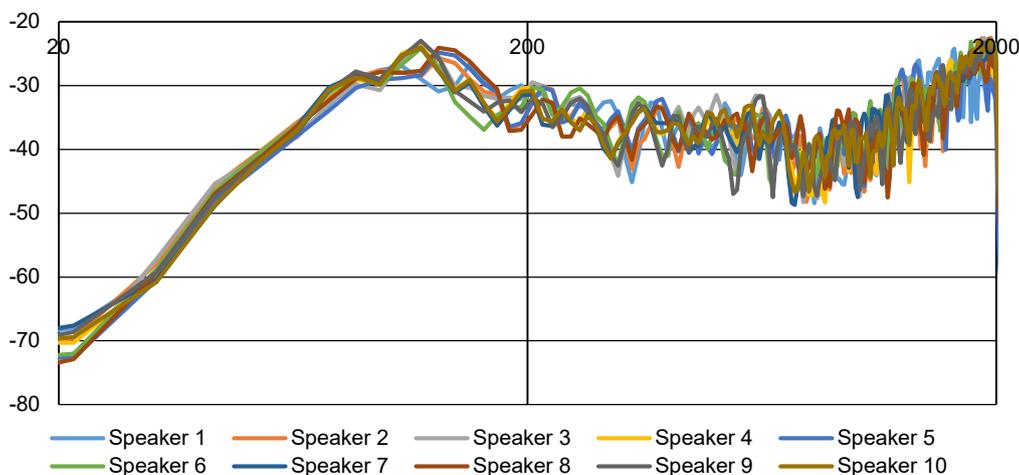
Процесс выравнивания АЧХ начинался с воспроизведения тестовыми образцами громкоговорителей ступенчатого тонального сигнала в диапазоне частот 20 Гц–5 кГц и шагом в 1/12 октавы на уровне 80 дБ и записи акустического сигнала в точке прослушивания. Всего было измерено десять тестовых образцов. В качестве целевой АЧХ была взята усредненная кривая, полученная как среднеарифметическое значение измеренных АЧХ в каждой частотной точке [7].

Измеренная АЧХ для каждого громкоговорителя использовалась для создания индивидуального корректирующего фильтра (рисунок 4). При применении этого фильтра к музыкальным программам, подаваемым на вход соответствующего громкоговорителя, АЧХ выходного сигнала соответствовала целевой кривой.

В некоторых случаях для достижения целевой АЧХ требовалось несколько итераций процесса выравнивания (рисунок 5).



**Рис. 4. Графики корректирующих фильтров (Filter 1–10) для каждого образца**



**Рис. 5. АЧХ выбранных образцов (Speaker 1–10) после процедуры корректировки**

Окончательным результатом процесса калибровки является набор корректирующих фильтров, которые можно было применить к референсной музыкальной программе перед воспроизведением. В результате выравнивания итоговая разница между частотными характеристиками соответствующих сигналов, воспроизводимых различными громкоговорителями, не превышала 1 дБ в 1/3 октавных полосах.

Поскольку все модели работали в комфортном диапазоне амплитуд смещения звуковой катушки, уровень регистрируемых нелинейных искажений был крайне незначительным. Таким образом, можно допустить, что все возможные продукты нелинейных искажений были замаскированы полезным сигналом, и влиянием нелинейных искажений на субъективные предпочтения можно пренебречь.

#### 4.2. Процедура тестирования

Для тестов были отобраны четыре эксперта, их слух был проверен с помощью аудиометрических тестов. Ни у одного из них не было выявлено нарушений слуха, и у всех аудиометрические пороги в обоих ушах на всех аудиометрических частотах от 250 до 8000 Гц не превышали 20 дБ HL. Возраст экспертов варьировался от 27 до 35 лет (в среднем 31, стандартное отклонение 4). Испытуемые были добровольцами и не имели специфических жанровых предпочтений.

Каждый слушатель провел в общей сложности 8 испытаний (4 программных по 2 прослушивания). В каждом испытании 10 тестовых образцов воспроизводили одинаковую музыкальную программу, подвергнутую предварительной обработке корректирующим фильтром (см. п. 4.1) и оценивались по 5-балльной шкале предпочтений. Шкала имела семантические дескрипторы в каждом интервале для поощрения последовательной интерпретации и использования шкалы: 1 (сильно не нравится), 2 (не нравится), 3 (хорошо – ни нравится, ни не нравится), 4 (нравится) и 5 (сильно нравится). Чтобы поощрить последовательное использование шкалы, слушателям было предложено следующее руководство при выборе того, как они разделили свои оценки между двумя громкоговорителями:  $a \leq 0,5$  балла означало небольшое предпочтение; 1 балл – умеренное предпочтение;  $a \geq 2$  баллов – сильное предпочтение. Слушатели могли при желании прокомментировать свою оценку.

