

The Genesis Report

Введение

В последнее время значение акустических кабелей, на которые раньше никто не обращал особого внимания, стало стремительно расти. Если раньше о кабелях думали в последнюю очередь, то сейчас они по праву заняли место полноценных высокотехнологичных аудиокomпонентов, в то же время кабели зачастую покрыты совершенно ненужным налетом таинственности и мистицизма.

Сейчас на рынке представлен широчайший выбор кабелей различных типов, соответствующих самым разнообразным нуждам. К несчастью, потребители зачастую сталкиваются с большим количеством ставящих в тупик аргументов и контраргументов, способных превратить любое очевидное достоинство кабеля в чудовищный недостаток. Данная ситуация усугубляется «благодаря» псевдонаучным, а зачастую и просто мистическим аргументам, которые используют маркетинговые департаменты некоторых компаний.

Данный технический справочник обобщает глубокие научные исследования, включавшие в себя измерения и прослушивания, проведенные компанией QED и посвященные влиянию акустических кабелей. Наша цель заключалась в том, чтобы разработать новую линейку высококачественных кабелей, конструкция которых основывалась бы на результатах этих исследований. Появление текущей линейки акустических кабелей QED стало закономерным результатом проведенных исследований. Также мы получили множество уроков, которые повлияли на конструкцию наших межкомпонентных кабелей. Очень полезными оказались и прослушивания: инженеры QED прекрасно понимают, что измерения сами по себе – это только часть общей картины. Нам бы очень хотелось сказать, что они дают всю необходимую информацию, но это не так. С другой стороны, если кабель вносит в аудиосигнал, передаваемый от усилителя к акустическим системам, ошибки и искажения, которые можно измерить, то очевидно он не может достоверно воспроизводить музыку.

QED считает, что кабель должен быть настолько точным, прозрачным и нейтральным, насколько это только возможно и концепция разработки наших кабелей основывается на использовании результатов Genesis Report, а также постоянных критических прослушиваниях.

Значение кабеля

На первый взгляд акустический кабель играет очень простую роль, передавая сигнал от усилителя к акустическим системам. Но на практике различия в качестве звучания при соединении различными кабелями хорошо заметны большинству слушателей, хотя некоторые консерваторы до сих пор считают, что этого не может быть. Очевидно, что существуют определенные факторы в конструкции кабелей, которые влияют на качество звука.

Учитывая то, что ни один компонент не может улучшить аналоговый сигнал, проходящий через него (а может только изменить или ухудшить его), роль акустического кабеля должна заключаться в передаче аудиосигнала между усилителем и громкоговорителями без потерь и только.

Основы тестирования

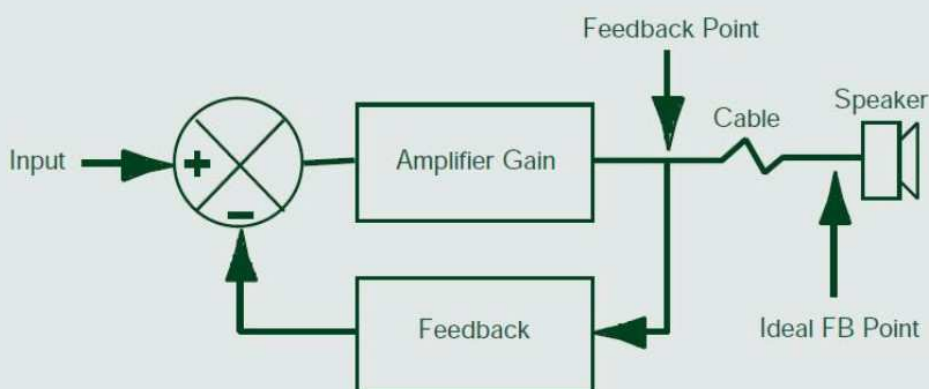


Рис.1 Конфигурация усилителя мощности

Поскольку акустический кабель соединяет компоненты системы, его оценка должна проводиться не отдельно, а вместе с усилителем и акустическими системами. По сути, акустический кабель является продолжением контура усилителя, он эквивалентен подключению к его выходу дополнительных компонентов, обладающих такими электрическими характеристиками, как: **Сопротивление (R), Емкость (C), Индуктивность (L) и Проводимость (G)**.

В большинстве усилителей мощности их разработчики добиваются достоверности воспроизведения, сравнивая сигнал на выходе с сигналом на входе. Такая конструкция называется «отрицательная обратная связь». Любая ошибка, появляющаяся на выходе усилителя с обратной связью, быстро корректируется, поскольку усилитель автоматически добавляет эту же ошибку, только с обратной величиной к входному сигналу. На Рис.1 видно, что усилитель с отрицательной обратной связью может попытаться скорректировать ошибки, которые появились до точки обратной связи. Ошибки на входе акустических систем, связанные с влиянием кабеля, не корректируются: кабель находится вне зоны влияния механизма обратной связи усилителя.

Некоторые усилители берут сигнал обратной связи с коммутационных клемм громкоговорителей, чтобы учесть влияние кабеля, но такие конструкции встречаются крайне редко. Один из объективных тестов качества акустического кабеля должен подразумевать сравнение сигнала на входе (на стороне усилителя) и на выходе (на стороне акустических систем). Любая разница между ними соответствует ухудшению сигнала в кабеле.

Реальное влияние на работу системы

Термины, которые используются для субъективного описания влияния кабеля, могут быть как позитивными, например: «прозрачный», «когерентный», «упругий», «детальный», «ритмичный», так и негативными, например: «зернистый», «кричащий», «выпяченный», «гнусавый», «размытый». Наше исследование Genesis Report показало, что некоторые из этих характеристик можно предсказать, анализируя результаты инструментальных измерений. Мы протестировали множество образцов кабелей, относящихся к разным ценовым категориям, использующим различные технологии и маркетинговые стратегии для продвижения, и сняли измерения для каждого кабеля, подключив его к реальной нагрузке (акустической системе).

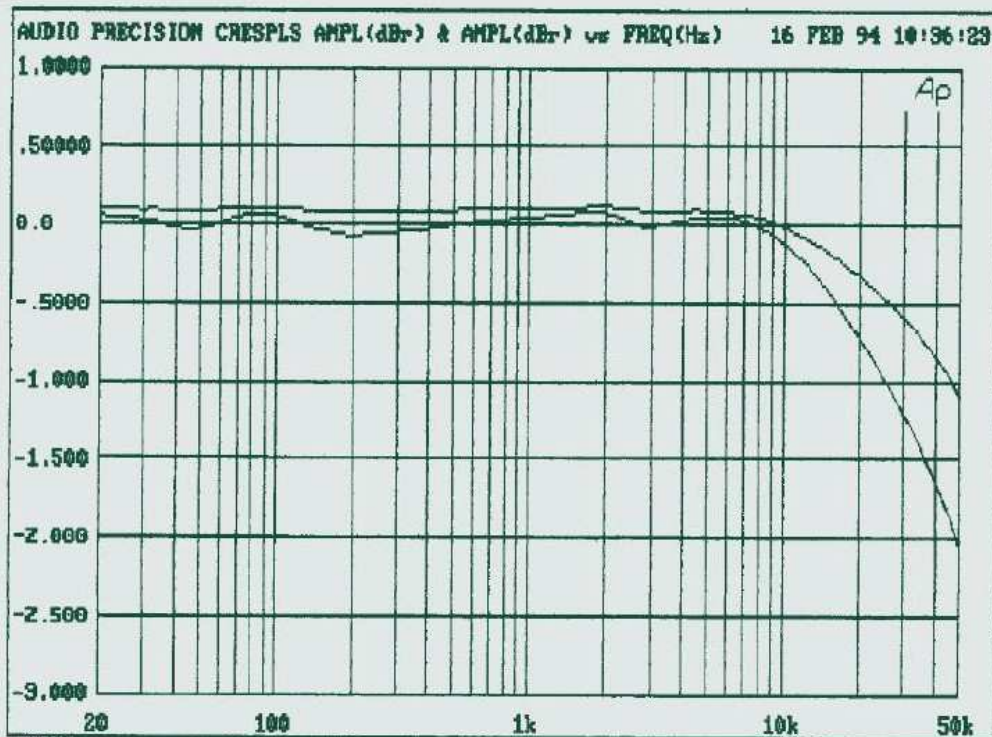


Рис. 2 Частотная Характеристика при Использовании Кабеля с очень Низким Сопротивлением

На графиках, представленных на Рис.2 и Рис.3 показаны амплитудно-частотные характеристики. Верхние графики на рисунках построены для сигнала на выходе усилителя, а нижние – после прохождения кабеля (на входных терминалах АС). Разница в качестве передачи сигнала этими двумя кабелями очевидна.

Так, нижний график, показанный на Рис.2, построен для плоского кабеля с очень низким сопротивлением (образец 10 в нашем тесте), а нижний график на Рис.3 иллюстрирует влияние кабеля с двойными монолитными жилами (образец 7). Волнообразная форма графика связана с изменениями импеданса нагрузки в звуковом частотном диапазоне, которые приводят к тому, что напряжение сигнала «встречается» с различными величинами импеданса кабеля на разных частотах.

Разница между верхней и нижней кривыми на обоих графиках, по сути, и характеризует потери в кабелях. Очевидно, что потери больше в кабеле, показанном на Рис.3,

использующем монолитные проводники, в связи с более высоким сопротивлением постоянному току. Надо сказать, что в данном случае - это не просто академический вопрос, поскольку эти потери повлияют и на результирующую частотную характеристику акустической системы (в данном случае изменения доходят до -0,8 дБ на частоте 200 Гц, что показано на Рис.3).

