

# Низкочастотное проявление поверхностного эффекта в звуковых кабелях

**Александр Майстренко (Москва)**

**О скин-эффекте и методах борьбы с ним знает каждый специалист, работающий с относительно высокочастотными приложениями. Принято считать, что он проявляется на частотах, начинающихся с сотен килогерц, а в звуковом диапазоне им можно пренебречь. Но оказывается, поверхностный эффект создаёт проблемы в межблочных и акустических кабелях именно на низких частотах!**

Начну статью примерами из собственной практики.

Как-то раз для изготовления межблочных проводов я приобрёл на радиорынке два куска прекрасного высокочастотного коаксиального кабеля: центральная жила и оплётка из посеребрённой меди, фторопластовая изоляция. Куски кабеля отличались лишь диаметром: один из них был тонким, внешний диаметр 3 мм, другой толще, внешний диаметр 6 мм. Первым пошёл на изготовление метрового межблочного провода тонкий кабель. Его испытание поставило меня в тупик: басы отсутствовали. Поверить в подобное человеку, который не слышал это своими ушами, невозможно, но это факт. Кстати, потеря басов на тонких проводах (т.н. «шнурках») замечалась мной и раньше, но в данном случае эффект был особенно выраженным. Затем был испытан более толстый кабель. Басы были тоже ослаблены, но в меньшей степени. Интересно: материалы как проводников, так и изолятора в этих кабелях одинаковы, длина кабелей одинакова, отличаются они лишь диаметром, а звук дают разный. Загадка осталась неразрешённой. Потерпев неудачу с посеребрёнными коаксиальными проводами, я сделал межблочный кабель в виде двухпроводной линии из литцендрата. Кабель дал хорошо сбалансированный во всём частотном диапазоне звук.

Аналогичную картину я наблюдал, экспериментируя с акустическими проводами. Кабель из посеребрённой меди звучал звонко, но без басов, он годился только лишь для подключения ВЧ-динамиков в двухпроводной (bi-wiring) системе. Равный по сечению кабель из чистой меди без покрытия звучал более сбалансированно. Но са-

мый неожиданный результат показал самодельный кабель из литцендрата: он не только продемонстрировал характерный для серебра звонкий верх, но и «вытащил» откуда-то глубокий бас, которого я раньше от своей акустики не слышал. Кроме того, существенно улучшилась и локализация кажущихся источников звука. Мои наблюдения подтвердил также и мой знакомый, которому я дал эти кабели для прослушивания, не сообщая, разумеется, о своих наблюдениях. Литцендрат задал мне очередную загадку: если улучшение звучания на высоких частотах за счёт подавления скин-эффекта ещё кое-как можно объяснить, то ярко выраженный эффект на низких частотах никакому объяснению не поддавался.

Давайте всё же попытаемся решить эту задачу и понять, почему даже метровый отрезок провода может испортить звук. Для этого рассмотрим самую простую модель поверхностного эффекта, т.е. зависимости сопротивления проводника от частоты:

$$Z(\omega) = \frac{L\sqrt{j\omega\mu\rho}}{\pi d},$$

где  $L$  – длина проводника;  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота;  $\mu = 4 \times 10^{-7}$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $\rho$  – удельное сопротивление проводника;  $d$  – диаметр проводника.

Я сейчас не конкретизирую, что представляет собой этот проводник: он может быть центральной жилой межблочного коаксиального кабеля или одним из двух проводов, соединяющих выход усилителя с акустической системой. Не учитываются более тонкие эффекты, происходящие в реальных кабелях, например, увеличение

индуктивности кабеля с понижением частоты сигнала и влияние проводников кабеля друг на друга, называемое эффектом близости. Я специально выбрал наиболее простую модель поверхностного эффекта как позволяющую получить наиболее наглядный результат. На данном этапе не ставится задача получить точные цифровые данные, характеризующие действие поверхностного эффекта на низких частотах, точность этой модели нас вполне устроит.