#### 4.3. Субъективные признаки качества звучания

Поскольку представленная работа направлена на исследование влияния переходных искажений на субъективную оценку качества, было решено устранить влияние частотных искажений путем предварительной обработки референсных сигналов корректирующими фильтрами (см. п. 4.1) [7, 3]. Указанная процедура позволяет устранить стацио-

нарные частотные искажения, в результате чего регистрируемая слуховой системой разница в звучании может быть следствием только переходных и динамических искажений. Как отмечено выше, частотные искажения могут также являться следствием переходных искажений.

Таким образом, эксперты должны были ранжировать представленные образцы по пяти критериям: общее предпочтение (OP, *от англ.* Overall Preference); удельная громкость низких частот (BP, *от англ.* Bass Performance); чистота баса (BC, *от англ.* Bass Clearness) – басовая герметичность и четкость; воспринимаемый динамический диапазон (DR, *от англ.* Dynamic Range); воспринимаемое время атаки (AT, *от англ.* Attack Time).

### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОЦЕНОК

Проанализируем корреляцию между объективными измерениями и субъективными оценками переходных искажений, вносимых в звуковые сигналы электродинамических преобразователей, а также связи величины этих искажений с их механическими и электрическими характеристиками.

Как показано в п. 2.1, переходные искажения могут быть разделены на две составляющие: искажения частоты, обусловленные первой частью уравнения (3), и искажения во временной области, которые также зависят от времени, необходимого для достижения амплитуды стационарных колебаний, рассчитанной по уравнению (7).

#### 5.1. Связь характеристик акустического отклика с характеристиками громкоговорителей

Рассмотрим, как временная форма сигналов влияет на переходные искажения. Для сравнения звуковых сигналов во временной области разработан программный инструмент для синхронизации записанных сигналов и расчета разности амплитуды и частоты для выбранных временных интервалов. Для сравнения все сигналы были нормализованы так, чтобы энергия записанных сигналов совпадала в диапазоне частот от 300 Гц–2000 кГц.

Ниже будет показано, как характеристики динамического преобразователя влияют на частотную и временную составляющие переходных искажений. Было произведено сравнение тестовых образцов (№ 2, 3, 7 и 10), которые демонстрируют существенную разницу в электрических и механических характеристиках (см. таблицу 1). Первая пара испытательных образцов имеет максимальную разницу в массе подвижной части (14,9 и 7,8 г) и в полной добротности (0,54 и 1,75), соответственно.

Рисунок 6 показывает, что преобразователь с более легкой движущейся частью демонстрирует выраженную «переходную» часть решения уравнения (3) и может быстрее развить амплитуду, соответствующую установившемуся процессу. Процесс за-

тухания в выбранных образцах имеет примерно ту же продолжительность и энергию, что и преобразователь с более тяжелой подвижной частью, более мощный драйвер и, следовательно, низкую добротность [8].

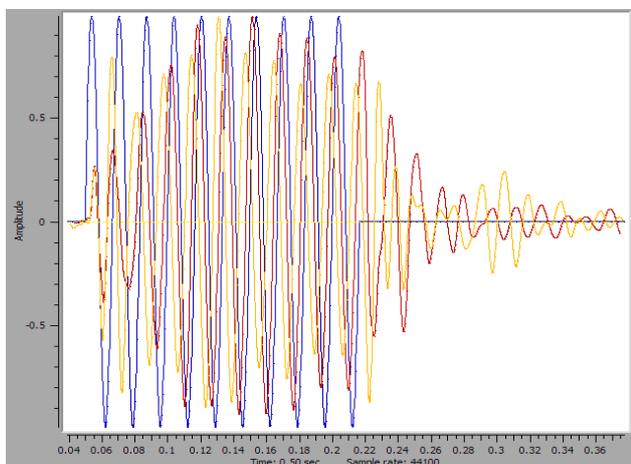


Рис. 6. Временные формы тона 60 Гц: синий – исходный сигнал; красный –  $\max M_{ms}$  и  $\min Q_{ts}$ ; желтый –  $\min M_{ms}$  и  $\max Q_{ts}$

Сравним волновые формы записей второго тестового сигнала, которые соответствуют образцам с наибольшей и наименьшей массой подвижной части (рисунок 7).