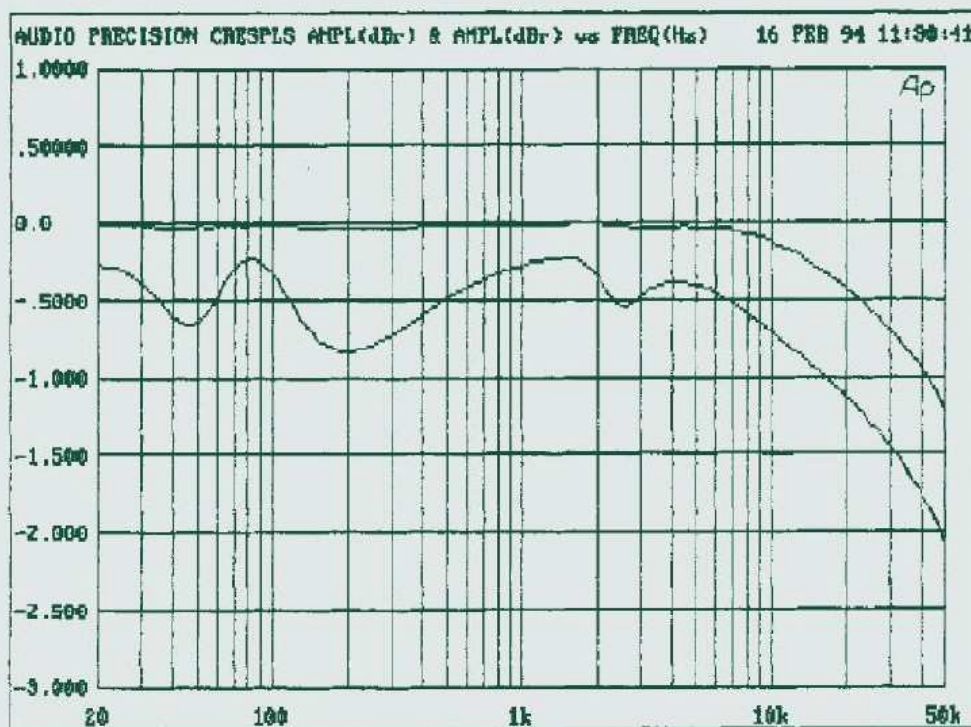
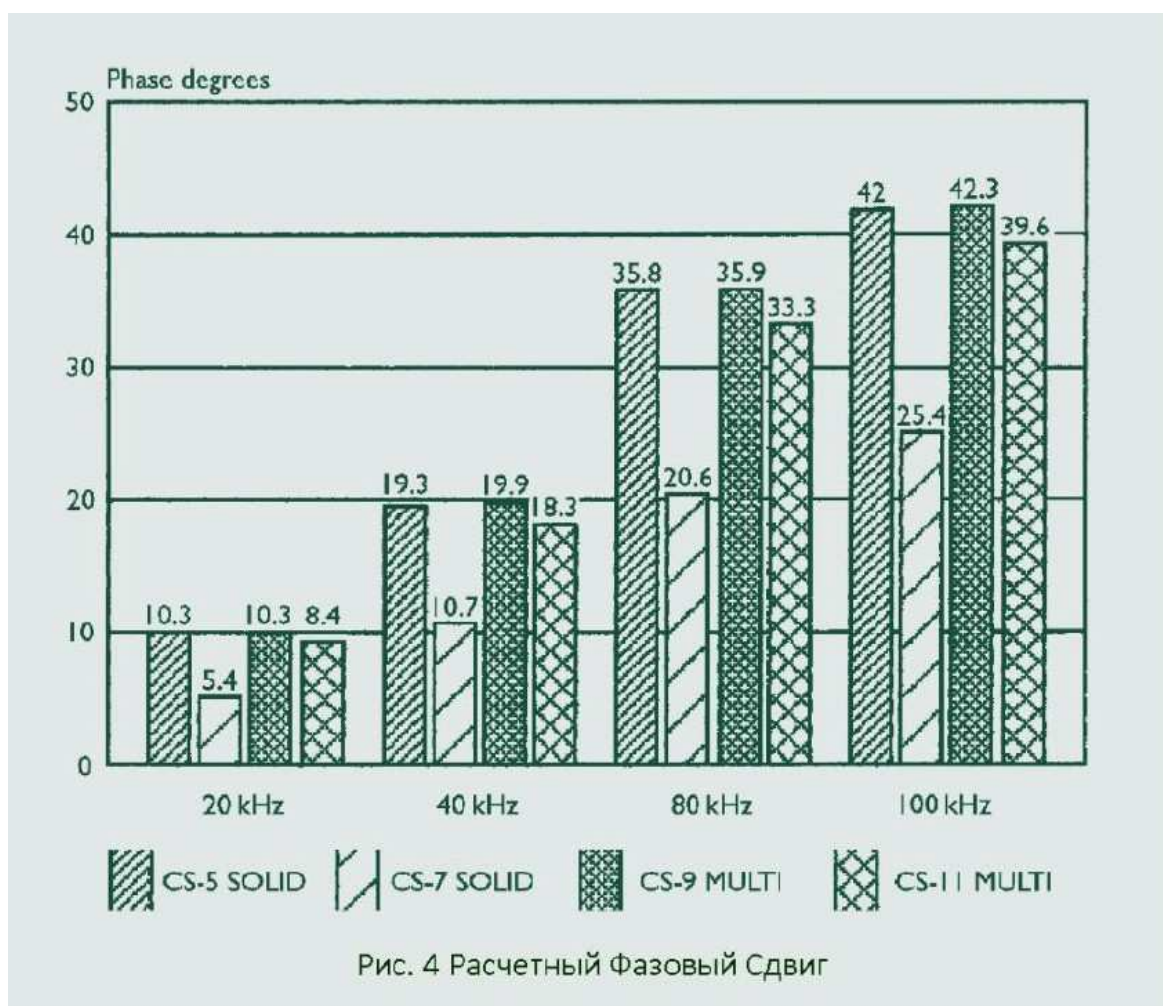


Рис. 3 Частотная Характеристика при Использовании Кабеля с Высоким Сопротивлением

Полученные АЧХ, показанные на обоих рисунках, являются типичными для фазоинверторных акустических систем при подаче на них однородного синусоидального входного сигнала. Реальные сигналы не являются синусоидальными, а включают в себя множество частот одновременно, кроме того, нагрузка, которую представляют собой акустические системы, является комплексной (комплексная нагрузка означает, что напряжение и ток не обязательно находятся в фазе). Следовательно в кабеле при воспроизведении музыки будут происходить гораздо большие потери амплитуды динамического сигнала, чем может показаться исходя из анализа этих графиков, построенных для однородного сигнала.

Учитывая абсолютную очевидность того, что низкое сопротивление необходимо для того, чтобы получить максимально равную характеристику при работе с реальными громкоговорителями, нас очень удивляет распространенный тренд, который заключается в отходе от кабелей с низким сопротивлением и распространению кабелей с монолитными проводниками, обладающих более высоким сопротивлением. При этом в маркетинговых материалах производителей очень часто можно встретить утверждение, что использование монолитных проводников с малой площадью поперечного сечения позволяет снизить влияние скин-эффекта.

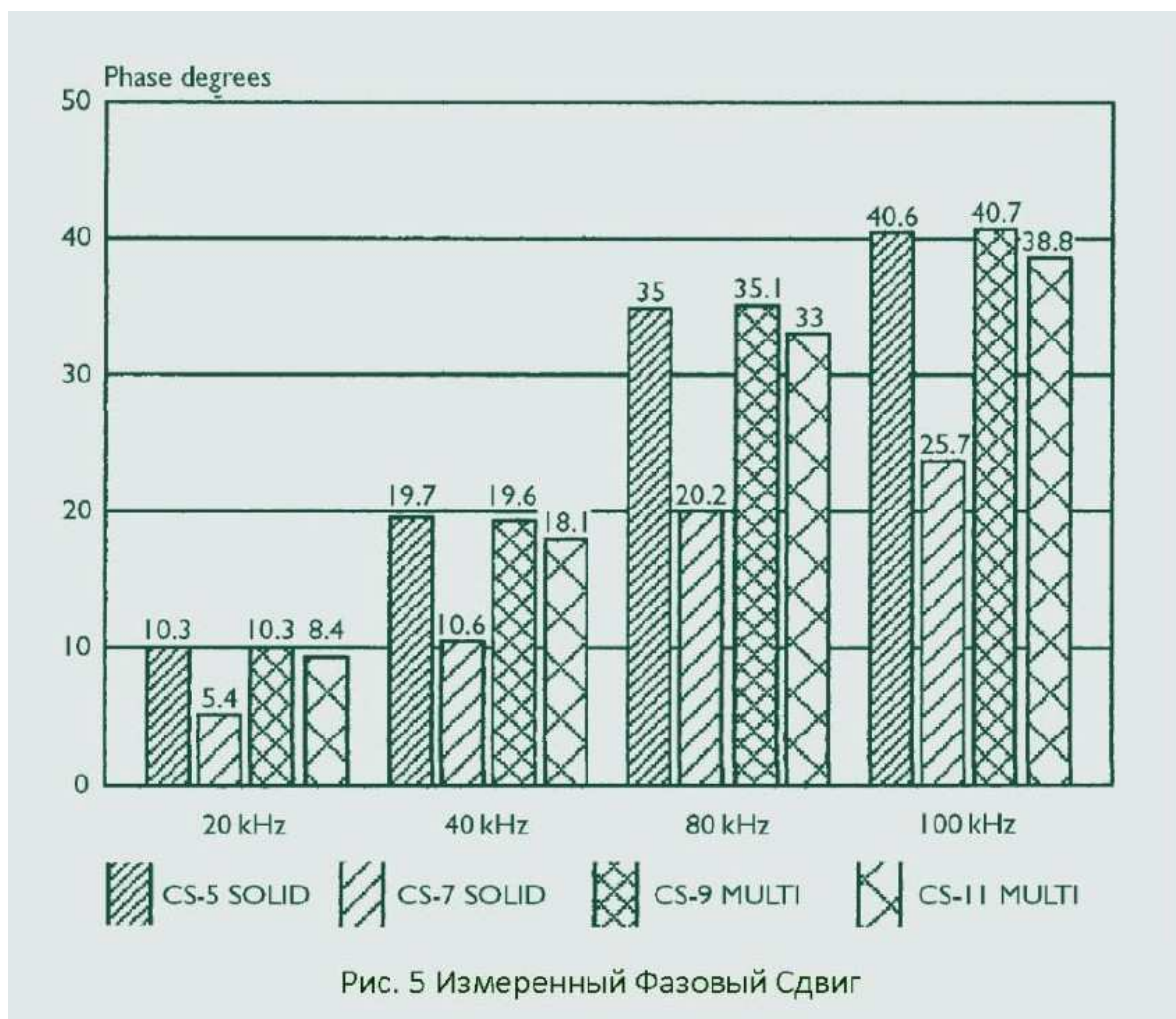
Скин-эффект



Скин-эффект – это явление, которое обычно ассоциируется с высокочастотными передающими линиями. При протекании переменного тока через проводник в нем за счет изменений магнитного потока наводится электродвижущая сила (ЭДС). Это приводит к тому, что плотность тока в центре проводника уменьшается по сравнению с областями, расположенными рядом с его поверхностью. В результате область, через которую протекает ток, уменьшается, поскольку ток отводится от центральной области проводника к поверхности. Результатом скин-эффекта является рост импеданса кабеля на очень высоких частотах, который связан с сужением эффективной проводящей площади поперечного сечения (удивительно, но в отличие от индуктивности, скин-эффект не вносит в сигнал фазовых отклонений, но увеличивает потери мощности сигнала в кабеле).