Дальнейшее рассмотрение будем проводить для простейшей схемы, содержащей идеальный источник сигнала, проводник, имеющий частотно-зависимое сопротивление  $Z(\omega)$  и нагрузочный резистор  $R$ . Как известно, коэффициент передачи этой цепи составляет:

$$K(\omega) = \frac{R}{R + Z(\omega)}.$$

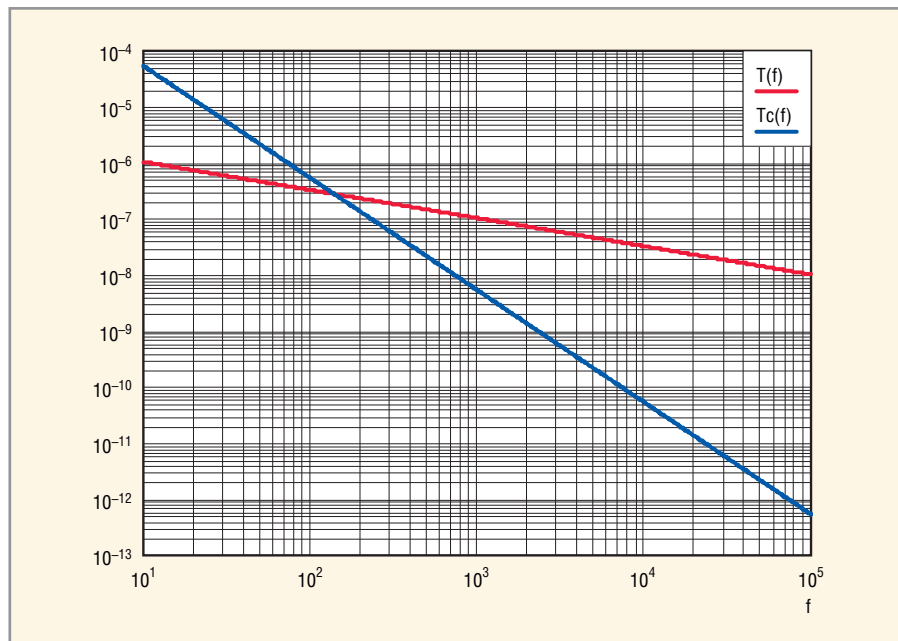
Разумеется, анализ частотной зависимости модуля коэффициента передачи не показывает никакого спада на низких частотах. В чём же тогда дело? Давайте проанализируем фазу коэффициента передачи, а точнее, групповое время задержки (ГВЗ), определяемое как отрицательное значение производной фазы коэффициента передачи по частоте:

$$T(\omega) = -\frac{d}{d\omega} \arg(K(\omega)).$$

Можно показать, что в случае  $Z(\omega) \ll R$  и после перехода к более удобной для нас частоте  $f$  ГВЗ составляет:

$$T(f) = \frac{L\sqrt{\mu\rho}}{4R\pi d\sqrt{\pi f}}.$$

Анализ этой функции не представляет труда. Как видим, ГВЗ пропорционально длине проводника  $L$  и обратно пропорционально периметру поперечного сечения проводника  $\pi d$ , а также сопротивлению нагрузки  $R$ . Кроме того, ГВЗ растёт обратно пропорционально корню из частоты



Групповое время задержки, вызванное поверхностным эффектом (красная линия) и разделительным конденсатором (синяя линия)

ты  $f$ , увеличиваясь на низких частотах.

Логично предположить, что именно обусловленное поверхностным эффектом увеличение ГВЗ и вызывает ощущение потери низких частот в звуковом сигнале.

Давайте перейдём к конкретным примерам. Например, давайте подсчитаем ГВЗ, возникающее на частоте 20 Гц в двухжильном медном проводе сечением 0,75 мм<sup>2</sup> и длиной 2 м при сопротивлении нагрузки 8 Ом. Этот случай довольно типичный: обычно именно таким проводом, предназначенным для электропроводки, и подсоединяют к усилителю акустические системы люди, знакомые с законом Ома, но не знакомые с ГВЗ. Признаюсь, я через это тоже прошёл, именно таким и был мой первый акустический кабель. Подставляя в формулу  $d=0,001$  м,  $L=4$  м,  $\rho=1,72 \times 10^{-8}$  Ом, получаем  $T(20) = 740$  нс. Частотная зависимость  $T(f)$  для данного случая показана на рисунке красной линией.