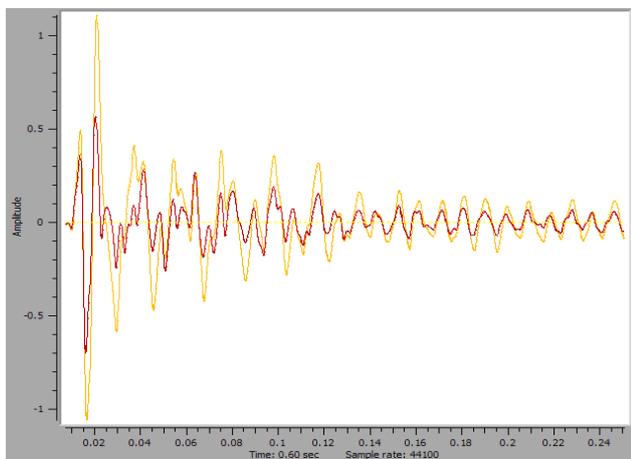


Рис. 7. Временная форма второго испытательного сигнала: красный –  $\max M_{ms}$  и  $\min Q_{ts}$ ; желтый –  $\min M_{ms}$  и  $\max Q_{ts}$

График показывает, что нормированные уровни записанных сигналов значительно различаются. Более легкая движущая часть имеет значительно более высокую амплитуду независимо от низкого значения силового фактора  $B\Gamma$  и более высокой резонансной частоты (61 и 83 Гц, соответственно).

Сравним результаты измерений в частотной области (рисунок 8). Анализ сигналов, полученных с помощью других тестовых образцов, подтверждает вывод о том, что более легкие колебательные системы могут быстрее достигать стационарной амплитуды (иметь более короткое время атаки) и излучать больше энергии на частоте движущей силы.

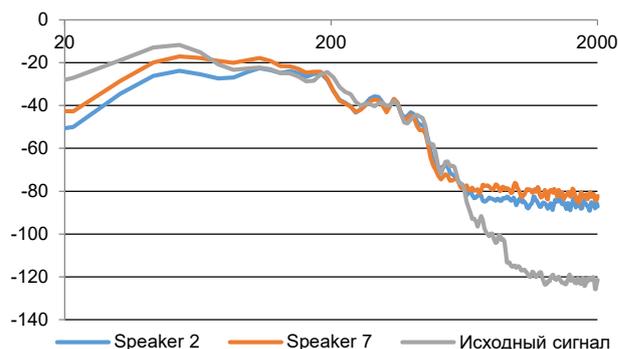


Рис. 8. Сравнение АЧХ образцов № 2 (Speaker 2) и 7 (Speaker 7) для второго тестового (исходного) сигнала

Также представляет интерес влияние величины общей добротности на переходный процесс. Сравним акустические характеристики образцов № 1, 2, 3 и 8 (набор 1) и образцов № 4, 5, 6, 7, 9 и 10 (набор 2). Образцы из первого набора имеют низкую добротность, из второго – высокую (см. таблицу 1).

График временной формы записанных сигналов показывает, что образцы из набора 1 имеют длительный переходный процесс с высокой амплитудой колебаний (рисунок 9). Образцы из группы с высокой добротностью имеют гораздо более короткий процесс затухания (рисунок 10).