В системах, работающих на радиочастотах (гораздо более высоких, чем частоты звукового диапазона) скин-эффект является серьезной проблемой, с которой борются, покрывая проводники серебром для снижения сопротивления на поверхности, по которой протекает большая часть тока на высоких частотах. В аудио кабелях предположение о том, что влияние скин-эффекта заслуживает внимания, приводит к появлению кабелей, диаметр жил которых такой же или меньше чем удвоенная эффективная глубина проникновения сигнала (глубина, на которой плотность тока уменьшается на 63% от своей нормальной величины) на высоких звуковых частотах. Основная идея в данном случае заключается в том, что такой кабель будет работать в режиме пониженной плотности тока на всех частотах. Это позволяет сделать симптомы скин-эффекта не такими заметными (но не устранить его), но при этом импеданс кабеля увеличивается на всех частотах.

О том, ощущается ли влияние скин-эффекта на звук, ведется множество дебатов, большинство инженеров вообще ставит под сомнение его существование на звуковых частотах. Для того, чтобы объективно оценить его величину, мы решили провести сравнительные измерения фазового сдвига на высоких частотах и выбрали четыре различных кабеля. Два из них имели большой диаметр и многожильную конструкцию, а другие два относились к типу «с низким скин-эффектом» и имели малую площадь поперечного сечения.



Вначале измерялись основные характеристики, такие как сопротивление, индуктивность, емкость и проводимость (**известные как сосредоточенные параметры***). Затем эти значения использовались для расчета теоретических величин фазового сдвига при работе с нагрузкой. Важно, что эти теоретические расчеты не принимают во внимание скин-эффект и основываются исключительно на сосредоточенных параметрах. Результат этих расчетов показан на Рис.4.

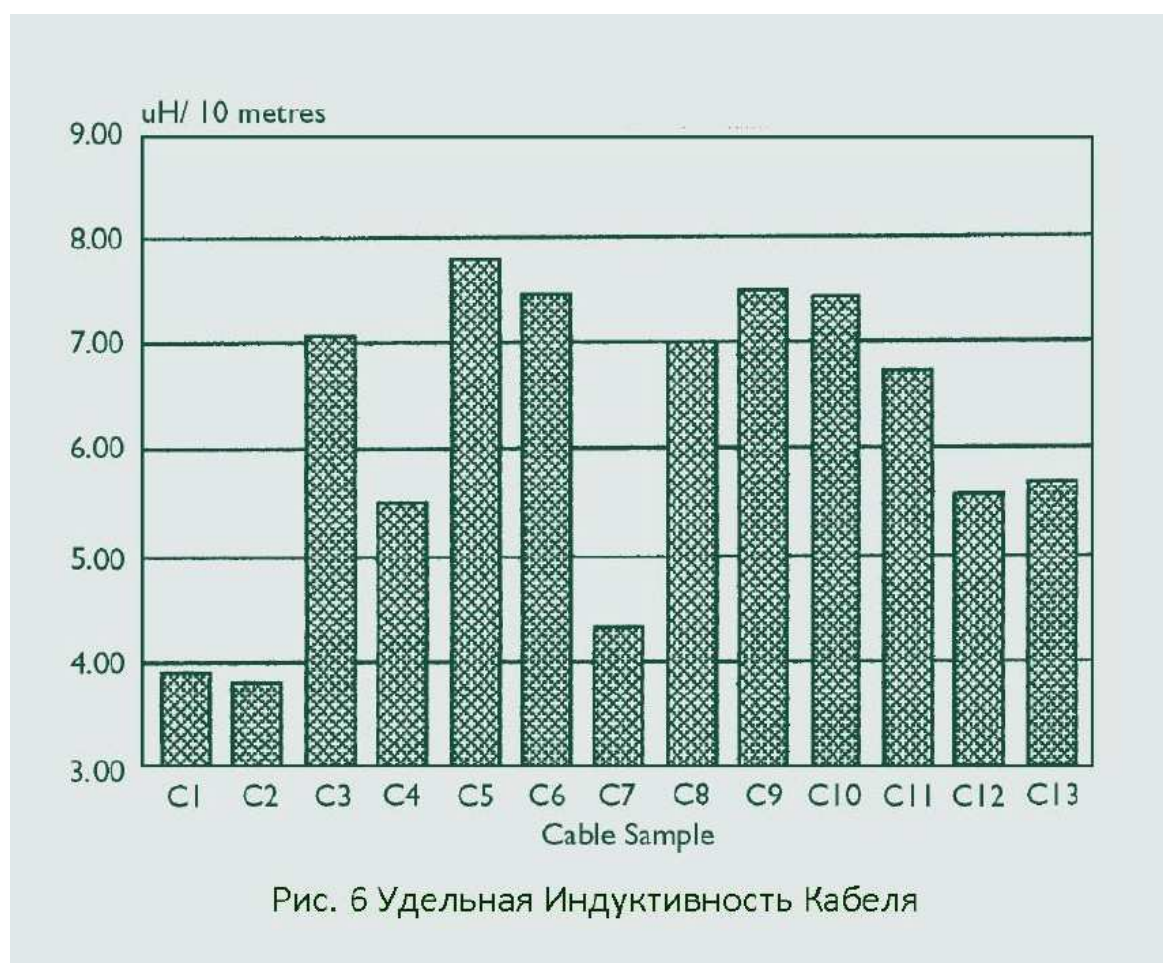
Затем измерялись реальные значения фазового сдвига для каждого из кабелей при такой же величине нагрузки. Результаты этих измерений приведены на Рис.5. Видно, что теоретическая и измеренная величины очень близки друг к другу, что совершенно неожиданно для тех, кто считает влияние скин-эффекта существенным. Только на частотах свыше 80 кГц можно заметить значительное расхождение между теоретическими и измеренными результатами для многожильных кабелей (если, конечно, величину в 2% на 100 кГц можно считать значительной).

Эта разница обусловлена двумя явлениями – скин-эффектом и, возможно, эффектом близости соседних проводников. Последний из них заключается в увеличении плотности

тока на внутренних поверхностях параллельных проводников и является более актуальным для близко расположенных ленточных проводников. Что интересно, измеренные величины фазового сдвига оказались в целом ниже рассчитанных теоретических значений, поскольку скин-эффект, который является резистивным по своей природе, увеличивает импеданс кабеля при прохождении переменного тока без внесения дополнительного фазового сдвига. Удивительно, но скин-эффект даже снижает фазовый сдвиг, уменьшая индуктивное сопротивление кабеля. (Тем, кто хочет получить более глубокое представление об этом рекомендуем обратиться к учебникам посвященным комплексной теории переменного тока).

Обратите внимание, что образец кабеля номер 7 на Рис.4 и 5 показывает меньший фазовый сдвиг, чем другие, просто за счет меньшей индуктивности.

Индуктивные Эффекты



Влияние индуктивного сопротивления на фазовый сдвиг переменного электрического сигнала в ряде протестированных кабелей показано на Рис.6 и 7. Чем выше индуктивность, тем больше ее влияние на величину фазового сдвига. Знакомство с геометрией каждого из протестированных кабелей показало, что большинство

многожильных кабелей обладает высокой индуктивностью.

Индуктивность кабеля зависит от площади проводников, их относительного расположения и коэффициента проницаемости окружающей среды (материалы с высокой проницаемостью, такие как железо или феррит, к примеру, используются для увеличения индуктивности в катушках индуктивности).

В кабелях увеличение расстояния между проводниками приводит к увеличению их индуктивности. Многие многожильные акустические кабели имеют проводники, расположенные далеко друг от друга (иногда расстояние между проводниками в 3 раза превышает их диаметр), что приводит к росту индуктивности.

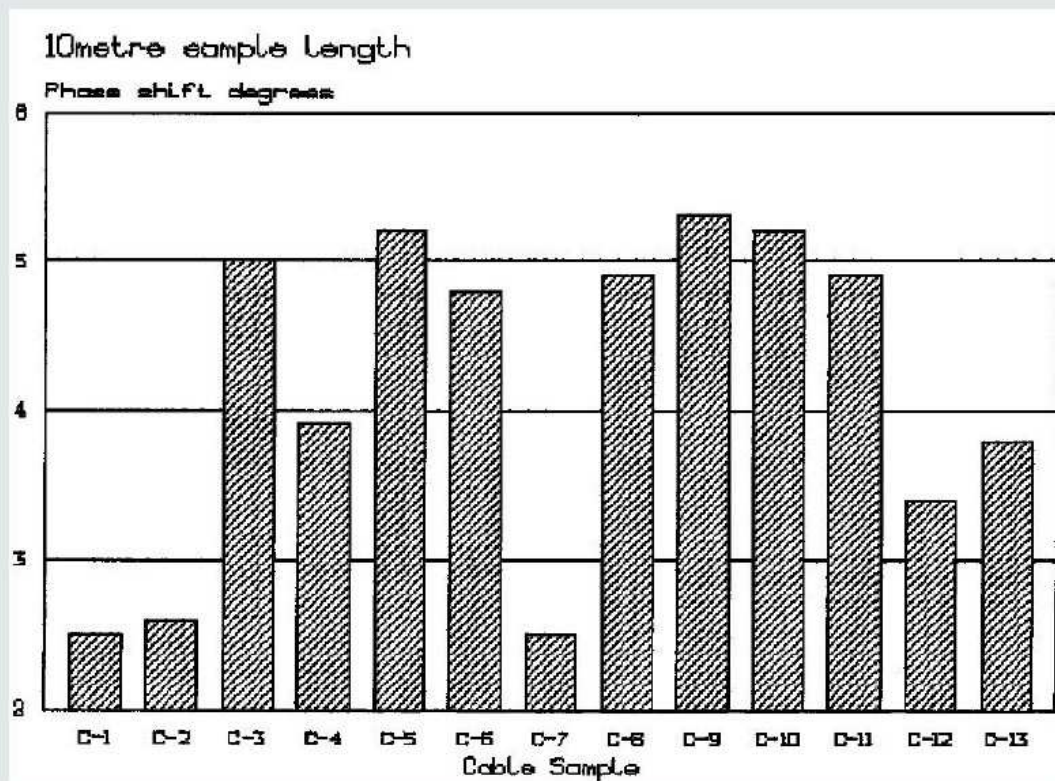


Рис. 7 Фазовый Сдвиг за счет Кабеля на 20 кГц

Усредняя индуктивный эффект для исследуемых образцов кабелей, мы получили величину эффективного фазового сдвига 0,42 градуса на метр. Для 10-метровой длины фазовый сдвиг составит 4,2 градуса. На практике индуктивность кабеля добавляется к выходной индуктивности усилителя (индуктивность на выходе используется для повышения стабильности усилителя на высоких частотах), так что результирующая индуктивность усилителя увеличивается за счет кабеля.

