

Поверхностный эффект не терпит поверхностного отношения

Сергей Подоляк

В данной статье я бы хотел заострить внимание аудиофилов на эффекте, который многие с недавних пор называют "транзисторным", некоторые давно ведут с ним борьбу в ВЧ и СВЧ технике, некоторые в ходе борьбы с ним выпускают межблочные и акустические кабели стоимостью до нескольких тысяч американских долларов, кое-кто пытается представить этот эффект ни чем иным, как просто... галлюцинациями аудиофилов! Ниже я расскажу, как за пару вечеров в домашних условиях из подручных материалов изготовить превосходный (т. е. абсолютно нейтральный в широком диапазоне частот) аудиокабель, не уступающий по качеству лучшим мировым образцам. Но прежде, чтобы все стало на свои места, я скажу следующее: вся звуковая и высокочастотная радиоаппаратура сконструирована неправильно! Далее по тексту предусмотрены ваши вероятные вопросы.

— Мы об этом и без вас давно подозревали. Ну и в чем же тут дело?

Известно, что при прохождении переменного тока по проводящему слою проводника или полупроводника имеет место так называемый "поверхностный эффект" (скин-эффект). При этом большая часть движущихся электрических зарядов из-за электромагнитной индукции располагается вблизи поверхности токопроводящего слоя. Отрицательное действие скин-эффекта проявляется в том, что большая центральная часть токопроводящего слоя не участвует в переносе электрических зарядов, что вызывает повышенное сопротивление проводника электрическому току, кроме того, скин-эффект в металлических проводах и в обкладках конденсаторов приводит к медленному перераспределению подвижных электронов от центра к поверхности, вследствие чего возникают нежелательные эффекты направленности и "притирки" кабелей, а в конденсаторах усиливается эффект "памяти". Отрицательное действие скин-эффекта на кабели и провода усугубляется еще и тем, что химические соединения металла токопроводящего слоя с кислородом и азотом воздуха, образующиеся на поверхности провода в результате коррозии, обладают диэлектрическими и полупроводниковыми свойствами, что, в свою очередь, способствует росту потерь и искажений, как известно, степень проявления скин-эффекта зависит от частоты тока, точнее, от мгновенной частоты тока. С ростом частоты толщина поверхностного слоя, по которому проходит ток, уменьшается. В случае широкополосного сигнала, где мгновенная частота с трудом поддается описанию, скин-эффект вызывает полный бардак в размещении подвижных электронов по поперечному сечению проводника. Следствием этого являются нелинейные, интермодуляционные и частотно-фазовые искажения электрического широкополосного сигнала, проходящего через проводник или полупроводник. В бытовой и профессиональной аудиоаппаратуре скин-эффект соединительных межблочных и акустических проводов приводит к заметным на слух искажениям сигналов, ухудшающим качество звуковоспроизведения. В радиоприемной аппаратуре последствия скин-эффекта (например, в кабеле, соединяющем антенну со входом радиоприемного устройства) из-за создаваемых им интермодуляционных искажений широкополосного сигнала заключаются в снижении избирательности, уменьшении отношения "сигнал/шум" и снижении реальной чувствительности. Известно, что при прохождении переменного тока по проводнику основная (полезная) электромагнитная волна распространяется вдоль проводника по прямой линии между точками с разными потенциалами. Из-за скин-эффекта кроме полезной волны возникает нежелательная паразитная электромагнитная волна, направленная от центральной оси токопроводящего элемента к его поверхности, перпендикулярно направле-

нию полезной волны, вызывая фазовые искажения проходящего сигнала. В цифровых импульсных устройствах, например, компьютерах, из-за скин-эффекта в медных проводниках печатных плат и разъемов искажается форма коротких импульсов, что приводит к срывам синхронизации, сбоям в регистрации импульсов. Это основное препятствие повышению тактовой частоты в материнских платах и разъемах компьютеров. На сверхвысоких частотах скин-эффект резко снижает добротность реактивных элементов - конденсаторов и катушек индуктивности. Вследствие этого на частотах выше 1 Гц скин-эффект является основным фактором, ограничивающим миниатюризацию радиоэлектронных изделий, например микросхем. Именно скин-эффект несет ответственность за так называемый "транзисторный эффект" звучания. В транзисторах поперечная площадь кристалла намного меньше площади поперечного сечения электронного облака, как и площадей катода и анода в лампе. Кроме того, контактные площадки на поверхности кристалла транзистора подсоединены тонюсенькими проволочками (это знает любой, кто хоть раз видел транзистор без корпуса), в которых скин-эффекту живется очень вольготно.

— Что же можно сделать для борьбы с этим явлением?

Я могу порекомендовать недорогой и эффективный способ нейтрализации скин-эффекта. Он основан на том обстоятельстве, что материал подавляющего большинства проводников (медь, серебро, алюминий, латунь) и полупроводниковых (кремний, германий) элементов имеет показатель относительной магнитной проницаемости m от 0,9999 до 1,0001, т. е. около единицы. Поверхность токопроводящего элемента 1 покрывают парамагнитной оболочкой 2 (см. рис.), причем оболочка не обязательно должна плотно прилегать, возможен некоторый небольшой зазор. Оболочка выполняется в виде одного или нескольких слоев твердого парамагнитного m больше 1 диэлектрического материала (магнетодиэлектрика), обладающего на макроуровне показателем относительной магнитной проницаемости m , в несколько раз превосходящим проницаемость токопроводящего элемента, низкой электропроводностью, а также малыми потерями на перемагничивание (петля гистерезиса). На рис. для наглядности показано два слоя оболочки: слой 3 и слой 4. Оболочка должна закрепляться неподвижно относительно токопроводящего элемента на его поверхности; в случае зазора ширина его не должна превышать половину длины волны переменного тока в токопроводящем элементе.