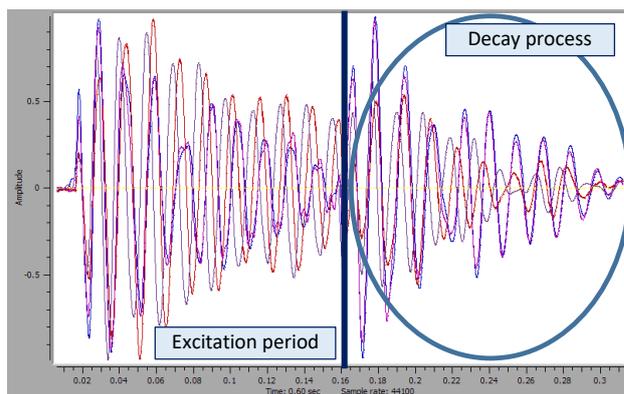


Рис. 9. Временная форма тона 70 Гц, образцы с низким  $Q_{ts}$

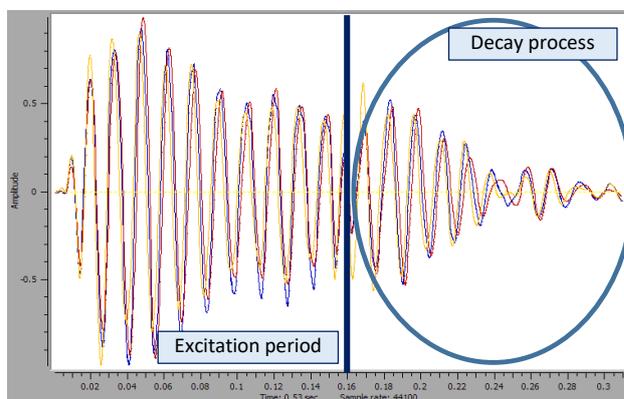


Рис. 10. Временная форма тона 70 Гц, образцы с высоким  $Q_{ts}$

Ниже будет показано, что этот факт имеет большое значение для объяснения причин влияния  $Q_{ts}$  на рейтинг чистоты басов.

## 5.2. Корреляция между субъективными оценками и электромеханическими характеристиками громкоговорителей

Ответы слушателей были статистически проанализированы с использованием коэффициента корреляции Пирсона  $R$  между субъективными оценками для различных атрибутов качества звука и выбранными электромеханическими параметрами. Были отмечены значительные зависимости между показателями  $M_{ms}$ ,  $Bl$ ,  $Q_{ts}$  (таблица 4, где желтый цвет  $|R| > 0,6$ ; зеленый цвет  $|R| > 0,7$ ) и выбранными субъективными атрибутами качества, а также между самими атрибутами (таблица 5).

ТАБЛИЦА 4. Коэффициенты корреляции  $R$  между субъективными оценками и объективными характеристиками

Фактор	BP	BC	AT	DR	OP
$F_s$	0,37	0,69	0,61	0,52	0,74
$M_{ms}$	-0,69	-0,85	-0,75	-0,7	-0,8
$Q_{ms}$	-0,63	-0,16	0,01	0,17	-0,05
$Q_{ts}$	0,33	0,80	0,65	0,65	0,56
$Bl$	-0,15	0,54	-0,63	-0,6	-0,55
$Bl/M_{ms}$	0,67	0,31	0,06	-0,2	0,2

ТАБЛИЦА 5. Корреляции между оценками обобщенного качества и оценками отдельных признаков качества

Признак качества	Корреляция с обобщенной оценкой качества
Бас	0,77
Чистота	0,69
Динамический диапазон	0,61
Атака	0,73

Поскольку многие параметры громкоговорителя являются взаимозависимыми, нет необходимости описывать влияние каждого из них на субъективные оценки качества звучания.

## 6. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В этом разделе анализируем корреляцию между объективными и субъективными измерениями переходных искажений в электродинамических громкоговорителях и предложим объяснение полученным зависимостям.

### 6.1. Связь характеристик акустического отклика с параметрами громкоговорителей

Для коротких импульсных сигналов, длительность которых не превышает длительность переходного процесса, громкоговорители с легкой подвижной системой получают преимущество с точки зрения величины переходных искажений и создают большее звуковое давление в полосе низких частот. Прежде всего, это связано с тем, что длительность переходного процесса зависит от коэффициента полной добротности колебательной системы, который ниже у тяжелых систем.

### 6.2. Корреляция с $F_s$

После выравнивания АЧХ для выбранных образцов громкоговорителей, резонансная частота  $F_s$  громкоговорителя, тем не менее, имеет заметную корреляционную связь с оценками атрибутов качества звучания. Это может быть объяснено тем фактом, что существует значительная отрицательная корреляция между  $F_s$  и  $M_{ms}$  и в тоже время видно, что масса подвижной системы  $M_{ms}$  также отрицательно коррелирует с оценками всех качественных признаков. Таким образом, можно сделать вывод, что указанная корреляционная связь является вторичной (следствием).

