

## Статья "Громкоговорители, часть 7"

18 Мар 2013 15:15 — Dmitry Popov



Автор:

Ирина Алдошина

Дата первой публикации:

июль 2009

### *Звуковые кабели в акустических системах.*

Завершая серию статей по акустическим системам, необходимо остановиться еще на одном важном элементе акустической системы — звуковом кабеле, соединяющем ее с усилителем низкой частоты (УНЧ). Поскольку звуковые кабели работают с высокими уровнями напряжения (например, при подключении к стоваттному усилителю акустической системы с номинальным сопротивлением 8 Ом сила тока будет равна 3,5 А), для них требуется использовать проводники с довольно большим сечением. До 80-х годов XX века подход к выбору звукового кабеля был довольно прагматичным: требовалось минимизировать потери мощности при передаче сигнала от усилителя к громкоговорителю и спад АЧХ по напряжению на высоких частотах. Потери первого вида определяются активным сопротивлением кабеля, вторые — взаимодействием индуктивности и емкости кабеля с реактивным сопротивлением акустической системы.

Однако в последние годы появилось много публикаций в отечественных и зарубежных журналах по результатам субъективных тестирований различных конструкций звуковых кабелей, доказывающих чрезвычайно большое влияние кабеля на качество звучания акустической системы (чистоту, прозрачность, четкость и др.), особенно на высоких частотах. Для объяснения этих явлений стали искать разнообразные причины: влияние примесей кислорода в меди, скин-эффект, эффект дисперсии (то есть зависимость скорости распространения сигнала от частоты), фазовый сдвиг, поглощение в изоляторах, электромагнитные наводки и др.

*Примечание. Как обычно искали не то. Достаточно снять ГВЗ и оценить его значение (чем меньше тем лучше) и стабильность (чем меньше дисперсия — тем лучше).*

Серьезные научные работы были опубликованы в отечественной литературе по длинным (трансмиссионным) линиям. Однако по звуковым кабелям у нас, в основном, публиковался чрезвычайно противоречивый материал. Поэтому кратко изложенные ниже данные по теории звуковых кабелей опираются на труды таких известных специалистов, как R. A. Greiner, A. Davis, G. Ballou и др., опубликованных в журналах JAES, JASA, трудах конгрессов AES и энциклопедиях.

### **Характеристики звуковых кабелей**

Прежде всего, необходимо отметить, что **звуковой кабель, используемый для акустических систем (рис. 1), обычно имеет длину приблизительно от трех до десяти метров, что позволяет рассматривать его как систему с сосредоточенными параметрами**, поскольку его длина значительно меньше длины электромагнитной волны в пределах звукового диапазона  $L \ll \lambda$ .

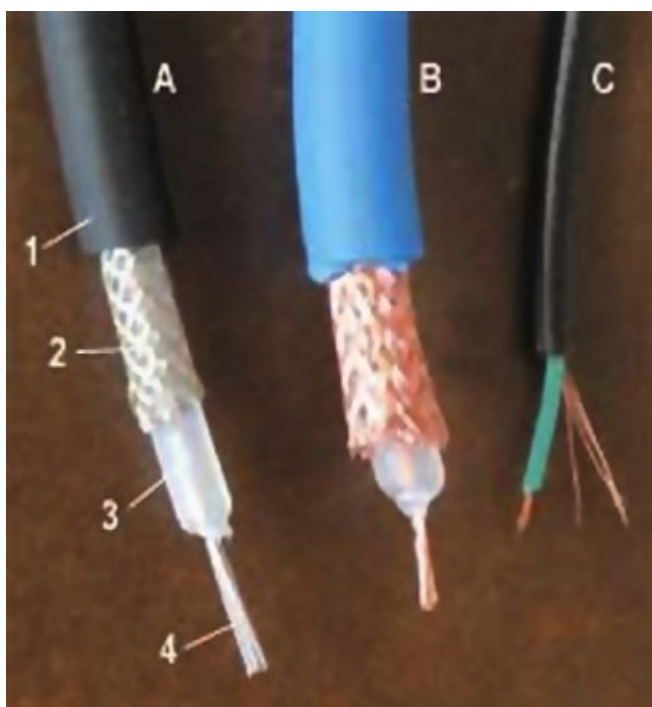


Рис. 1

Длина волны определяется как  $\lambda = v / f$ , где  $v$  — скорость распространения электромагнитной волны в кабеле, которая связана со скоростью распространения ее в вакууме ( $c$  — скорость света в вакууме равная  $3 \times 10^8$  м/с) следующим соотношением  $v = c / \mu \epsilon$ , где  $\mu$  — магнитная, а  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды (изолятора). Например, для полипропилена она равна 2,3, для тефлона — 2,1, для PVC — 3,5, то есть значение скорости распространения электромагнитной волны в кабеле может составлять минимум половину скорости света —  $1,5 \times 10^8$  м/с (значение  $\mu$  можно считать близким к единице).

Отсюда минимальная длина волны на верхней частоте звукового диапазона составит  $\lambda_{\min} = 1,5 \times 10^8$  (м/с) /  $2 \times 10^4$  (Гц) = 7,5 км. Поскольку в звуковом кабеле выполняется соотношение  $L \ll \lambda$  (как было отмечено ранее, в АС используется кабель длиной 3-10 м), то можно расчет его параметров производить, исходя из эквивалентной схемы для системы с сосредоточенными параметрами, представленной на рис. 2 (расхождение между расчетами по этой схеме и расчетами по точной теории трансмиссионных линий начинает проявляться на частотах выше 50 кГц).

*Примечание. Это подтверждает и тест трех вариантов моделей (приведен в приложении)*

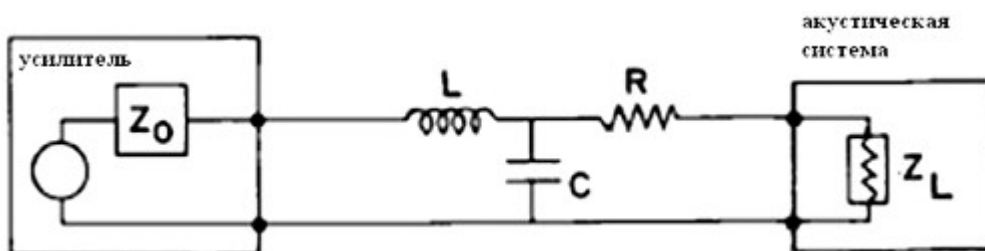


Рис. 2

Отсюда также следует, что эффекты, характерные для длинных трансмиссионных линий, такие как фазовый сдвиг и дисперсия, в звуковых кабелях проявляются очень незначительно: фазовый сдвиг составляет  $\sim 0,3$  град/м на 20 кГц и дисперсия (разница по времени прихода высоких частот по отношению к низким) меньше 60 нс/м в звуковом диапазоне, что вряд ли может влиять на слышимые искажения. Кроме того, флуктуации сигнала за счет волновых отражений, характерные для длинных трансмиссионных линий, также никак не проявляются для коротких линий в звуковом диапазоне частот, они начинают сказываться на частотах выше 30 МГц.

### Скин-эффект

Еще одно из свойств звуковых кабелей, которое, как считают многие авторы, оказывает существенное влияние на качество звучания — это скин-эффект. Скин-эффект (поверхностный эффект) возникает в проводниках, по которым течет переменный ток, за счет появления

индукционных токов (токов Фуко). Эти токи направлены у поверхности проводника в направлении первичного электрического тока, а у оси — навстречу ему. В результате внутри проводника ток "слабнет", а у поверхности увеличивается. На высоких частотах плотность тока вблизи оси оказывается практически равной нулю, что вызывает увеличение сопротивления проводника и, соответственно, потери мощности в нем. Глубина скин-эффекта (на которой амплитуда тока уменьшается в  $e$  раз, то есть в 2,73 раза) может быть вычислена по приближенной формуле:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2 \pi f \mu \sigma}}$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость материала проводника,  $\sigma$  — удельная электропроводность (они зависят от материала проводника и задаются в справочных таблицах),  $f$  — частота.