Слуховое восприятие фазового сдвига

В настоящее время восприятие фазового сдвига на слух является практически неизученным, хотя усилители с неважными фазовыми характеристиками часто критикуются за «зернистость» звучания. Удивительно, но фазовый сдвиг усилителей

упоминается не так часто, хотя в ряде моделей, присутствующих на рынке, можно встретить с величинами фазовых сдвигов, превышающих 15 градусов на частоте 20 кГц.

Ослабление сигнала, связанное с индуктивностью и емкостью



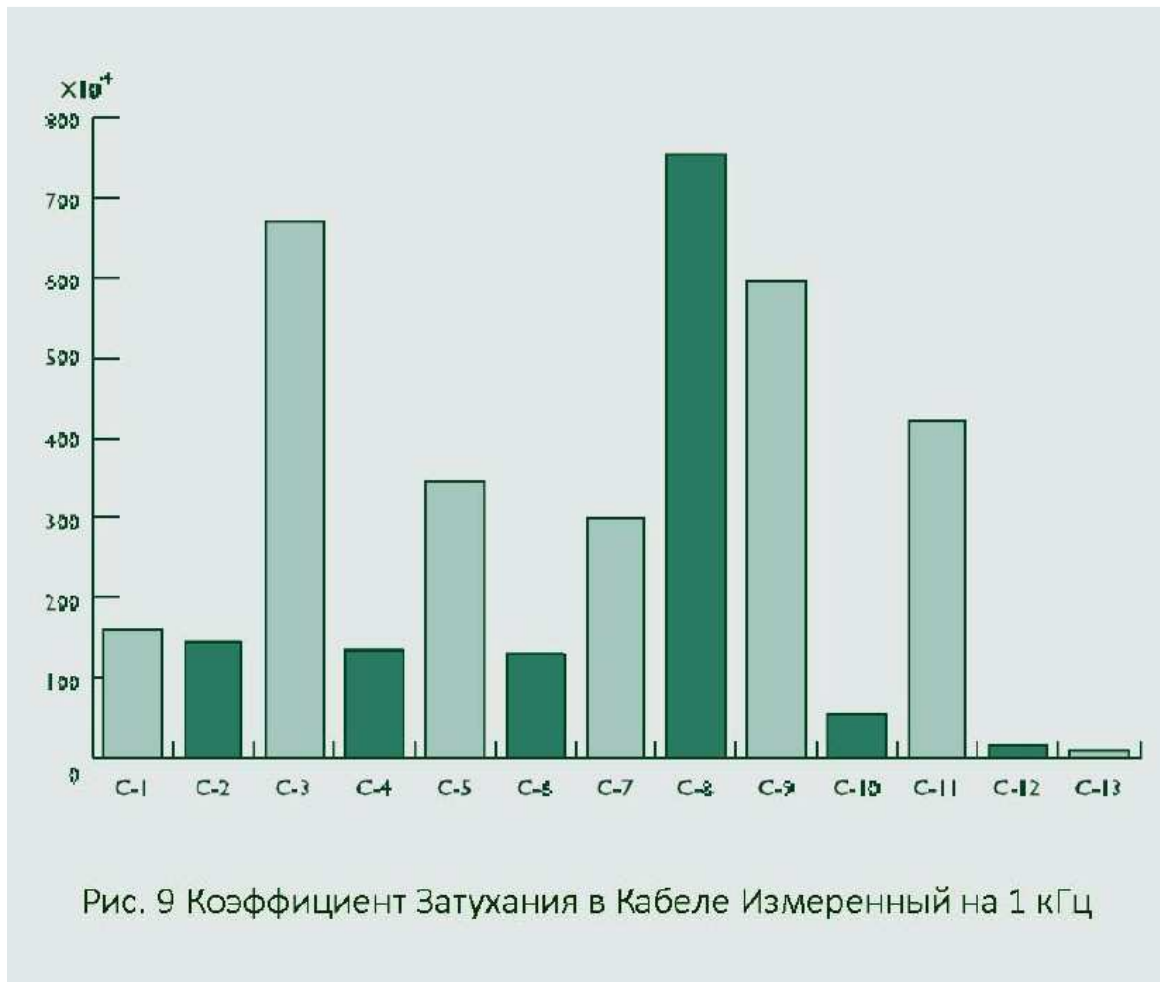
Рис. 8 Частотная Характеристика при Использовании Кабеля с Высокой Индуктивностью (Емкостная Нагрузка)

Еще один эффект, связанный с индуктивностью, заключается в ослаблении амплитуды на высоких частотах за счет роста импеданса кабеля с частотой (индуктивное сопротивление растет с частотой). Итак, чем выше частота, тем более слабый сигнал приходит на коммутационные терминалы акустических систем. Интересно, что кабели с высокой индуктивностью также могут являться причиной повышения напряжения на клеммах акустической системы за счет выходного сигнала усилителя. Это связано со сложными взаимосвязями между индуктивным и емкостным сопротивлениями, а также постоянным сопротивлением, которые могут привести к появлению ослабленного резонанса. Это может стать проблемой для электростатических громкоговорителей, которые представляют собой нагрузку с более высокой емкостью, чем обычные электродинамические акустические системы.

Пример резонансного ослабления сигнала показан на Рис.8 в сравнении с чистым выходным сигналом усилителя. В данном случае увеличение импеданса кабеля на

высоких частотах приводит к заметным потерям уровня сигнала, складываясь с собственным спадом характеристики усилителя.

Диэлектрики



Проводники акустического кабеля покрыты изоляцией или диэлектриком для предотвращения короткого замыкания. Это неизбежно приводит к дополнительным потерям, поскольку диэлектрики поглощают часть энергии. Потери в диэлектрике иногда связывают с коэффициентом затухания или тангенсом угла потерь в диэлектрике (практически аналогичным коэффициенту мощности) и они увеличиваются с частотой. Вообще, чем выше коэффициент затухания на данной частоте, тем больше потери мощности в диэлектрике. Подборка измерений коэффициентов поглощения в наших образцах кабелей показана на Рис.9. Он иллюстрирует необычайно широкий разброс результатов.

Все диэлектрики также обладают свойством, которое называется диэлектрическая проницаемость. Наименьшей проницаемостью, не считая вакуума, обладает воздух, который позволяет получить наименьшие потери среди всех известных материалов. Чем выше проницаемость, тем выше потери и тем выше емкость. Это связано с тем, что диэлектрическая проницаемость определяет, насколько диэлектрик проницаем для

электрического поля, которое в основном, и определяет емкость конденсатора. Наоборот, чем ниже проницаемость (чем ближе к вакууму) диэлектрика, тем ниже будут и потери и емкость. Если мы примем вакуум за точку отсчета с диэлектрической постоянной равной 1, то сможем ввести диэлектрическую постоянную для любого диэлектрика. К примеру, воздух будет иметь диэлектрическую постоянную 1,0006, которая по большому счету аналогична вакууму для любых практических применений.

Диэлектрические Постоянные (ϵ_r) и потери ($\tan d$) для нескольких популярных материалов изоляции кабелей приведены ниже:

Материал изоляции	ϵ_r	Приблизительный $\tan d$ на 10 кГц
Поливинилхлорид (ПВХ)	4,0 – 8,0	0,01 – 0,05
Полиэтилен	2,6	0,0002
Полипропилен	2,25	0,0004
Политетрафторэтилен (Тефлон)	2,1	0,002
Воздух (для сравнения)	1,0006	Практически 0
Вакуум (для сравнения)	1,0000	0

Емкость также определяется диаметром и промежутками между проводниками. Чем больше зазор между двумя проводниками в данном диэлектрике, тем меньше емкость (для индуктивности верно обратное). Взглянув на таблицу выше, несложно увидеть, что сделать кабель, обладающий низкими значениями емкости и индуктивности, используя низкокачественный диэлектрик, практически невозможно.

Большинство дешевых кабелей и в том числе многие из тех, которые мы тестировали, использовали изоляцию из ПВХ, за счет чего увеличивались собственные емкость и диэлектрические потери в кабеле. Что бы вы ни делали с диаметром и расстоянием между проводниками, в таких кабелях обязательно будут проблемы, связанные либо с высокой емкостью, либо с высокой индуктивностью, либо и с тем и с другим.

Проводимость в кабелях

Еще одним свойством диэлектриков, которое влияет на работу кабеля и связано с диэлектрическими потерями, является проводимость (G). Проводимость определяет, насколько хорошо проводники изолированы друг от друга. Чем ниже проводимость (G), тем выше сопротивление изоляции (R_p). Более качественные диэлектрики являются более хорошими изоляторами, поскольку в них находится меньшее количество «свободных» электронов, переносящих электрический ток через материал диэлектрика при передаче по кабелю электрического сигнала.