### 6.3. Корреляция с массой подвижной системы громкоговорителя $M_{ms}$

Сильные отрицательные корреляции между величиной  $M_{ms}$  и оценками всех субъективных атрибутов качества звучания связаны с тем, что колебательные системы с тяжелой подвижной системой медленнее достигают амплитуды установившегося колебательного движения  $A_0$  (7), чем системы с легкой подвижной системой. Это, в свою очередь, влияет на время атаки и излучение баса при коротких импульсах. Можно предположить, что указанная зависимость также связана с низкой добротностью тяжелых систем.

### 6.4. Корреляция с коэффициентом механической добротности $Q_{ms}$

Существует значительная отрицательная корреляция между  $Q_{ms}$  и оценкой «BP», обусловленная тем фактом, что импульсные сигналы сильно зависят от «переходного» решения уравнения движения (4), которое в значительной степени зависит от коэффициента потерь системы. Также присутствуют более слабые зависимости между  $Q_{ms}$  и субъективными оценками других атрибутов качества звучания.

### 6.5. Корреляция с коэффициентом полной добротности $Q_{ts}$

Существует также значительная положительная корреляция между величиной коэффициента полной добротности громкоговорителя и оценками динамического диапазона и времени атаки. Прежде всего, это связано с величиной потерь в колебательной системе во время переходного процесса.

Сильная положительная корреляция между оценками атрибута «BC» и  $Q_{ts}$  обусловлена тем фактом, что преобразователи с низким  $Q_{ts}$  из нашего набора имеют резонансную частоту около 70 Гц, а тестовые сигналы имеют импульсы на этой частоте (см. таблицы 1, 3). Согласно приведенным выше результатам в этом случае может наблюдаться длительный процесс затухания собственных колебаний. Это приводит к нечеткому звучанию для выбранных программ.

### 6.6. Корреляция с величиной силового фактора $Bl$

По-видимому, существуют некоторые умеренные положительные корреляции между  $Bl$  и рейтингами предпочтений «DR» и «AT». Но в целом  $Bl$  оказывает большее влияние на установившийся процесс, что следует из уравнения (7). Существует также очевидная корреляция между показателем «BP» и фактором ускорения (отношением  $Bl/M_{ms}$ ), обусловленная зависимостью воспроизведения низких частот от выходного сигнала конкретного громкоговорителя.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе была исследована связь между слуховым восприятием и количественными измерениями переходных искажений на основе анализа работы десяти электродинамических громкоговорителей. Разница в АЧХ выбранных образцов была устранена путем предварительной обработки фонограмм корректирующими фильтрами, в результате чего при измерении на стационарных многотональных сигналах для всех образцов была получена одинаковая АЧХ. Вместе с отсутствием слышимых нелинейных искажений это позволило сфокусировать внимание слушателей на разнице в звучании, обусловленной переходными искажениями. При субъективных тестах оценки качества звучания использовались четыре различные музыкальные программы, которые после обработки соответствующими цифровыми фильтрами воспроизводились тестируемыми громкоговорителями при уровне звукового давления 85 дБ. Четыре обученных слушателя дали сравнительные оценки предпочтений для пяти субъективных признаков и комментарии для каждого преобразователя на основе своего восприятия.

Были выбраны пять различных параметров громкоговорителей для исследования корреляции между ними и субъективными оценками. В результате работы можно сделать следующие выводы:

1) после выравнивания АЧХ для стационарных сигналов, резонансная частота громкоговорителя  $F_s$  имеет заметную положительную корреляцию с субъективными оценками предпочтений в предположении, что это вторичная зависимость, обусловленная корреляцией величин резонансных частот и масс подвижных систем исследуемых образцов);

2) масса подвижной системы преобразователя  $M_{ms}$  оказывает наибольшее влияние на субъективное восприятие переходных искажений, при этом с увеличением  $M_{ms}$  оценки для всех выбранных атрибутов качества снижаются);

3) оценка «BP» положительно зависит от величины механической добротности  $Q_{ms}$ ;

4) коэффициент общей добротности системы положительно коррелирует с динамическими характеристиками «DR», «AT» и отрицательно коррелирует с оценками «BC»;

5) силовой фактор  $Bl$  имеет сильную отрицательную корреляцию с коэффициентом полной добротности  $Q_{ts}$ , поэтому параметр  $Bl$  имеет корреляцию, обратную  $Q_{ts}$  с оценками соответствующих атрибутов качества.