Эта формула пригодна для сплошных проводников. Если кабель состоит из отдельных жил, то удельная электропроводность будет уменьшена за счет учета коэффициента заполнения (поскольку между отдельными цилиндрическими жилами имеются воздушные промежутки), который приближенно равен 0,9069. Для медного проводника глубина скин-эффекта составляет на 20 кГц примерно 0,5 мм (глубина скин-эффекта не зависит от диаметра проводника, она определяется только его материалом, правда, при изменении диаметра меняется процент его использования).

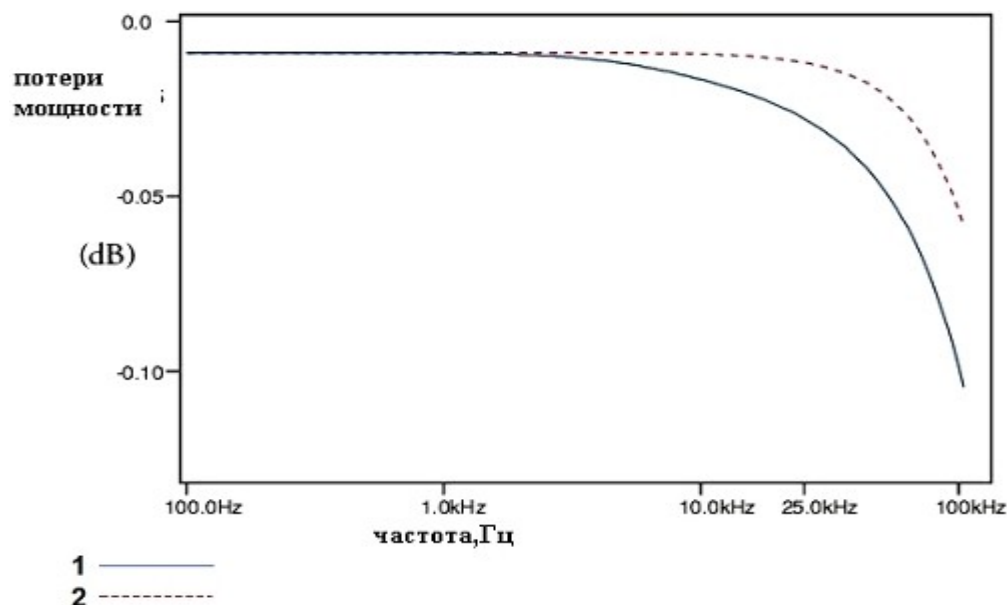
Связь изменения погонного сопротивления  $R$  и погонной индуктивности кабеля  $L$  (то есть сопротивления и индуктивности на единицу длины) с глубиной скин-эффекта (который зависит от частоты  $f$ ) может быть оценена следующим образом:

$$R/R_0 = r_0/2\delta + 0,26;$$

$$\omega L/R_0 = r_0/2\delta - 0,02,$$

где  $R_0$  — сопротивление на постоянном токе (на очень низких частотах),  $r_0$  — радиус проволоки.

Учет изменения общего сопротивления за счет скин-эффекта показывает, что на частоте 25 кГц сопротивление возрастет примерно в 1,05-1,3 раза в зависимости от размера (калибра) проводника, и это может дать эффект потери мощности, показанный на рис. 3. Этот эффект на частоте 25 кГц за счет учета изменения сопротивления сплошного проводника, вызванного скин-эффектом, составит 0,02 дБ (для многожильных кабелей он будет еще меньше за счет учета коэффициента заполнения), что вряд ли может оказывать существенное влияние на результат прослушивания обычной акустической системы.



**Примечание.** Со скин-эффектом на самом деле не все так просто. Дело в том что теория справедлива для синусоидальных сигналов. Для сигналов импульсного характера скин-эффект проявляется сильнее. Звуковые же сигналы ближе импульсным.

Мнения специалистов сильно расходятся: одни утверждают что эффект проявляется уже с частоты 10 кГц, другие — с частоты 1 кГц, а третьи - такие эффекты не могут проявляться на частотах ниже 100 кГц и даже выше. Это лишний раз подтверждает что в этом вопросе еще непаханное поле. (см. Филип Ньюэлл, Мониторинг: Урок 8. Спикер-кабели).

*Лично я столкнулся с тем что синусоидальный сигнал частотой 200 Гц сформированный цифровым способом с частотой дискретизации 2 кГц отказывался выдавать ток в многожильный кабель чуть ли не в руку толщиной на короткое замыкание. И только после обработки его ФНЧ удалось увеличить ток КЗ на порядок (до 1000 А).*

## Параметры звуковых кабелей

Эквивалентная схема, показанная на рис. 2, представляет собой цепь, состоящую из усилителя, звукового кабеля и акустической системы. Звуковой кабель характеризуется такими параметрами, как погонное сопротивление, емкость и индуктивность (так как обычно их относят к единице длины кабеля, то есть к 1 м).

Погонное сопротивление определяется сечением проводника и его материалом, в частности, для медного провода сечением 1 кв. мм оно составляет 0,019 Ом. Размер проводника кабеля и его погонное сопротивление задается с помощью значений его калибра AWG (American Wire Gauge).

Связи калибра кабеля с площадью сечения проводника и его погонным сопротивлением для меди даны в таблице 1.

AWG	Площадь проводника, кв. мм	Погонное сопротивление, $10^{-3}\Omega/\text{м}$	Допустимая величина тока, А
28	0,08	230	1,0
22	0,5	38	4,0
20	0,75	25	6,0
18	1,0	19	10,0
17	1,5	12	16,0
16	2,0	9,5	20,0
14	2,5	7,6	25,0
11	6,0	3,1	48,0
10	8,0	2,3	80,0

Одним из важных требований, предъявляемых к звуковому кабелю, является передача сигнала без потери мощности. Считается допустимой потеря мощности не более 0,5 дБ. Для этого активное сопротивление кабеля  $R$  должно быть существенно меньше сопротивления нагрузки, то есть  $R \ll |Z_{AC}|$ , где  $|Z_{AC}|$  — номинальный импеданс акустической системы. Поскольку его значение лежит для бытовых акустических систем в пределах 2..16 Ом, то значение сопротивления кабеля  $R$  должно лежать в пределах 0,1..0,5 Ом. Звуковые кабели обычно имеют длину 3-5 м и сечение проводника 2,5-10 кв. мм (то есть AWG 10-14), поэтому они вполне удовлетворяют этим условиям.

Звуковой кабель состоит из двух проводников, разделенных диэлектриком, то есть представляет собой конденсатор. Емкость такого конденсатора, образованного двумя параллельными проводниками (жилами), равна:  $C = \epsilon_0 \epsilon \pi / \ln(d/a)$ , где  $\epsilon_0$  — удельная емкость свободного пространства, равная  $8,854 \times 10^{-12}$  Ф/м;  $\epsilon$  — диэлектрическая постоянная (проницаемость) изолятора;  $d$  — расстояние между проводниками (жилами, м),  $a$  — радиус каждого проводника (м). Для коаксиального кабеля это выражение несколько изменится:  $C = \epsilon_0 \epsilon 2\pi / \ln(b/a)$ , где  $b$  — внешний диаметр кабеля,  $a$  — внутренний. Таким образом, погонная емкость зависит от конструкции кабеля, от размеров проводника и от расстояния между жилами (см. табл. 2), от размеров и свойств диэлектриков, используемых в качестве изоляторов, и лежит в пределах 10-100 пФ/м.