Эффекты, связанные с емкостью

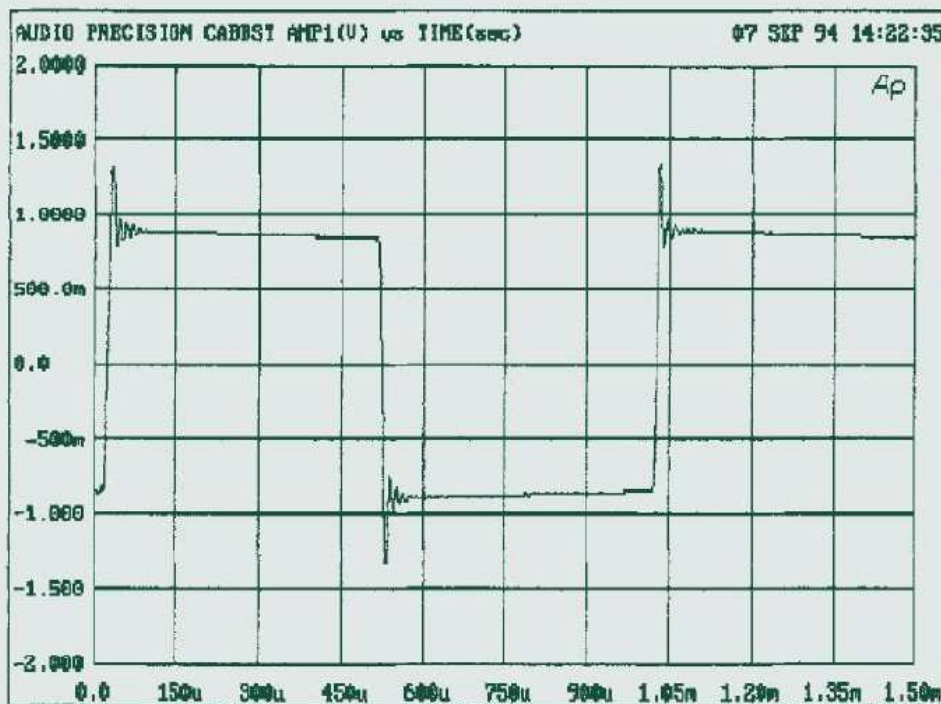


Рис.10 Послезвучия на Высоких Частотах
при Использовании Кабеля с Высокой Емкостью

В теории емкость кабеля не должна оказывать серьезного влияния на работу аудиосистемы, поскольку кабель подключается к источнику с очень низким сопротивлением (как правило, долями Ома для большинства усилителей мощности). Хотя емкость представляет собой своеобразный фильтр низких частот при подключении кабеля к источнику с таким маленьким импедансом, ее влияние на частотную характеристику, как правило, незначительно. Гораздо важнее то, что чрезмерно высокая емкость

акустического кабеля может свидетельствовать о низком качестве диэлектрика и высоких диэлектрических потерях.

Некоторые экзотические кабели используют несколько независимо изолированных параллельных жил, формирующих два проводника. При определенной геометрии и использовании низкокачественных материалов подобная конструкция может привести к росту емкости до очень высокого уровня. Один из таких кабелей, обнаруженный среди наших тестовых образцов, имел емкость порядка 1375 пФ (для сравнения средняя величина емкости для других образцов 10-метровой длины составляла порядка 500 пФ).

Еще один фактор, который нужно принимать во внимание, это стабильность усилителя. В некоторых случаях небольшая избыточная емкость на выходе усилителя может привести к тому, что он начнет осциллировать, перегреваться или даже может перегореть. Также усилитель может начать кратковременно осциллировать на радиочастотах во время работы, не проявляя при этом никаких заметных симптомов. Хорошо сконструированные усилители обычно имеют значительный запас мощности и устойчивости к фазовым искажениям, так что небольшой дополнительный фазовый сдвиг, возникающий из-за увеличившейся емкости, не приводит к подобным проблемам. К сожалению, некоторые усилители, имеющиеся в продаже, не обладают устойчивостью, необходимой для стабильной работы в нестандартных условиях, и именно в них могут быть проблемы, связанные с использованием длинных кабелей с большой емкостью. Ирония данной ситуации заключается в том, что индуктивность, как правило, остается низкой в кабелях с высокой емкостью, что приводит к еще большему уменьшению запаса стабильности усилителя. Даже если усилитель и не перешел полностью в нестабильный режим, то качество звучания может страдать, звук становится грубым и выпяченным за счет того, что усилитель работает на самом пороге перехода в нестабильный режим. На Рис.10 показана нестабильность, вызванная применением кабеля с высокой емкостью, которая проявляется в виде звона при передаче меандра высокой частоты.

Емкость и индуктивность

Если рассмотреть одну пару проводников в конкретном диэлектрике, то уменьшая расстояние между ними, мы уменьшим индуктивность и увеличим емкость, в то время как увеличение расстояния между проводниками приведет к обратному эффекту. Многие считают, что бороться с этой тенденцией невозможно и что индуктивность кабеля невозможно уменьшить, не увеличивая при этом емкость. В самом деле, данное утверждение чуть не стало своеобразным фольклорным законом в аудиоиндустрии. Однако сравнения, проведенные для проводников с различной геометрией, даже если они имели одинаковую эффективную площадь поперечного сечения (а следовательно и одинаковое сопротивление постоянному току) и одинаковые материалы диэлектриков, показали, что это возможно путем простого изменения взаимного расположения и конфигурации проводников (см. Таблицу 1).

	Qudos	Profile 8 (внутр/внеш)	Profile 8 (лев/пр)
C (пФ/м)	35,6	37,2	21,3
L (мкГ/м)	0,55	0,39	0,54
R (МОм/м)	14,0	15,0	15,0
Z (Ом/м)	118,5	104,7	159,6



Profile8

QED
Qudos(QED Original)

Здесь приведены результаты тестов кабелей, проведенных в ходе работы над Genesis Report и иллюстрирующих огромное влияние геометрии кабеля. Сопротивление, индуктивность и емкость измерялись для стандартных кабелей серий Qudos и Profile 8. Стандартный кабель Qudos представляет собой два жгута, каждый из которых состоит из 79 жил диаметром 0,2 мм и имеет в поперечном сечении форму восьмерки. Profile 8 состоит из восьми жгутов, каждый из которых состоит из 19 жил толщиной по 0,2 мм и имеет линейную геометрию поперечного сечения. Эффективная площадь поперечного сечения этих кабелей, а следовательно и сопротивление постоянному току, примерно одинаковые. В обоих кабелях используется изоляция из полиэтилена низкой плотности. Следовательно любые различия в индуктивности и емкости связаны с геометрией. Кабель Profile 8 можно подключить различными способами. В Таблице 1 приведены результаты при использовании в качестве прямого и обратного проводов кабеля четырех внутренних и четырех внешних проводников, а также четырех левых и четырех правых проводников. В сравнении со стандартным кабелем Qudos, Profile 8, в конфигурации четырех внешних и четырех внутренних проводников обладает значительно меньшей индуктивностью и слегка большей емкостью, что противоречит «эмпирическому правилу», которое часто цитируют. Наоборот, в конфигурации, использующей правые и левые проводники, Profile 8 имеет такую же индуктивность, как и Qudos, а вот емкость уменьшается практически вдвое. Также представляет интерес то, что геометрия влияет и на волновой импеданс, впрочем, данный интерес носит чисто академический характер.

Акустическое взаимопроникновение каналов

Один из субъективных эффектов, на который часто обращают внимание слушатели, заключается в расширении звуковой сцены при использовании какого-нибудь определенного кабеля. На первый взгляд, объяснить это явление довольно трудно, учитывая высокую электрическую изоляцию между стерео каналами. Мы подумали, что объяснение может заключаться в том, что правый и левый каналы акустически связаны через сами громкоговорители. В идеале, левый громкоговоритель должен излучать звуковую волну только под воздействием электрического сигнала левого канала и наоборот.

В каждом из каналов усилителя в идеале должен использоваться электромагнитный демпфер со своим собственным громкоговорителем, который не дает его диффузорам двигаться под воздействием звуковых волн от другого громкоговорителя. Это демпфирование должно достигаться за счет очень низкого выходного сопротивления усилителя, но на практике в процесс вмешивается сопротивление акустического кабеля, которое увеличивает величину сопротивления усилителя, которую «видит» громкоговоритель, и соответственно ослабляет демпфирование. Таким образом в звуке, излучаемом диффузорами каждого громкоговорителя, присутствует сигнал (с определенной задержкой), который был воспроизведен другим громкоговорителем, что приводит к сужению звуковой сцены. Если данное предположение верно, то кабели с низким сопротивлением позволят построить более широкую звуковую сцену.

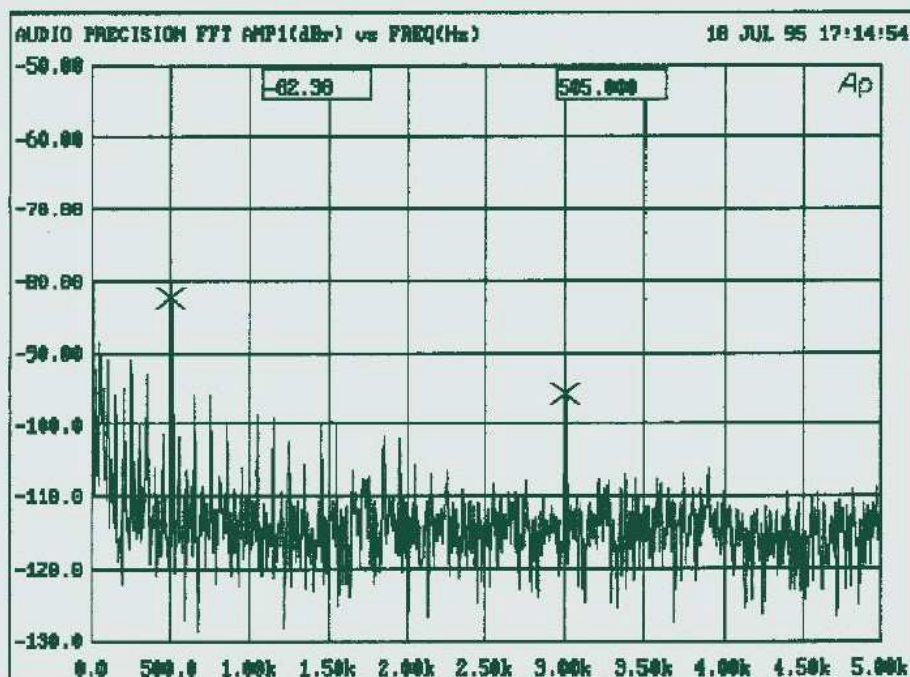


Рис.11 Выходной Уровень Акустических Систем в Отсутствии Сигнала на Входе на 500 Гц и 3 кГц

Несмотря на то, что данные рассуждения кажутся слишком замысловатыми, измерения напряжений на терминалах акустических систем, показанные на Рис.11 и 12 иллюстрируют именно такой эффект. Пиковые значения, помеченные крестиками, представляют собой амплитуды сигналов, сгенерированных перемещениями диффузора акустической системы, на которую не подается электрический сигнал, которые вызваны тем, что акустическая система другого канала воспроизводит тестовый тон. Напряжение на коммутационных клеммах акустической системы, измеренное при воспроизведении другой колонкой тестового тона с частотой 500 Гц, уменьшилось примерно на 10 дБ благодаря использованию кабеля с более низким сопротивлением (Рис.12).