На основании полученных результатов можно сделать надежный вывод о том, что с точки зрения количества динамических и переходных искажений и их слышимости в музыкальных программах с широким динамическим диапазоном, высоким темпом и высоким пик-фактором отдельных фрагментов, а также максимумом излучаемой акустической энергии на частотах, близким к резонансным частотам динамических громкоговорителей, наибольшее отрицательное влияние вносят абсолютная масса подвижной системы громкоговорителя и его коэффициент полной добротности.

### Список используемых источников

1. Harwood H.D. Some factors in loudspeaker quality // *Wireless World*. 1976. Vol. 82. PP. 45–54.
2. Serway A.R., Jewett W.J. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Boston: Brooks/Cole & Cengage, 2018. 1484 p.
3. Toole F. *Sound Reproduction: The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms*. Audio Engineering Society Presents. Waltham: Focal Press, 2008. 568 p.
4. Toole F.E., Olive S.E. The Modification of Timbre by Resonances: Perception and Measurement // *Journal of the Audio Engineering Society*. 1988. Vol. 36. Iss. 3. PP. 122–142.
5. Meyer J. *Acoustics and the Performance of Music: Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers*. New York: Springer Science & Business Media, 2009. 446 p.
6. Bradley J.S., Soulodre G.A., Norcross S. Factors influencing the perception of bass // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1997. Vol. 101. Iss. 5. DOI:10.1121/1.419017
7. Temme S., Olive S., Tatarunis S., Welti T., McMullin E. The Correlation between Distortion Audibility and Listener Preference in Headphones // *Proceedings of the 137th International Audio Engineering Society Convention (Los Angeles, USA, 9–12 October 2014)*.
8. Keele Jr. D.B. Comparison of Direct-Radiator Loudspeaker System Nominal Power Efficiency vs. True Efficiency with High-Bl Drivers // *Proceedings of the 115th International Audio Engineering Society Convention (New York, USA, 10–13 October 2003)*.

\* \* \*

# INVESTIGATION OF INFLUENCE OF ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF ELECTRODYNAMIC TRANSDUCERS ON SOUND QUALITY PERCEPTION

**M. Pakhomov**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg Branch of the Corporation LG Electronics Inc.  
St. Petersburg, 191123, Russian Federation

## Article info

Article in Russian

**For citation:** Pakhomov M. Investigation of Influence of Electromechanical Characteristics of Electrodynamic Transducers on Sound Quality Perception. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(1):31–40. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-1-31-40>

**Abstract:** *The two most noticeable types of distortion in an audio signal path – frequency and nonlinear – are frequently analyzed by researchers and developers in terms of auditory perception. The effect of transient distortion, though insufficiently studied, is evident in subjective listening tests when comparing dynamic transducers with similar frequency response and no audible nonlinear distortions. In the present study was conducted dynamic transducer measurements and subjective evaluations to define the critical factors based on the dynamic transducer's electromechanical characteristics that affect transient distortion and determined relations between the factors' values and subjective scores.*

**Keywords:** *transient distortions, dynamic distortions, Thiele-Small parameters, attack time, peak-factor, dynamic range.*

## References

1. Harwood H.D. Some factors in loudspeaker quality. *Wireless World*. 1976;82:45–54.
2. Serway A.R., Jewett W.J. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Boston: Brooks/Cole & Cengage; 2018. 1484 p.
3. Toole F. *Sound Reproduction: The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms*. Audio Engineering Society Presents. Waltham: Focal Press; 2008. 568 p.
4. Toole F.E., Olive S.E. The Modification of Timbre by Resonances: Perception and Measurement. *Journal of the Audio Engineering Society*. 1988;36(3):122–142.
5. Meyer J. *Acoustics and the Performance of Music: Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers*. New York: Springer Science & Business Media; 2009. 446 p.
6. Bradley J.S., Soulodre G.A., Norcross S. Factors influencing the perception of bass. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1997;101(5). Available from: <https://doi.org/10.1121/1.419017>
7. Temme S., Olive S., Tatarunis S., Welti T., McMullin E. The Correlation between Distortion Audibility and Listener Preference in Headphones. *Proceedings of the 137th International Audio Engineering Society Convention, 9–12 October 2014, Los Angeles, USA*.
8. Keele Jr. D.B. Comparison of Direct-Radiator Loudspeaker System Nominal Power Efficiency vs. True Efficiency with High-BI Drivers. *Proceedings of the 115th International Audio Engineering Society Convention, 10–13 October 2003, New York, USA*.

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения**

**05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии**

**05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

**05.12.14 – Радиолокация и навигация**