Поскольку в кабеле по проводнику протекает переменный ток, то он создает переменное магнитное поле. Связь между величиной тока и создаваемым им магнитным потоком (числом магнитных силовых линий, пересекающих проводник) определяется с помощью коэффициента индуктивности (или просто индуктивности)  $L$ . Индуктивность двух параллельных проводников радиуса  $a$  и расстоянием между ними  $d$  равна

$L = (\mu_0 / \pi) (\ln d/a + 0.25)$ , где  $\mu$  — магнитная проницаемость изолятора,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума  $1,257 \times 10^{-6}$  Гн/м. Таким образом, **погонная индуктивность зависит от геометрии и конструкции кабеля, и меняется в пределах 0,1-1 мкГн/м.**

Изменения значений индуктивности и емкости с изменением расстояния между проводниками для медного кабеля калибра 12AWG даны в таблице 2.

Расстояние между проводниками d (мм)	Индуктивность (мкГ/м)	Емкость (пФ/м)
0,4	0,39	76
1,0	0,86	34
2,0	1,27	24
4,0	1,67	17
8,0	2,07	14
16,0	2,48	12

Как видно из таблицы 2 и приведенных выше формул, увеличение расстояния между проводниками увеличивает индуктивность и уменьшает емкость кабеля.

### Равномерность АЧХ

Кроме вышеуказанного требования к параметрам кабеля (передачи без потерь мощности сигнала от усилителя к акустической системе), имеется второе требование, которое состоит в том, чтобы характеристика сигнала, передаваемого от усилителя к акустической системе, по напряжению сохранялась равномерной в звуковом диапазоне частот. Чтобы определить условия, при которых эти требования будут выполняться, необходимо рассмотреть взаимодействие сопротивлений усилителя, кабеля и акустической системы.

Если посмотреть на эквивалентную схему (рис. 2), то видно, что кабель можно рассматривать как фильтр низких частот второго порядка, включающий в себя последовательное сопротивление, индуктивность и параллельную емкость (можно сравнить со схемами фильтров низких частот, используемых в АС, которые были приведены в [предыдущей статье](#)). При выборе конструкции кабеля необходимо обеспечить значения этих параметров такими, чтобы частота среза была выше частотного звукового диапазона. То есть, частотная характеристика по напряжению передаваемого по кабелю сигнала от усилителя к акустической системе была плоской. Если бы такой фильтр (то есть кабель) был нагружен на активное сопротивление, то анализ такой схемы и выбор параметров не представлял бы особых затруднений.

Однако кабель имеет комплексный импеданс, включающий в себя как активную (R), так и реактивную часть (L, C) и обладающий определенной частотной зависимостью. В работе, которую проделал Fred E. Davis, был проведен эксперимент с 12 видами кабелей разной конструкции. Значения погонных сопротивлений, индуктивностей и емкостей выбранных кабелей даны на рис. 4. Из этих данных видно, что многожильные плоские кабели (номера 6 и 11) имеют минимальную индуктивность, но большую емкость, кабели с двумя параллельными проводниками (номера 1, 2 и 12) имеют большую индуктивность, но малую емкость. **Хорошие кабели должны иметь низкий импеданс (как его активную, так и реактивную часть), который остается постоянным во всем аудиодиапазоне, чтобы обеспечить плоскую характеристику по напряжению.**