Доли микросекунды – много это или мало? Кажется, что мало. Но для сравнения давайте проведём расчёт для другого случая: оставив прежней длину провода, увеличим его сечение до 4 мм<sup>2</sup>, набрав это сечение из изолированных проводников диаметром 0,1 мм. Это тот самый литцендрат, о котором я писал выше. Но как быть с формулой для ГВЗ, она ведь выведена для одиночного проводника? Обратим внимание на знаменатель: произведение  $\pi d$  является периметром попереч-

ного сечения провода. Именно от периметра, а не от площади проводника зависит ГВЗ. Следовательно, нам надо найти и подставить в формулу суммарный периметр поперечного сечения  $n$  проводников литцендрата:

$$T(f) = \frac{L \sqrt{\mu \rho}}{4 R n \pi d \sqrt{\pi f}}$$

Число проводников диаметром  $d$ , необходимых для набора суммарной площади поперечного сечения  $S$ , легко подсчитать по формуле:

$$n = \frac{4S}{\pi d^2}$$

Для нашего примера получаем  $n = 510$ , а ГВЗ на частоте 20 Гц составляет:  $T(20) = 14,5$  нс.

Снижение ГВЗ в 51 раз радикально отразилось на звуке! Значит, ГВЗ, равное 740 нс, совсем не мало! А 14,5 нс – мало? Боюсь, что тоже нет! Давайте рассчитаем ГВЗ, возникающее в тонком межблочном «шнурке». Для этого зададимся длиной  $L = 1$  м, диаметром центральной жилы 0,1 мм и сопротивлением нагрузки 47 кОм, характерном для транзисторного усилителя. Этот вариант представляется мне примерной границей «заметности» межблочного кабеля. Подставляем данные в формулу и получаем:  $T(20) = 314$  пс.

Трудно поверить в то, что столь малое ГВЗ ощутимо. Но давайте вспомним, о каком времени идёт речь, когда мы боремся с джиттером в CD-плеерах:

в 10 раз меньше! Предвижу очередное возражение: если мы замечаем столь малые ГВЗ, то как быть с куда более существенными ГВЗ, вносимыми акустическими системами или хотя бы даже частотно-зависимыми элементами усилителей и плееров? В таком случае даже включение в тракт обычного разделительного конденсатора должно привести к катастрофическому результату, но ведь это далеко не так!

Давайте посмотрим, какое ГВЗ возникает при передаче звукового сигнала через конденсатор ёмкостью 100 мкФ на нагрузку сопротивлением 47 кОм. Результат моделирования ГВЗ для этой схемы показан на рисунке синей линией. Сравним его с ГВЗ, рассчитанным для кабеля, сильно окрашивающим звук; оно показано красной линией. В диапазоне 100...200 Гц ГВЗ для обоих случаев примерно равно. Но частотные зависимости ГВЗ радикально отличаются друг от друга. ГВЗ, обусловленное разделительным конденсатором, меняется обратно пропорционально квадрату частоты: при увеличении частоты в 10 раз ГВЗ уменьшается в 100 раз. Для ГВЗ, вызванного поверхностными эффектами, характерна совсем другая зависимость: при увеличении частоты в 100 раз оно уменьшается в 10 раз, обратно пропорционально корню из частоты. Вполне допускаю мысль, что наш слуховой аппарат гораздо более чувствителен к изменениям ГВЗ, вызванного частотно-нелинейными элементами, чем частотно-линейными: конденсаторами и катушками индуктивности. Если проводить аналогию с нашим восприятием нелинейных и линейных (частотных) искажений, то уместно вспомнить, что мы прекрасно идентифицируем искажения, вносимые, например, усилителем, хотя они на несколько порядков меньше искажений, вносимых акустическими системами.