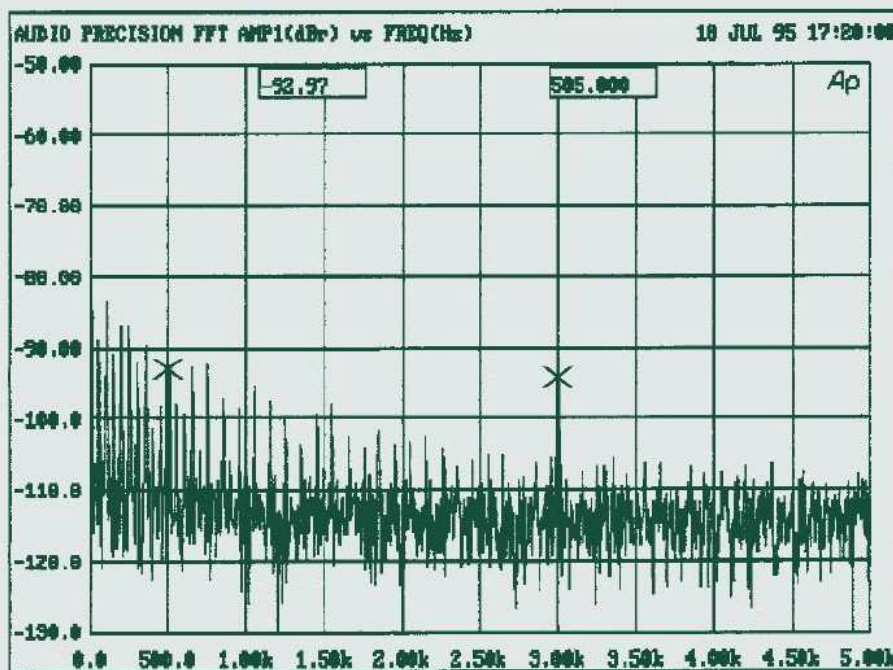


Рис.12 Выходной Уровень АС в Отсутствии Сигнала на Входе на 500 Гц и 3 кГц при использовании Кабеля с Низким Сопротивлением

Переходные характеристики

Как уже упоминалось ранее, акустические системы в общем случае представляют собой очень сложную электрическую нагрузку, которая сама также генерирует напряжение (как под воздействием звуковых волн, проникающих снаружи, так и за счет энергии остающейся в колебательной системе самого громкоговорителя), которое возвращается обратно к усилителю (данное явление также известно как обратная ЭДС). Данное явление может происходить в случаях, описанных в предыдущем разделе, а также при быстрых изменениях амплитуды сигнала, приводящих к появлению у громкоговорителя послезвучий – т.е. наличия звука в отсутствие входного электрического сигнала от усилителя. Амплитуда этих послезвучий зависит от совокупной способности усилителя и кабелей демпфировать и контролировать нежелательные остаточные колебания.

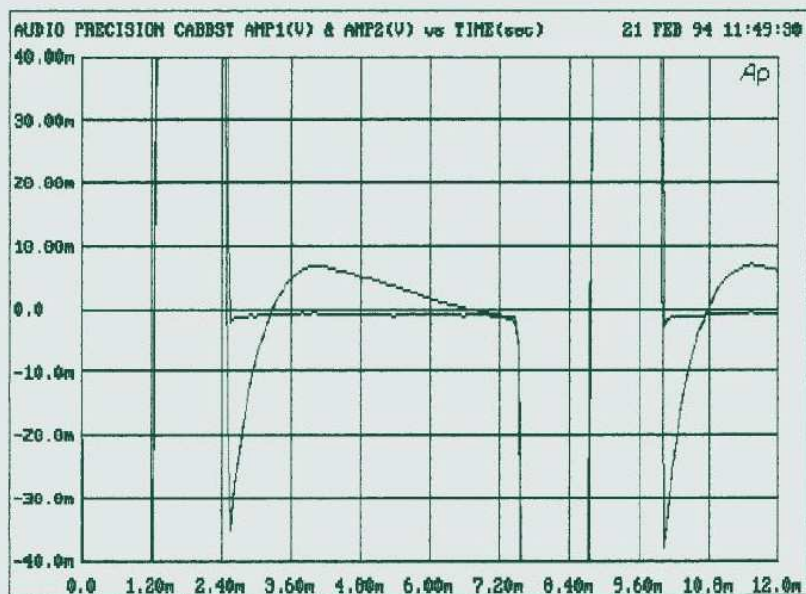


Рис.13 Передача Переходных Процессов при использовании Кабеля с Высоким Сопротивлением. Импульс Синусоидальной Волны 400 Гц подается на АС в Закрытом Корпусе

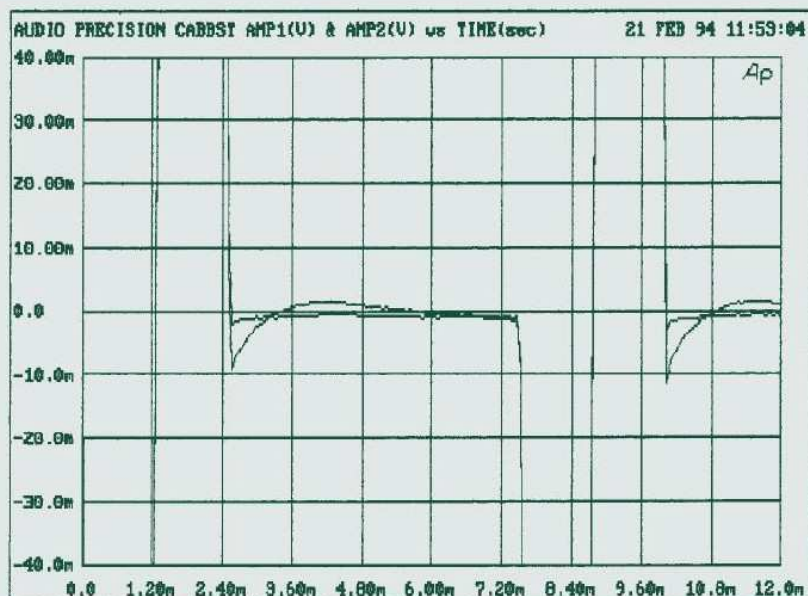


Рис.14 Передача Переходных Процессов при использовании Кабеля с Низким Сопротивлением. Импульс Синусоидальной Волны 400 Гц подается на АС в Закрытом Корпусе

На Рис.13 показаны временные зависимости напряжения на выходе усилителя и на входе акустических систем. Хорошо видно, что по прошествии 2,4 миллисекунд, когда напряжение на выходе усилителя падает до нуля, напряжение на входе акустики уходит в

отрицательную область, затем начинает расти, переходит нулевую отметку, становится положительным и лишь затем падает до нуля. Такое поведение напряжения на терминалах колонок связано с нежелательными перемещениями диффузора. АС.

На Рис.14 показаны графики для того же самого громкоговорителя, но подключенного кабелем с меньшим сопротивлением. То, что результаты измерений стали лучше – совершенно очевидно. Индуктивность кабеля также увеличивает общий импеданс между усилителем и акустическими системами, и наши измерения показали, что индуктивность кабеля оказывает негативное влияние на воспроизведение переходных процессов. Сложная электромеханическая система громкоговорителя работает наилучшим образом, если она хорошо задемпфирована и подключена кабелем с максимально низким импедансом во всем частотном диапазоне, а не только на низких частотах, на которых передвижения диффузора контролируются величиной сопротивления постоянному току.

Искажения, внесенные использованием кабеля

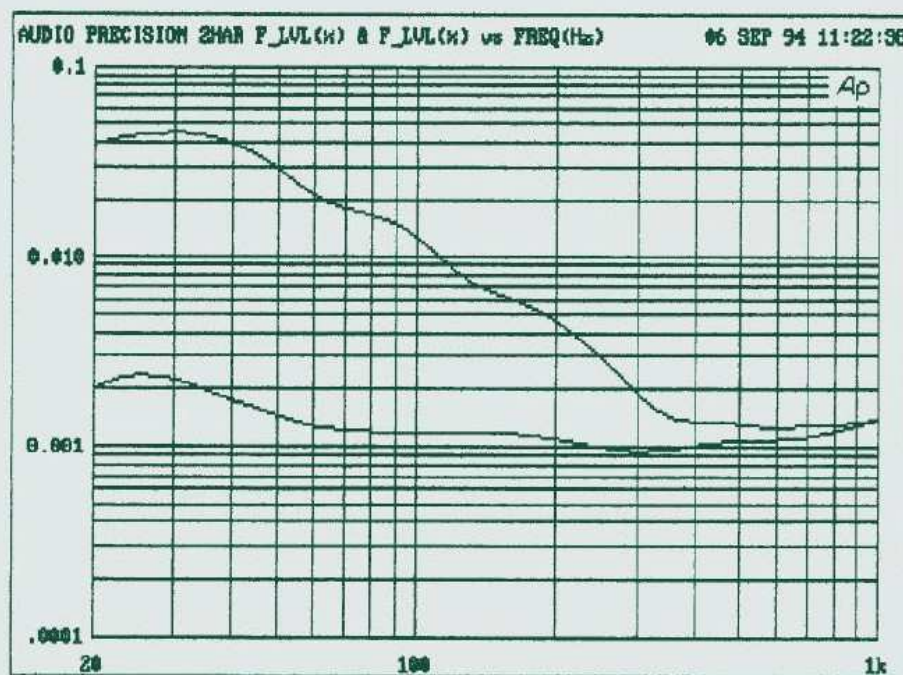


Рис.15 Амплитуда Второй Гармоники на НЧ
(Высокое Сопротивление)

Акустический кабель «отдаляет» (в электрическом плане) громкоговоритель от усилителя в силу ряда причин – за счет электрического сопротивления постоянному току, которое портит частотную характеристику, демпфирования и разделения, как мы обнаружили. В дополнение к этому измерения показали, что величина искажений на входе АС существенно больше (в особенности это касается второй гармоники) чем на выходе усилителя.