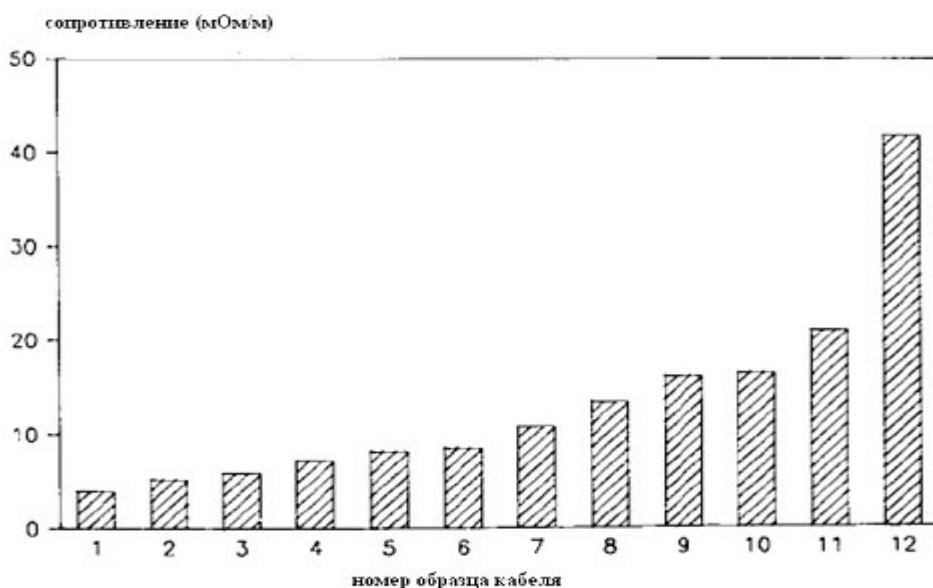


Рис. 4



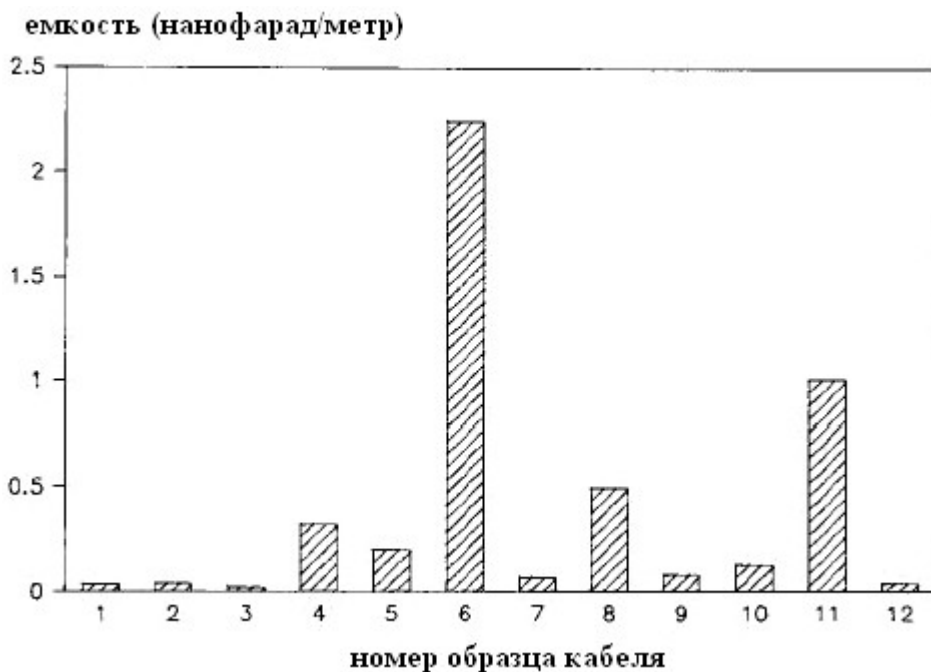


Рис. 5

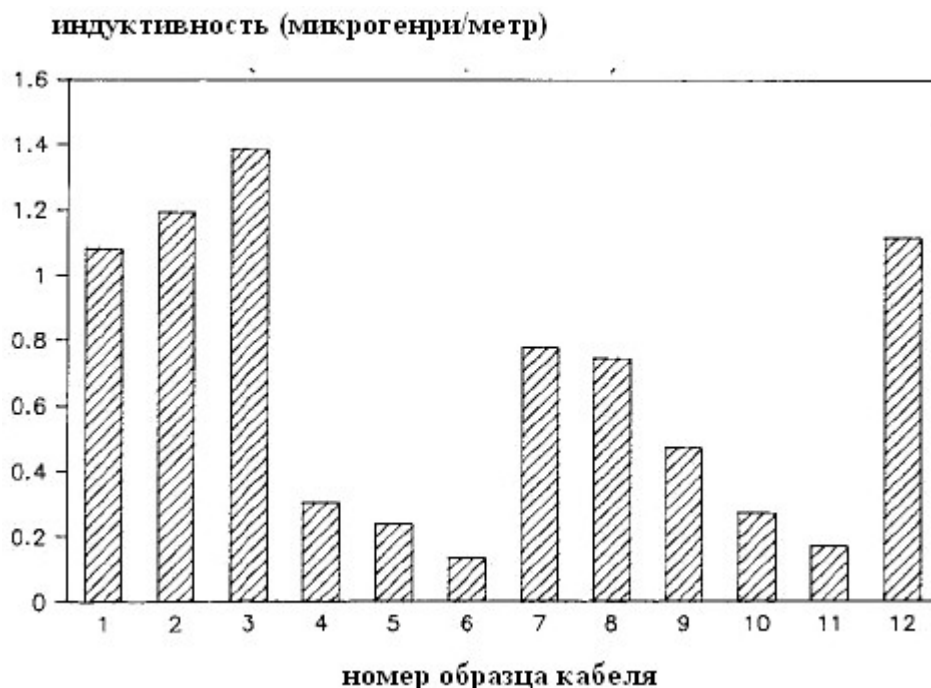


Рис. 6

**Примечание.** Согласно рис. 6 минимальная индуктивность образца 6 составила около 0,15 мкГн/м. При использовании кабеля длиной 3 м индуктивность составит 0,45 мкГн. А согласно таблице 2 может быть и 0,39 мкГн/м или 1,2 мкГн для кабеля длиной 3 м.

С другой стороны образец 6 имеет максимальную погонную емкость 2,3 нФ/м. Правда в звуковом диапазоне она не делает погоду, но может оказывать негативное влияние на устойчивость потенциально неустойчивых усилителей.

Выполненные измерения частотных характеристик импедансов проводились при замене АС резистором 1 Ом. Некоторые типы кабелей (например, номер 6 — рис. 5) имеют практически плоскую частотную характеристику импеданса, в то же время другие (например, номер 3) показывают некоторый подъем характеристики. Анализ этих данных показал, что подъем частотной характеристики происходит за счет реактивной части сопротивления кабеля (его

индуктивности) и скин-эффекта, который имеет значительно меньшее влияние. **Чем выше емкость кабеля, тем больше снижается общее реактивное сопротивление на высоких частотах, что делает частотную характеристику импеданса более плоской** (что противоречит принятому мнению, что чем больше емкость кабеля, тем больше затухают высокие частоты, это следовало бы из анализа эквивалентной схемы без учета индуктивности). **Кабель номер 6 на рис. 5 имеет наибольшую емкость (2,3 нФ на 1 м), наименьшую индуктивность и самую плоскую частотную характеристику импеданса.** При этом емкость кабеля еще настолько мала, что она не должна влиять на стабильность профессионального усилителя.

*Примечание. Кабель номер 6 показал наименьшее и стабильное ГВЗ = 100 нс до частоты 1 МГц (см. тест моделей кабелей в конце).*

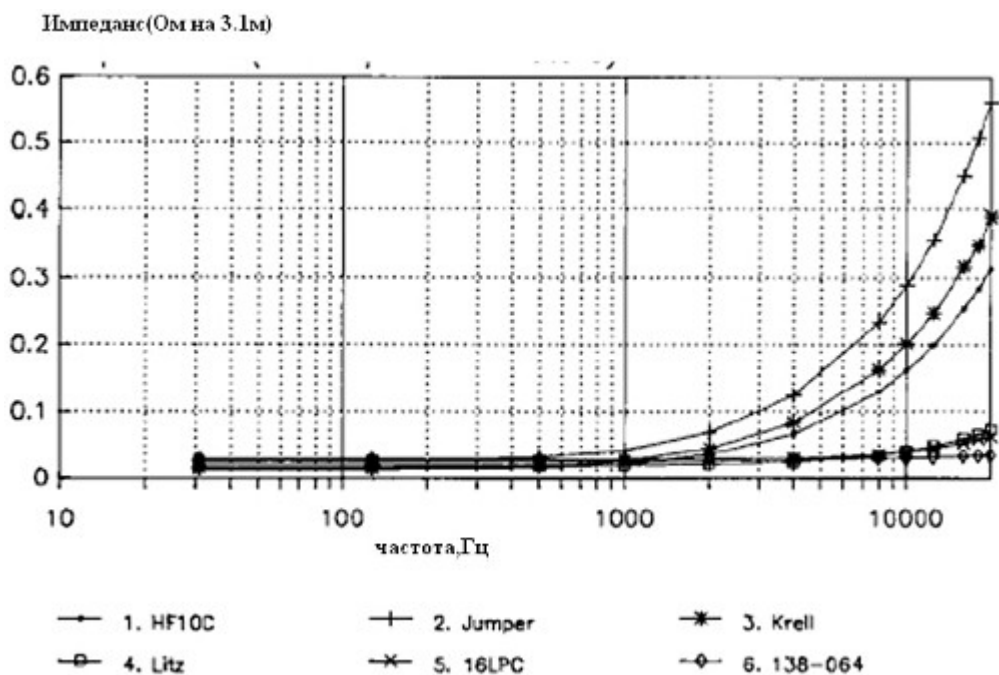


Рис. 5

Основную проблему составляет взаимодействие кабеля с акустической системой, которая обладает частотно-зависимым комплексным сопротивлением (импедансом, эквивалентная схема АС была представлена в предыдущей статье). Зависимость модуля импеданса и его фазы от частоты для трехполосной системы с фазоинвертором и пассивными фильтрами показана на рис. 6.

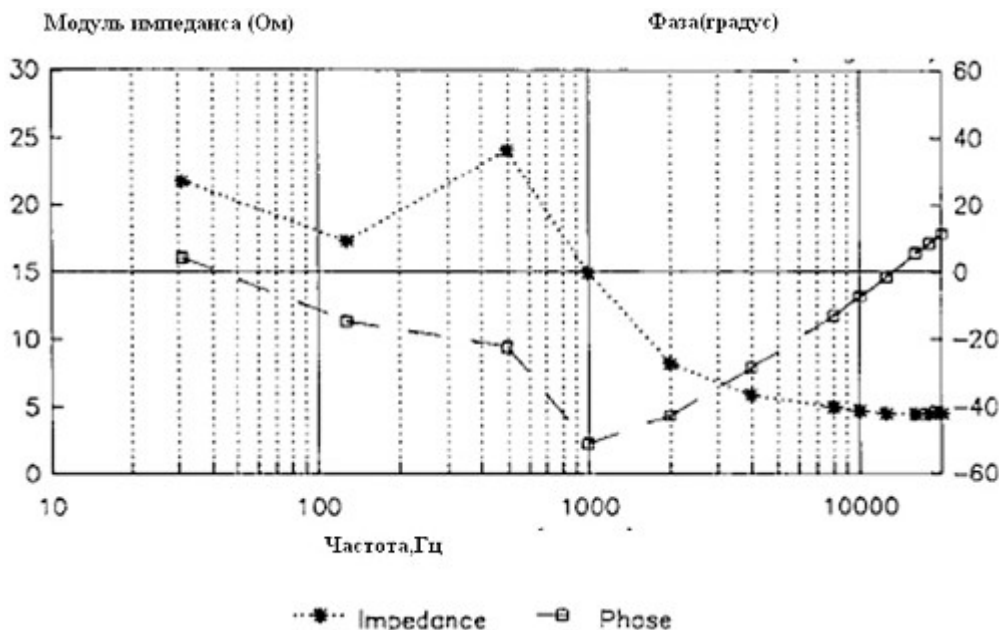


Рис. 6

Результаты измерений частотно-зависимой характеристики по напряжению для кабелей

разной конструкции с различными усилителями и акустическими системами (одна из комбинаций представлена на рис. 7) показывают следующее. **Наилучшие результаты (величина спада АЧХ на частотах выше 15 кГц менее 0,2 дБ) получаются при использовании многожильных кабелей, имеющих низкое активное сопротивление, низкую индуктивность и минимальный скин-эффект (например, номер 6) совместно с усилителями с низким выходным сопротивлением, (обычно порядка 0,05 Ом), низким выходным индуктивным сопротивлением порядка (2 мкГн) и высоким, не зависящим от частоты, демпфирующим фактором, что обычно и выполняется в хороших усилителях.**