Вот и раскрылась загадка потери басов в тонких проводах! Уменьшение диаметра акустических проводов или диаметра центральной жилы межблочного кабеля увеличивает ГВЗ на низких частотах, приводя к ощущению потери басов. Но почему исчезновение баса так хорошо заметно именно на посеребрённом проводе? Именно потому, что серебрение способствует поверхностному эффекту, токи быстрее вытесняются из центра проводника на серебряную поверхность, имеющую меньшее по сравнению с медной

серединой удельное сопротивление. В качестве контрмеры можно предложить покрытие материалом с большим по сравнению с медью удельным сопротивлением, например лужение.

Сейчас я дам бесплатную идею производителям дорогостоящих аудиофильных кабелей: медные провода надо золотить! Удельное сопротивление золота несколько выше, чем меди, что способствует подавлению поверхностного эффекта. Золото не окисляется, поэтому свойства кабеля не будут меняться со временем. Внешний вид золочёных проводов в прозрачной изоляции будет просто потрясающим! А уж сколько денег можно будет «срубить» с любителей аудиофильного эксклюзива!

Но мы пойдём другим путём. Применим вместо золота изолятор в виде лака или шёлка и получим литцендрат. Собственно, литцендрат и был придуман как способ борьбы с поверхностным эффектом на высоких частотах, но прекрасно работает и на низких. При равной площади сечения одиночной жилы и литцендрата периметр сечения последнего больше в корень из числа жилок, его составляющих. Почувствуйте разницу, как любят говорить в рекламных роликах!

Мне вспоминается наблюдение одного моего знакомого. Он, экспериментируя с акустическими проводами, решил использовать телевизионные кабели с добротной медной оплёткой. Не помню точно, использовалась ли при этом центральная жила кабеля, возможно, что нет. Я тогда довольно скептически отнесся к его эксперименту и поленился ехать на прослушивание, хотя он был в восторге от результата. А теперь понимаю, что результат действительно должен был оказаться неплохим, поскольку поверхностный эффект в таком проводе значительно подавлен.

В заключение хочу напомнить, что приведённые числовые данные получены в результате использования простейшей модели поверхностного эффекта. Расчёты по более точным формулам, учитывающим геометрию кабеля и увеличение индуктивности кабеля при снижении частоты, дают значения ГВЗ примерно на 40% выше. Но, тем не менее, из проведённого исследования можно сделать несколько выводов:

- поверхностные эффекты в проводниках проявляются и на низких частотах.

В этом диапазоне они приводят не к заметному увеличению сопротивления проводников и снижению коэффициента передачи кабеля, а к увеличению группового времени запаздывания (ГВЗ), воспринимаемому как потеря басов и нарушение локализации кажущихся источников звука;

- ГВЗ, вызванное поверхностными эффектами, обратно пропорционально корню из частоты, в то время как ГВЗ, вызванное конденсаторами и катушками, обратно пропорционально квадрату частоты. Возможно, по этой причине мы замечаем вызванное поверхностным эффектом ГВЗ даже в доли наносекунд;
- вызванное поверхностными эффектами ГВЗ обратно пропорционально периметру поперечного сечения провода. Для уменьшения ГВЗ следует увеличивать диаметр проводов или применять литцендрат;
- ГВЗ прямо пропорционально длине провода. Для уменьшения окраски звука сокращайте длину звуковых проводов;
- ГВЗ обратно пропорционально сопротивлению нагрузки. Входное со-

противление ламповых усилителей в 10...20 раз выше, чем транзисторных, поэтому они более «всеядны» в отношении межблочных кабелей. Низкий импеданс акустических систем способствует очень заметному проявлению поверхностного эффекта в акустических проводах;

- ГВЗ растёт пропорционально корню из удельного сопротивления материала проводов. По мнению наблюдателей, провода из чистого серебра дают заметное улучшение качества звука. Затея одной известной фирмы с межблочными проводами из углеродного волокна представляется мне лишённой смысла даже для ламповых усилителей;
- технологии, способствующие проявлению поверхностного эффекта, например, серебрение медных проводов, приводят к увеличению ГВЗ на низких частотах, воспринимаемому как потеря басов. При выборе или самостоятельном изготовлении звуковых кабелей желательнее отдавать предпочтение технологиям, подавляющим поверхностный эффект и эффект близости. ©