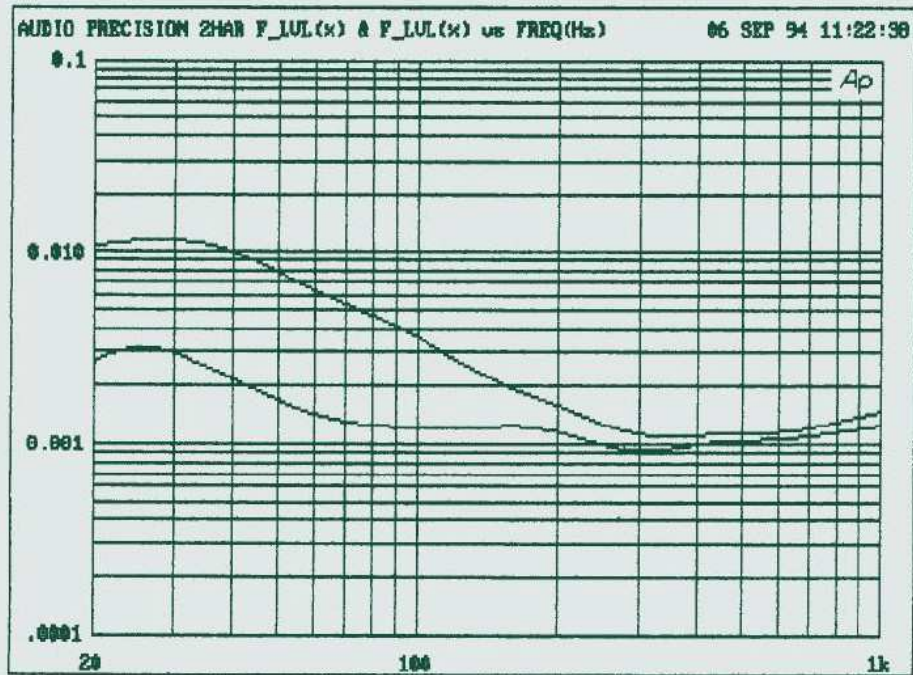


Рис.16 Амплитуда Второй Гармоники на НЧ
(Низкое Сопротивление)

Мы обнаружили, что ухудшение качества (и достоверности передачи исходного сигнала) сильно зависит от постоянного сопротивления кабеля, а также типа акустических систем.

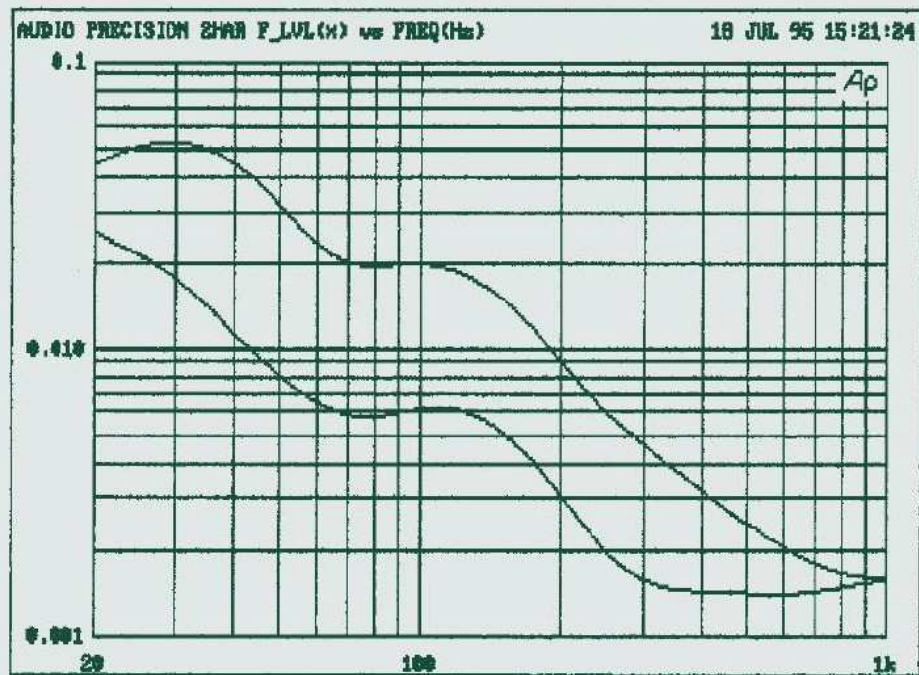


Рис.17 Анализ Второй Гармоники при использовании
Одинакового Кабеля, но с Разными АС

На Рис. 15 и 16 показаны зависимости амплитуды второй гармоники сигнала от частоты. Верхняя кривая на каждом из 2 графиков показывает искажения на входе АС, а нижняя – на выходе усилителя.

На Рис.15 (кабель с высоким сопротивлением порядка 0,065 Ом/м) величина искажений примерно в 3 раза больше, чем на Рис. 16 (кабель с низким сопротивлением порядка 0,004 Ом/м).

На Рис. 17 показаны зависимости для разных акустических систем, подключенных одинаковым кабелем. Отметим, что кабель сам по себе не может вызывать появление искажений (поскольку его постоянное сопротивление практически линейно), скорее его присутствие в системе не позволяет механизму обратной связи усилителя точно скорректировать искажения, которые генерируются за счет различных нелинейных явлений внутри аудиосистемы.

Подключение усилителя напрямую к акустическим системам позволило очень точно скорректировать искажения. Необходимы дальнейшие исследования, но очень похоже, что на искажения на низких частотах частично влияет и резонансная частота корпуса АС. В дополнение нужно сказать, что величина искажений на средних и высоких частотах существенно увеличивается при повышении индуктивности кабеля, которая увеличивает импеданс кабеля и следовательно снижает демпфирующее воздействие усилителя и кабеля на акустическую систему.

Искажения в многожильных и одножильных кабелях

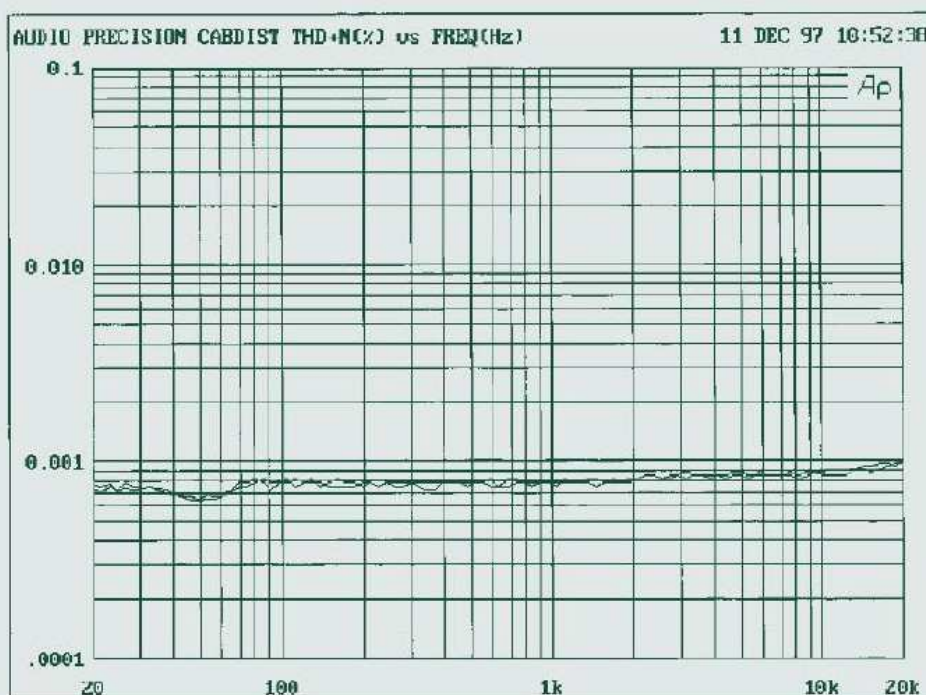


Рис.18 Измеренные искажения при передаче сигнала с одной жилы на другую, а также для всех жил акустического кабеля

Существует точка зрения, что в многожильных кабелях наблюдается так называемый диодный эффект, появляющийся за счет того, что ток «перескакивает» между жилами в кабеле, и таким образом при перемещении электронов от одного конца провода к другому, они также проходят через множество границ металл-оксид-металл, расположенных между жилами (иногда это связывают также и с влиянием скин-эффекта, который «выдавливает» электрический ток из центра проводника к поверхности на высоких частотах).

Делая предположение, что ток действительно «перескакивает» между жилами (для нас это было совершенно неочевидно, но как мы обнаружили ранее, скин-эффект не оказывает существенного влияния на аудиосигнал в акустическом кабеле), мы подали сигнал на вход одной жилы проводника и провели измерения на выходе другой жилы. Даже при использовании всех ресурсов нашего измерительного комплекса Audio Precision AP1 нам не удалось обнаружить никакого увеличения величины искажений по сравнению с результатом, полученным при использовании всех жил проводника (см. Рис.18). В обоих случаях измерения показали настолько близкие результаты, что их с легкостью можно принять за два последовательных результата одного и того же теста. В данном примере наши предположения не подтвердились. Похоже на то, что диодные переходы между жилами либо не существуют, либо «закорачиваются» множеством хороших проводников, тщательно спрессованных вместе по всей длине кабеля.

Волновой импеданс

Этот термин иногда употребляется в контексте аудио кабелей, хотя в первую очередь он ассоциируется с линиями передачи. Волновой импеданс имеет решающее значение при определении правильных величин импеданса нагрузки и источника в высокочастотных линиях передачи для предотвращения возникновения нежелательных отражений и стоячих волн. Для корректной работы линия передачи должна быть оснащена на обоих концах резистивной нагрузкой, эквивалентной волновому импедансу.

Акустические кабели не являются линиями передачи, поскольку их длина –небольшая по отношению к длине волны. В любом случае, акустические кабели нельзя оснастить одинаковой резистивной нагрузкой на обоих концах (8-омный импеданс на выходе усилителя полностью нарушит демпфирование и приведет к росту неравномерностей АЧХ и росту искажений).