***Примечание.** Постоянное значение демпфирующего фактора во всей звуковой полосе может быть только в усилителях с высокой частотой первого полюса! т. е. с первым полюсом выше звукового диапазона (в идеале выше 200 кГц) и при отсутствии индуктивности на выходе! Для обеспечения устойчивости усилителя часто достаточно чисто символической индуктивности порядка 0,1...0,2 мкГн. Индуктивностью 0,15 мкГн обладает проводник диаметром 1 мм. кв. и длиной 10 см. Часто таким проводом подключают выходные клеммы усилителя.*

При этом, даже при учете низкоомной нагрузки со стороны АС, и влияния ее реактивного сопротивления, обусловленного индуктивностью и емкостью, частота среза (то есть частота, на которой спад АЧХ достигает -3 дБ) в такой системе "УНЧ — кабель — АС" лежит существенно выше звукового диапазона: 80-160 кГц, также как и частота возможного резонанса между индуктивностью кабеля и емкостью нагрузки, которая находится в пределах 40 кГц.

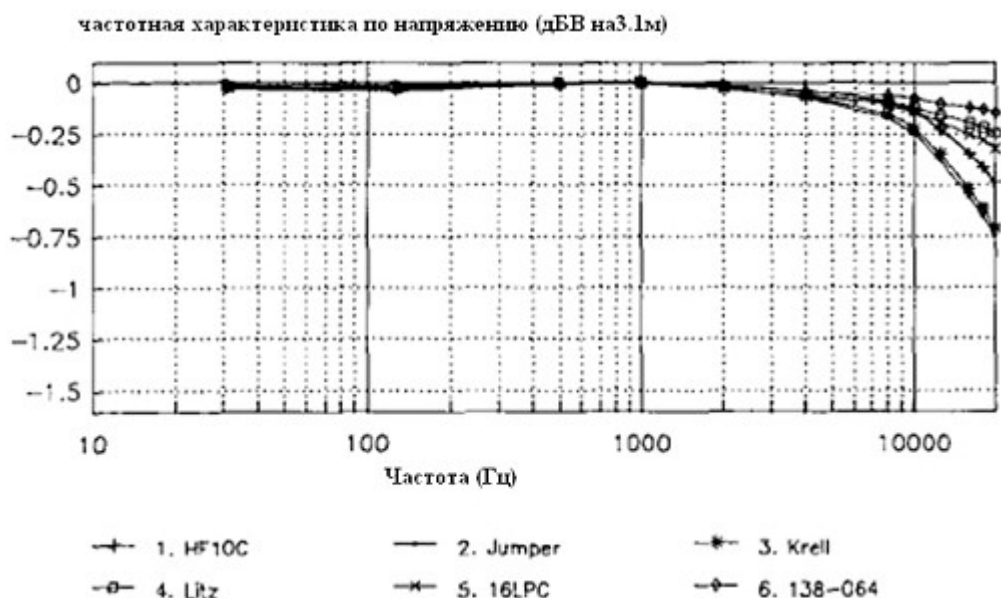
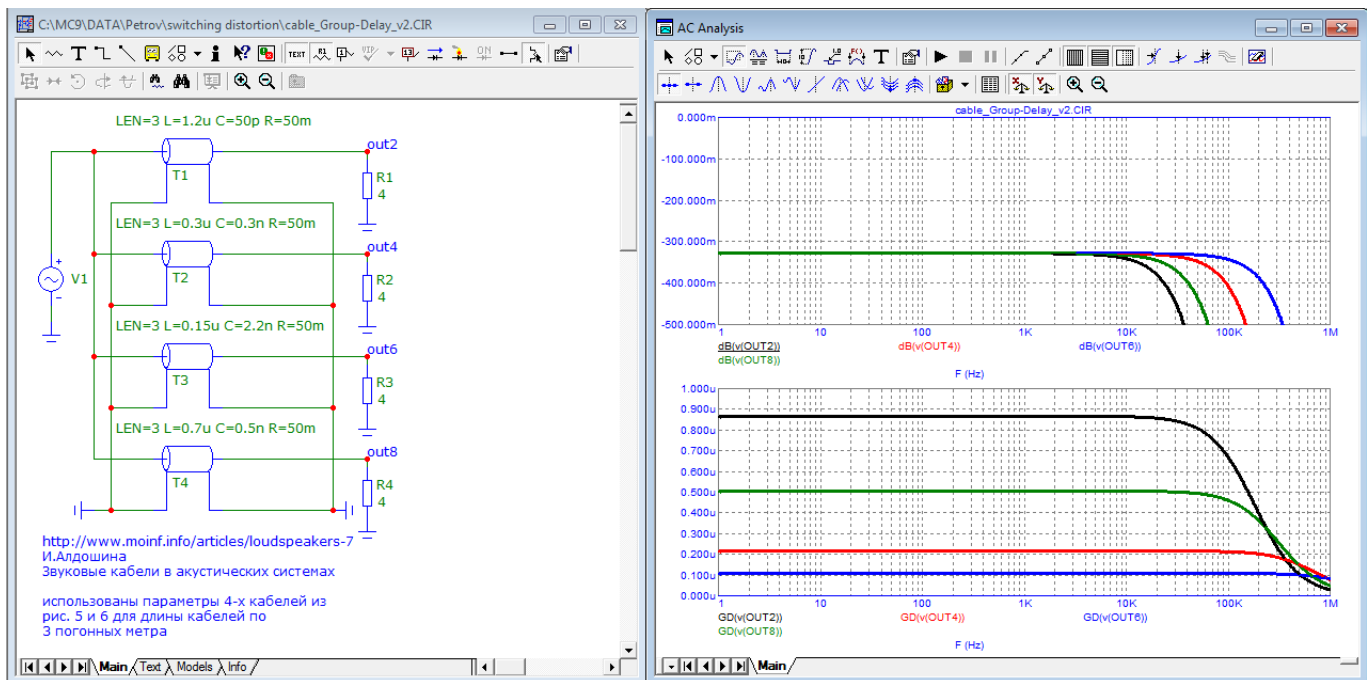


Рис. 7

Таким образом, для относительно коротких звуковых кабелей (длиной до 10 м) можно получить практически плоскую характеристику по напряжению в слышимом диапазоне частот (правда, для низкоомных АС не следует применять кабели слишком большой длины).

***Примечание.** АЧХ моделей 4-х кабелей (2, 4, 6 и 8) длиной 3 м приведена ниже. Из нее следует что в звуковом диапазоне завал АЧХ не превышает 0,1 дБ в худшем случае. Наилучшими параметрами обладает образец №6 (наименьший завал АЧХ и наименьшее значение ГВЗ), на втором месте кабель Litz (литцендрат). Можно предположить что дополнительный завал до 0,65 дБ проявление скин-эффекта и других мало изученных факторов.*





## Конструкции звуковых кабелей

Производством звуковых кабелей занимаются в настоящее время десятки (если не сотни) фирм, к числу наиболее известных относятся Audio Quest, DeLink, Gotham, Wirewold, Electronics, Belsis, Canare, Cordial, Horizon, Mogami, Prospecta, Samson, Tasker-Milan.