— И что это дает?

Протекающий в токопроводящем элементе 1 перпендикулярно плоскости рисунка переменный ток создает внутри проводящего слоя элемента 1 нежелательное поперечное электромагнитное поле скин-эффекта. Силовые линии 6 этого поля действуют на элементарные движущиеся заряды 5 внутри токопроводящего элемента 1 и направлены от центра токопроводящего слоя к его поверхности. В то же время основной (полезный) переменный ток сигнала, протекающий по токопроводящему элементу 1, создает в слоях 3 и 4 парамагнитной оболочки 2 противодействующее магнитное поле, силовые линии 7 которого направлены от поверхности токопроводящего элемента 1 к его центру и также воздействуют на элементарные движущиеся заряды 5 внутри проводника 1. Интенсивность и того, и другого полей возрастает с увеличением силы тока и с ростом частоты. Таким образом достигается компенсация действия паразитного поперечного поля и однородное распределение электрического тока по всему поперечному сечению токопроводящего слоя. Для большинства слаботочных токопроводящих элементов с целью достижения положительного эффекта парамагнитная оболочка может выполняться из материала с показателем относительной магнитной проницаемости от 1,5 до 20 толщиной несколько десятков микрон и более. Для силовых токопроводящих элементов, при малых размерах проводника, а также для низкочастотных устройств оболочка может быть сходной толщины при величии-

не m от 1,5 до 50. Если материал оболочки обладает показателем m больше 50, а длина токопроводящего элемента значительная (несколько метров), то наряду с паразитной поперечной волной полезная волна также будет подавляться, возрастет собственная индуктивность кабеля и потери в самой оболочке, а проходящий сигнал получит фазовые сдвиги. Для наглядности принцип, на котором основан данный способ борьбы со скин-эффектом, можно сравнить с магнитной или электромагнитной фокусировкой пучка электронов в электронно-лучевой трубке, например, телевизионном кинескопе. В кинескопе поток электронов движется с ускорением в вакууме под действием высокого анодного напряжения от катода к аноду (экрану). При этом вследствие взаимоотталкивающего действия падающий на экран электронный луч образует размытое пятно. Поэтому необходима принудительная фокусировка луча, для чего применяются катушки, создающие кольцевое электромагнитное поле вокруг электронного пучка. Так достигается фокус и сведение.

Я предлагаю использовать для парамагнитной оболочки смесь диэлектрика (например лака, смолы или поливинилхлорида) с порошком электропроводного магнитомягкого материала (например, измельченный пермаллой или оксифер). Объемное соотношение диэлектрика и магнитного материала выбирают таким, чтобы электропроводность их смеси была ничтожной по сравнению с электропроводностью токопроводящего элемента. Предлагаю также использовать смесь диэлектрического полимера с порошками таких веществ, как двуокись хрома CrO_2 , гамма-окись железа Fe_2O_3 , кобальт-гамма-окись железа CoFe_2O_3 . Эти магнитные материалы имеют показатель относительной магнитной проницаемости от 1,5 до 2,0 и обладают малым временем перемагничивания. Они производятся промышленностью для аудио- и видеолент, их стоимость невелика. Хотя в сильном магнитном поле указанные материалы обладают сравнительно высокой коэрцитивной силой, в большинстве радиоэлектронных элементов сила проходящего по ним тока недостаточно высока для проявления магнитотвердых свойств этих материалов. Поэтому в данном случае потери на гистерезис в оболочке невелики, что позволяет достичь положительного эффекта. При изготовлении гибкого высококачественного (аудиофильного, как теперь модно говорить) неэкранированного межблочного или акустического кабеля (автор использовал обычную хромдиоксидную видеоленту шириной 12,7 мм на лавсановой основе). Лента наматывается с перекрытием в 6 - 10 слоев на основную металлическую (медную или серебряную) токопроводящую жилу. В результате такой операции резко снижаются нелинейные искажения, вносимые кабелем, а верхняя частота пропускания кабеля увеличивается с 30 МГц до 120 - 250 МГц и выше, в зависимости от толщины провода. При этом кабель выполняется в виде трех сплетенных "косичкой" проводников (наподобие того, как это делает фирма Kimber Kable).

Кроме изготовления кабелей, описанный метод борьбы со скин-эффектом может быть применен на промышленном уровне в отношении токопроводящих элементов любых форм и видов, выполненных из проводников, сверхпроводников и полупроводников с показателем относительной магнитной проницаемости около единицы, предназначенных для пропускания тока и управления током в широком диапазоне силы и частоты. Заявленный метод может быть применен, например, в производстве кабелей связи, монтажных и соединительных проводов, транзисторов, диодов, интегральных микросхем, контактных устройств, разъемов, резисторов, электрических конденсаторов и высокочастотных катушек индуктивности.

— И что же мы получим в результате применения предложенного вами метода?

Получим удовольствие от прослушивания музыки.

— Окончательное идеальное качество звучания?

Не совсем. Начните с этого, а в следующих публикациях я расскажу, как бороться дальше!

Журнал "Class A"