Направленность

Измерения, призванные выявить асимметрию тестируемых образцов, некоторые из которых были помечены производителями как направленные, не подтвердили существования направленности акустических кабелей. Слепые прослушивания также показали, что слушатели не способны различить направленность кабелей. С другой стороны, было обнаружено, что положение кабеля оказывает влияние, как на результаты измерений, так и на результаты прослушиваний. Это значит, что любые измерения и любые прослушивания кабелей должны проводиться при одинаковом позиционировании тестируемого кабеля.

Заключение

Конечно, всегда найдутся люди, скептически настроенные в отношении значения акустических кабелей, но результаты наших исследований ясно показали, что качество работы системы может улучшаться или ухудшаться в зависимости от того, какой кабель используется в ней. Анализ полученных данных показал, насколько сильно звучание связано с результатами измерений.

Приведем обобщенные результаты наших исследований:

1. **Постоянное сопротивление.** Низкое сопротивление кабеля имеет одно из приоритетных значений для достижения высокого качества воспроизведения, но оно не должно достигаться за счет других важных параметров. Высокое сопротивление кабеля приводит к нежелательным последствиям, таким как: неравномерности частотной характеристики, недостатки в передаче переходных процессов, увеличение звуковых искажений, ухудшение разделения каналов. Все кабели с высоким сопротивлением имели плохие результаты соответствующих измерений. Субъективно же их качество звучания очень сильно зависело от подключенных акустических систем. Выпячивание средних частот, хорошо заметное на слух при подключении некоторых кабелей, полностью соответствовало форме их измеренной частотной характеристики. Высокое сопротивление кабеля также приводило к заметному сглаживанию динамических всплесков при передаче масштабных музыкальных композиций.
2. **Индуктивность.** Индуктивность кабеля является первостепенной причиной ослабления высоких частот и появления фазового сдвига. Индуктивность приводит к росту импеданса с частотой, а следовательно, к заметному ослаблению высокочастотного диапазона сигнала на входе акустической системы, а иногда даже к обрезанию пиков ВЧ-сигнала. В дополнение к этому индуктивность повышает величину искажений на входе АС и ухудшает общие переходные характеристики акустической системы. Таким образом, для получения равномерных частотных и фазовых характеристик, низких искажений и полноценной передачи звуковых переходов акустическими системами, индуктивность акустического кабеля должна быть низкой.
3. **Скин-эффект.** Измерения показали, что скин-эффект оказывает минимальное влияние на кабели с относительно небольшой площадью поперечного сечения. В то же время кабели с более толстыми проводниками сильнее подвержены влиянию скин-эффекта, а также обладают более высокой индуктивностью, которая приводит к большим потерям сигнала на высоких частотах. Влияние скин-эффекта становится заметным только на частотах, существенно превышающих самые высокие частоты звукового диапазона. Несмотря на то, что реактивный импеданс кабеля с проводниками большого поперечного сечения выше, чем у кабеля с проводниками малого поперечного сечения, его эффективное сопротивление (сумма реактивного и постоянного сопротивлений) все равно будет ниже. Скин-эффект имеет также несколько неожиданный побочный эффект, который заключается в снижении величины фазового сдвига из-за индуктивности кабеля на высоких частотах.
4. **Качество изоляции.** Было доказано, что коэффициент затухания является красноречивым показателем качества звучания. В большинстве хорошо звучащих

кабелей используются качественные диэлектрические материалы: кабели с ПВХ-изоляцией показали наихудшие звуковые результаты. Кабели с плохими результатами измеренных диэлектрических потерь хуже справились с передачей мелких деталей и звуковой атмосферы, в то время как кабели с качественными диэлектриками воспроизвели их в полном объеме.

5. **Постоянство характеристик.** Акустические кабели взаимодействуют как с усилителем, так и с акустическими системами. В связи с этим результаты измерений, полученные для некоторых кабелей, менялись при работе кабелей в различных системах. Оказалось, что наиболее стабильными характеристиками обладают кабели с минимальными сопротивлением, индуктивностью и емкостью. Несмотря на то, что усилителю необходима определенная индуктивность на выходе для сохранения стабильности, применение максимально коротких акустических кабелей позволяет улучшить качество воспроизведения. Высокой индуктивности кабеля также следует избегать, поскольку она может привести к нестабильной работе усилителя, испортить качество звучания и снизить запас надежности усилителя.
 6. **Направленность.** Несмотря на все возрастающую любовь производителей к указанию направленности их кабелей, наши измерения, проведенные при строго контролируемых одинаковых условиях, не выявили ничего, что могло бы свидетельствовать о том, что акустические кабели являются направленными. С другой стороны, было обнаружено, что даже простое изменение положения кабеля приводит к изменению его индуктивности и емкости.
 7. **Монолитные и многожильные кабели.** В последнее время популярность многожильных проводников стала расти. Существует мнение, что достаточно тонкий монолитный проводник обладает примерно одинаковыми потерями как на низких, так и на высоких частотах, в то время, как для более толстого многожильного проводника их величины существенно отличаются. Наши исследования показали, что данное явление связано скорее с изоляцией и геометрией ряда кабелей с многожильными проводниками, которые и являются истинной причиной более высокого качества работы по сравнению с многожильными проводниками. В любом случае, параллельное расположение проводников, неважно, моно- или многожильных, позволяет снизить индуктивность, которая оказывает на звук гораздо большее влияние, чем тот же скин-эффект.
Протестированные многожильные кабели обладали более высокой индуктивностью и величиной утечек тока, чем многие из моножильных кабелей, которые в основном использовали независимо изолированные проводники (что обеспечивает снижение индуктивности) с диэлектриками более высокого качества (что обеспечивает меньшие потери из-за утечек). Мы не обнаружили никаких подтверждений популярной теории о том, что в многожильных кабелях возникают искажения за счет диодного эффекта между отдельными жилами, так что ее смело можно отнести к разряду ложных предположений.
 8. **Металлургия.** Проводники, изготовленные из меди с высокой степени очистки (чистотой >99,99%) обладают чуть лучшей электрической проводимостью. Заметное улучшение проводимости наблюдается в медных проводниках, покрытых серебром, а также в серебряных проводниках. В целом же, рассматривая всю группу протестированных нами кабелей, можно сказать, что геометрия и диэлектрические материалы оказывают на звуковые характеристики кабеля гораздо большее влияние, чем металл, из которого изготовлены проводники.
-

Результаты Genesis Report

Приведенные обобщения (1, 2, 3, 4 и 5) показали, что акустический кабель с наиболее точным звуком и стабильными характеристиками должен иметь минимальное постоянное сопротивление, индуктивность и емкость в сочетании с низкими диэлектрическими потерями. Все результаты наших исследований подтвердили этот простой вывод. Кабели, использующие в своей конструкции проводники с маленькой площадью поперечного сечения для того, чтобы избавиться от влияния скин-эффекта (который в любом случае не представляет собой никакой проблемы на аудио частотах), имеют более высокое постоянное сопротивление, приводящее к очевидным негативным последствиям. Благодаря Genesis Report инженерам QED удалось опровергнуть «правило», которое устанавливало прямую взаимосвязь между индуктивностью и емкостью кабеля. Емкость и диэлектрические потери были уменьшены за счет выбора подходящего изоляционного материала высокого качества (полиэтилен низкой плотности). В дополнение к этому, за счет минимизации толщины изолирующей оболочки и специальных узких соединений между проводниками в кабеле (обеспечивающих большую механическую стабильность) было улучшено соотношение воздуха к сплошному диэлектрику, что позволило еще уменьшить емкость и диэлектрические потери. Располагая несколько параллельных многожильных проводников оптимальным образом, инженерам QED удалось одновременно снизить и емкость и индуктивность кабеля ниже величины, рассчитанной для простой пары проводников с таким же постоянным сопротивлением. Использование многожильных проводников с достаточно высокой площадью поперечного сечения позволило сохранить низкое значение постоянного сопротивления. Результатом исследований стало появление акустических кабелей высшего класса с низкими потерями и прозрачным звучанием. Взаимосвязь между качеством изоляции и звуковыми характеристиками кабеля также повлияла на конструкцию межблочных кабелей QED, в которой используется вспененный полиэтилен низкой плотности, позволяющий увеличить соотношение воздуха к сплошному диэлектрику и получить наилучшее качество звучания.



Научный Подход к Разработке Кабелей

***система с сосредоточенными параметрами**

СИСТЕМА С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ (дискретная система) - система, движение которой может быть описано как движение конечного числа точечных объектов (строго сосредоточенные параметры) или протяжённых объектов с жёстко фиксированной внутр. структурой (параметры, сводимые к сосредоточенным). Напр., тело, подвешенное на нити (маятник), относится к С. с с. п., если его можно считать точечным, а нить - нерастяжимой и невесомой; колебат. контур, состоящий из [индуктивности](#) L , ёмкости C и сопротивления R , является С. с с. п., когда размеры всех его элементов значительно меньше длины эл.-магн. волны и структуру полей в элементах L , C и R можно идеализировать как жёстко фиксированную.

Описание движения С. с с. п. обычно основывается на ур-ниях, связывающих обобщённые координаты и обобщённые импульсы (в т. ч. поля, токи, [напряжения](#)) входящих в неё объектов. Порядок этих ур-ний определяется числом степеней свободы С. с с. п. Так, плоское движение маятника в поле тяжести или изменения тока в L , C , R -контуре описывается дифференц. ур-ниями 2-го порядка и соответствует С. с с. п. с одной степенью свободы. Ур-ния движения консервативных (сохраняющих энергию) С. с с. п. могут быть получены из вариационного принципа (см. [Наименьшего действия принцип](#)). При этом различаются три осн. типа эквивалентных описаний движения С. с с. п.: через Лагранжа ф-цию, содержащую обобщённые координаты и скорости, через Гамильтона ф-цию, содержащую обобщённые импульсы и координаты, и через ф-цию действия (см. *Гамильтона - Якоби уравнение*), выраженную через обобщённые координаты и их производные. В первых двух случаях в ур-ния входят полные производные по времени, в последнем случае - частные производные.

Литература.: Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э., Теория колебаний, 3 изд., М., 1981; Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., [Механика](#), 4 изд., М., 1988; Мандельштам Л. И., Лекции по теории колебаний, М., 1972. М. А. Миллер.