Конструкции кабелей все более усложняются, постоянно ведутся поиски материалов для проводников и изоляторов, и, соответственно, растет цена звуковых кабелей, которая уже может превосходить 800\$ за метр. Все это сопровождается большим количеством реклам и публикаций, убеждающих в огромном влиянии звуковых кабелей на качество звучания акустических систем (чистоту, прозрачность, четкость, сбалансированность музыкального образа и пр.).

В настоящее время наиболее распространенными конструкциями акустических кабелей являются следующие.

1. *Двухжильный кабель* — использует два проводника в изоляции (рис. 8а).



2. *Многожильный кабель* — из звуковых кабелей такого типа можно выделить конструкции типа Litz (фирма Audio Quest), где используется много тонких жил в изоляции, что позволяет уменьшить скин-эффект. С целью уменьшения электромагнитного взаимодействия проводников друг с другом фирма Audio Quest применила особую конструкцию (HyperLitz): каждая жила одета в изоляцию из полипропилена или фторопласта и закручена вокруг пластикового стержня, при этом нигде не пересекаясь и не создавая контактных потерь (рис. 8б).



В новых разработках фирма использует в качестве изоляции трубки из тефлона, диаметр которых больше диаметра проводника, что создает воздушную прослойку между ними, уменьшая диэлектрическую постоянную (у воздуха она близка к единице). В кабелях этого типа также применяется технология SST (Spread Spectrum Technology), которая предусматривает использование жил разных диаметров, например, в кабеле Audio Quest CV-4 есть две жилы калибра 20 AWG (0,52 кв. мм) и две 17 AWG (1,02 кв. мм).

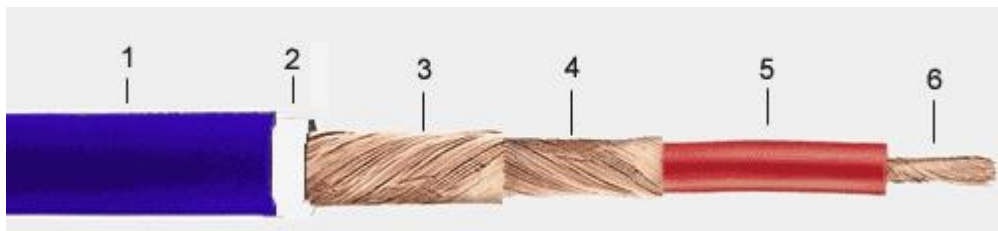
В конструкциях кабелей типа "двойная спираль" используются восемь проводников, скрученных в две группы (рис. 8с) с калибрами 16, 18, 19, 21 AWG, при этом в них применяется длиннокристаллическая медь с особо чистой поверхностью (технологии PSC/LGC).



Наконец, одна из последних разработок фирмы Audio Quest: две спирали проводников (положительных и отрицательных) уложены спирально навстречу друг другу в противоположных направлениях — Counter Spiraling Circular Helix HyperLitz (рис. 8д). По мнению производителя, все эти усложнения конструкции кабеля значительно улучшают качество звучания акустических систем (соответственно, и их цену).



3. Коаксиальные кабели (рис. 9), в которых внутренний и внешний проводник "вложены" друг в друга и разделены изоляцией. При этом значительно уменьшены поля рассеяний электромагнитной энергии при передаче сигнала по кабелю, поэтому они в первую очередь используются для сигналов малой мощности и для высокочастотных сигналов (например, в измерительных системах).



### Материалы для проводников

Выбору материалов проводников в кабеле также уделяется очень большое внимание; обычно используются такие металлы, как медь или серебро. В 1984 году фирма Hitachi выпустила на рынок первый кабель из бескислородной меди (OFC — Oxygen Free Copper). Присутствие кислорода в меди создавало вкрапление окислов (по мнению фирмы, это приводило к искажению временной структуры звукового сигнала, особенно на низких уровнях). Следующим этапом стало

применение материала LC-OFC (Linear Crystal Oxygen) — бескислородная медь с низкокristаллической структурой (монокристалл); как было объяснено в каталогах фирмы, это уменьшило "электрические барьеры" между кристаллами меди и улучшило чистоту звучания.

Японские фирмы Sony, Audio-Technica и др. начали применять медь, полученную методом непрерывной вытяжки из расплава PC-OCC, что позволило получить максимально длинные (до нескольких метров) кристаллы.

Ведущая американская фирма по производству звуковых кабелей Audio Quest в 1988 году разработала аналогичный собственный процесс получения длиннозернистой меди — LGC (long-grain copper), что позволило добиться для жил диаметром 0,15..0,25 мм длины кристалла свыше 200 м.

Кроме того, специалисты той же фирмы сумели получить и начали использовать особо чистую медь — 6N с содержанием меди 99,9999%. Эта технология получила название FPC-6 (Functionally Perfect Copper — функционально совершенная медь). Уже появились сообщения о применении меди 7N, а также новой технологии PSC (Perfect Surface Copper) — медь с идеально чистой поверхностью (поскольку из-за скин-эффекта поверхность проводника, по мнению фирмы, играет особую роль в "музыкальности" кабеля).

Аналогичные опыты по применению чистого серебра в качестве проводника в кабелях позволили фирме Audio Quest использовать серебро FPS и PPS (Functionally Perfect Silver и Perfect Surface Silver), а фирме Finestra Design Group — серебро с чистотой 5N. Однако чистое серебро очень дорого, поэтому его, в основном, используют для покрытия медных проводов (silver-clad copper). Появились сообщения о применении криогенной низкотемпературной обработки (жидким азотом) медных проводников, что якобы благотворно влияет на проводимость меди.

Надо сказать, что огромные затраты по созданию сверхчистых материалов для проводников звуковых кабелей и связанное с этим значительное повышение цен на кабели для аппаратуры Hi-Fi с физической точки зрения трудно объяснимо, поскольку удельная электропроводность металлов зависит от  $L$  — среднего расстояния между двумя последовательными столкновениями электронов с дефектами в кристаллической решетке металлов (обусловленными наличием примесей и др.). Зависимость эта выражается следующим образом:  $\sigma = ne^2L/pF$ , где  $\sigma$  — удельная электропроводность,  $n$  — концентрация электронов проводимости  $\sim 10^{23} \text{см}^{-3}$ ,  $e$  — заряд электрона,  $pF$  — импульс Ферми. При комнатной температуре  $L \sim 10^{-6} \text{см}$ , поэтому вряд ли переход от меди с очисткой 6N к очистке 7N может привести к настолько значительному изменению  $L$ , что это существенно изменит удельную электропроводность кабеля и приведет к изменениям качества звучания акустических систем, даже на тихих уровнях.

## Материалы для изоляторов

Выбор материалов для изоляторов в звуковых кабелях имеет существенное значение. Поскольку любой диэлектрик в той или иной степени способен поглощать электромагнитную энергию, то с целью уменьшения потерь необходимо выбирать материалы с малой диэлектрической постоянной и малыми диэлектрическими потерями (которые характеризуются обычно значением тангенса угла потерь), например, для полиэтилена тангенс равен  $\text{tg}\delta = 2 \times 10^{-4}$  на 1 МГц. На более низких частотах он меньше и поэтому для звуковых кабелей эти потери не вносят значительных искажений. Кроме того, материалы должны обладать большой механической прочностью, широким диапазоном рабочих температур и др.

В качестве материала для изоляторов обычно в кабелях применялись резина, шелк и т. п. В последнее время используются такие материалы, как поливинилхлорид, полипропилен, фторопласт, полиуретан, полиэтилен, тефлон и т. д. С целью уменьшения диэлектрической постоянной (поскольку она влияет на значение емкости и индуктивности кабеля) фирмы применяют особые материалы, например, вспененный фторопласт или специальное искусственное волокно с большим содержанием воздуха (MicroFiber), у которых диэлектрическая постоянная стремится к 1 (диэлектрическая постоянная воздуха 1,0167).

Примером современной конструкции кабеля может служить звуковой кабель фирмы Gotham (Швейцария) модель 50150 GAC-SPK 2 x 2.5mm<sup>2</sup> Quaxial (рис. 9), состоящий из внешней

оболочки (температуростойкий полиуретан PUR диаметром 6,8 мм), разделителя (поливинилхлорид PVC диаметром 6,1 мм), двух оплеток (чистая медная проволока диаметром 0,13 мм), изолятора (PVC диаметром 4 мм), проводника (50 жил чистой медной проволоки диаметром 0,25 мм, площадь 2,5 кв. мм).

Технические характеристики такого кабеля:

- сопротивление центрального проводника меньше 7,6 Ом/км,
- сопротивление внешней оплетки меньше 7,8 Ом/км,
- емкость (проводник/проводник) меньше 450 нФ/км (0,45 нФ/м),
- тестовое напряжение (пров./пров.) 800 Вэфф.,
- сопротивление изоляции больше 200 МОм/км,
- температурный диапазон (гибкая установка) от -5 до +50 С,
- температурный диапазон (фиксированное размещение) от -30 до +70 С.

### А индуктивность???

Следует отметить также, что в ряде конструкций высококачественных АС используется метод подключения каждого громкоговорителя и фильтра к усилителю своей отдельной системой кабелей ("bi-wiring"), а не одним общим. Фирмы-изготовители утверждают, что такой способ подключения уменьшает взаимное влияние кабелей. При этом оба кабеля должны иметь очень близкие значения индуктивности и емкости, чтобы не было различий в фазовых сдвигах. Хотя анализ, который выполнил J. Lesurf, показывает, что при таком включении может увеличиться неравномерность частотной характеристики по напряжению в области частоты среза между громкоговорителями. Так что применение такой схемы включения требует тщательного выбора параметров.

Существенное значение для работы акустической системы с кабелем имеет выбор разъемов. Они должны обеспечивать надежное электрическое соединение и механическую фиксацию кабеля. Сопротивление контактов зависит от размеров и площади соприкасающихся поверхностей и усилий, с которыми они прижаты друг к другу. Хорошие разъемы имеют стойкое покрытие поверхностей и выдерживают пятилетний срок интенсивной эксплуатации, именно поэтому фирмы-изготовители уделяют их конструкции серьезное внимание.

### Вывод

Приведенный выше анализ и многолетний опыт использования звуковых кабелей в аппаратуре Hi-Fi показывает, что выбор кабеля, безусловно, является существенным моментом в обеспечении высокого уровня качества звучания акустических систем. Кабель должен обладать определенным набором электрических параметров и надежной конструкцией, необходимо использовать качественные материалы для проводников и изоляторов и т. д., однако **применение все более сложных и дорогих конструкций кабелей с целью "существенного улучшения качества звучания АС" (по утверждению фирм-производителей) пока не имеет разумного физического объяснения.**

### Другие статьи серии

[Громкоговорители, часть 1.](#) Термины, определения, история развития.

[Громкоговорители, часть 2.1.](#) Электроакустические измерения. Линейные искажения.

[Громкоговорители, часть 2.2.](#) Нелинейные искажения. Мощность. Импеданс.

Электромеханические параметры.

[Громкоговорители, часть 3.1.](#) Конструкция электродинамических громкоговорителей. Причины возникновения линейных искажений.

[Громкоговорители, часть 3.2.](#) Конструкция электродинамических громкоговорителей. Причины возникновения нелинейных искажений.

[Громкоговорители, часть 4.](#) Нетрадиционные громкоговорители: ленточные и излучатели Хейла.

[Громкоговорители, часть 4.2.](#) Нетрадиционные громкоговорители: электростатические и пьезопленочные.

[Громкоговорители, часть 5.1.](#) Корпуса акустических систем. Конструкции.

[Громкоговорители, часть 5.2.](#) Корпуса акустических систем. Методы расчета.

[Громкоговорители, часть 6.](#) Разделительные фильтры в акустических системах.



## Кабели звучат по разному.

### Дмитрий Куликов о важности кабеля в звукорежиссуре

Тест двух кабелей заключается в следующем. Берут монозапись записывают ее на 2 дорожки одним кабелем, затем вторым. После чего одну дорожку первой записи инвертируют и складывают со второй дорожкой (т. е. вычитают одну дорожку из другой) в результате получают ноль, чтобы убедиться в этом увеличивают разностный сигнал на 36 дБ. Ноль есть ноль. То же самое проделывают с записью вторым кабелем и получают тот же результат.

Затем берут одну дорожку записанную первым кабелем и вычитают из нее дорожку записанную вторым кабелем и также усиливают разностный сигнал на 36 дБ. Разница между разными кабелями не равна нулю и звучит очень коряво, особенно на краях звукового диапазона.

Это говорит о том что кабели имеют ранее неуловимые различия. Но это вовсе не говорит о том какой из двух кабелей лучше: первый или второй. Для этого необходимо снять их параметры (как приведены в статье выше: индуктивность, емкость, сопротивление) и построить график ГВЗ. Чем меньше ГВЗ — тем лучше.

В качестве примера взято 4 образца кабелей из статьи выше и построены графики их ГВЗ с помощью трех разных моделей. Наименьшим ГВЗ (около 100 нс) обладает кабель №6.

Разумеется эти параметры не могут учесть влияние изоляции и влияние скин-эффекта которые могут оказать влияние на равномерность ГВЗ в звуковом диапазоне. Трудно себе представить что еще может влиять так чтобы неравномерность ГВЗ могла достигать величины 60 нс/м.

#### *Примечание.*

Похожий тест был проведен и описан в статье:

Мониторинг: Урок 8. Спикер-кабели

Филип Ньюэлл

Перевод Олега Науменко

Под редакцией

Александра Кравченко,

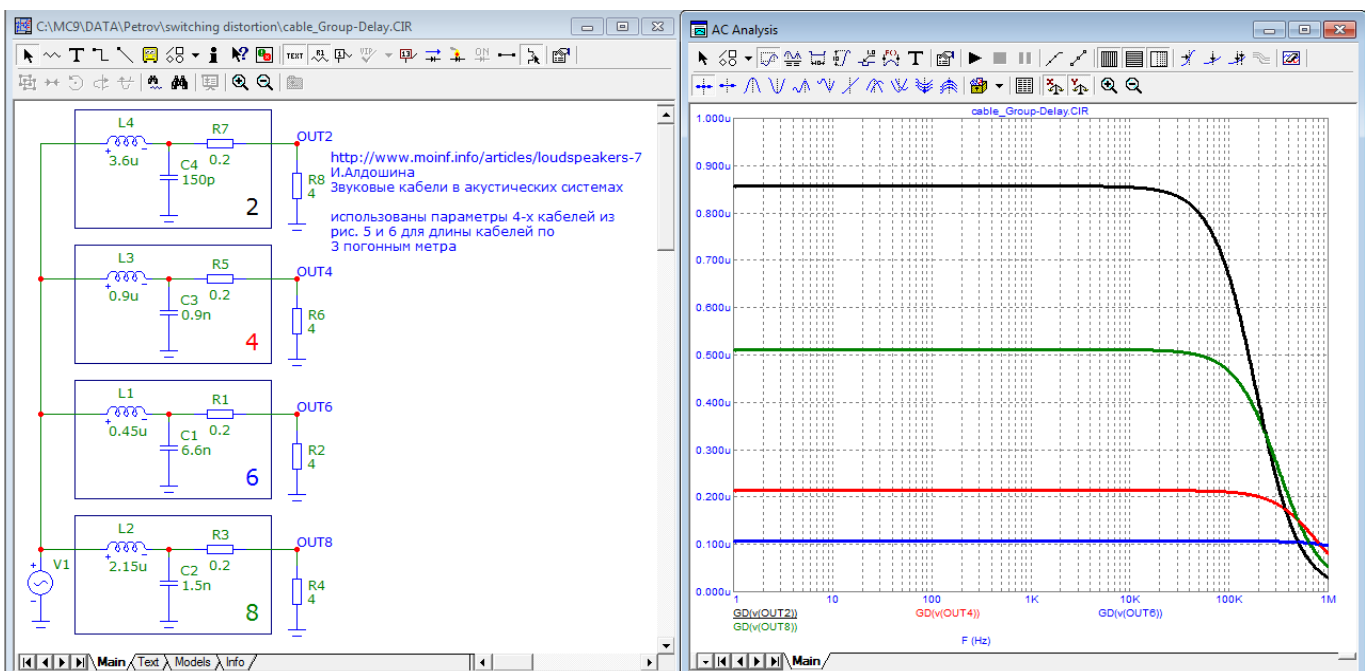
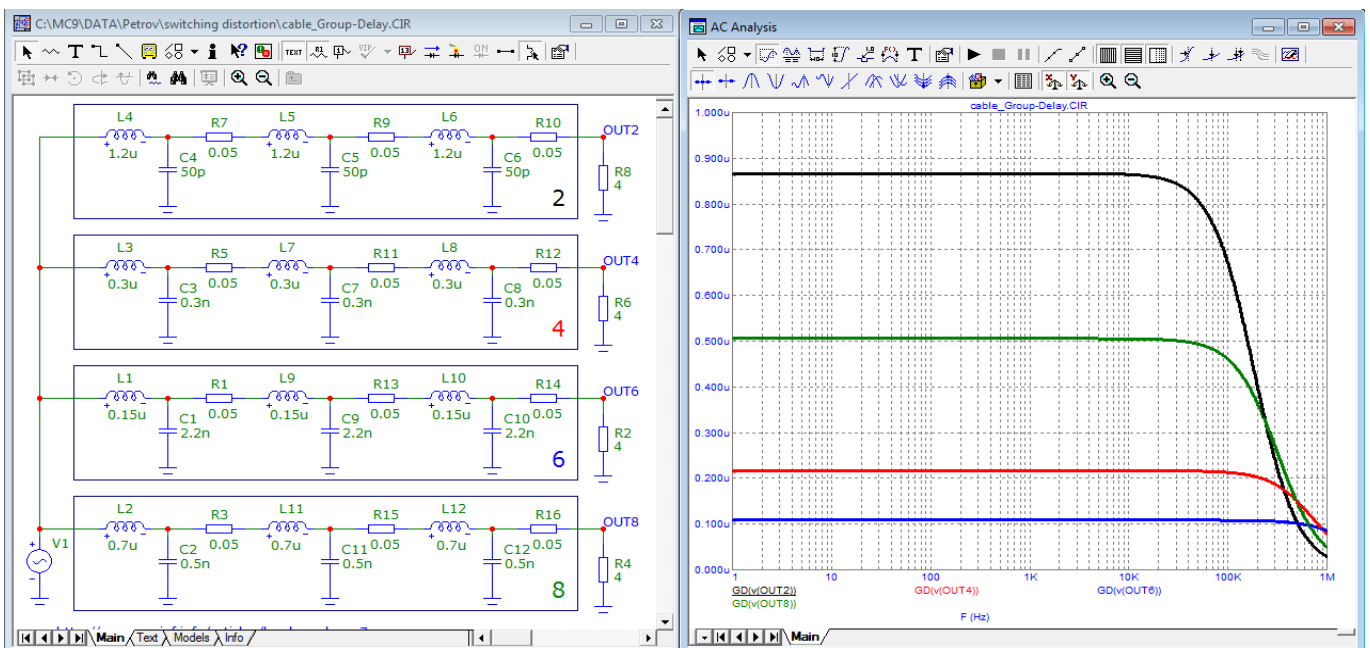
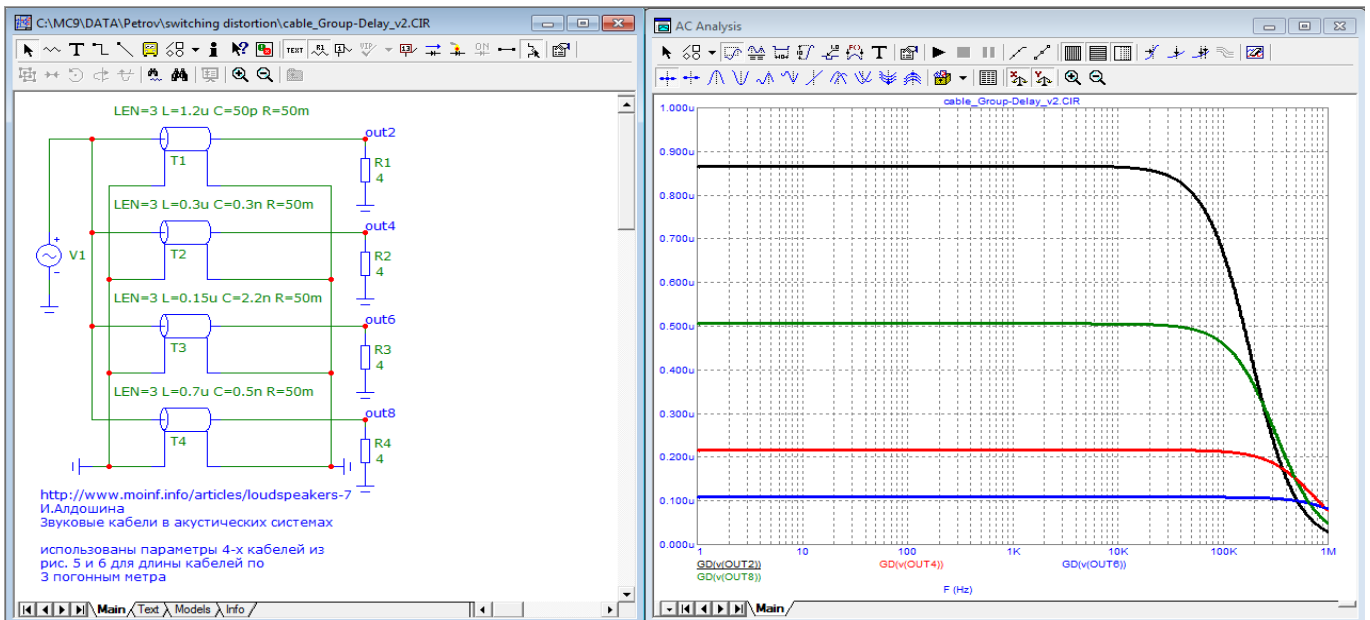
[vita46@yandex.ru](mailto:vita46@yandex.ru)

и также подтвердил различия в параметрах различных кабелей.

«Тандем мозга и ушей имеет замечательную способность различать тонкие детали на несколько порядков выше, чем наилучшее измерительное оборудование. Нелинейность некоторых из явлений в кабелях лишает нас возможности полностью предсказать поведение системы, исходя лишь из базовых принципов.

... аспект темы состоит в том, что некоторые люди более восприимчивы к влиянию кабелей. Также хорошо известно, что все мы слышим по-разному, и у меня есть доклады об экспериментах в хорошо контролируемых условиях, где одни участники, имеющие устойчивую репутацию, не могли обнаружить различия, которые для других были очевидны и безошибочны.

В итоге: **Нравится нам это или нет, кабели для акустических систем – это очень сложная проблема.»**



Как видим все три способа построения модели дали один и тот же результат.