НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ АУДИОСХЕМ

АЛЕКСЕЙ ЧИСТЯКОВ, разработчик

В статье рассматривается несколько аспектов построения аудиосхем. Основное внимание уделено выбору двух- или трехпроводной схемы подключения микрофона и конденсаторов развязывающей цепи.

При разработке аудиосистемы одним из основных вопросов является выбор схемы коммутации микрофона. Выбирают между двух- и трехпроводной схемами. Трехпроводная схема обеспечивает лучшее качество звучания, но уступает двухпроводной по стоимости и простоте реализации. На рисунке 1 схематично показано двух- и трехпроводное соединение микрофона.

В двухпроводной схеме сигнал микрофона модулируется по току и передается по шине питания. Токовый сигнал преобразуется в сигнал напряжения с помощью резистора, величина которого обычно составляет 680 Ом. Далее сигнал фильтруется, усиливается и оцифровывается. В трехпроводной схеме сигнал передается по отдельной линии и также предварительно фильтруется, усиливается, а затем оцифровывается. Обычно в трехпроводной схеме коэффициент нелинейных искажений с учетом шума (THD+N) меньше, чем в двухпроводной.

Возможна реализация двухпроводной схемы с помощью дискретных элементов. Несколько упрощенный пример подобного варианта представлен на рисунке 2. Коэффициент усиления в этой схеме достигает 41 дБ при полосе пропускания 10–3000 Гц. Выходной сигнал микрофона поступает в базовую цепь входного транзистора Q1 и усиливается пассивной цепочкой R5-C5. В схемах, которые используются на практике, пассивная цепочка несколько сложнее, поэтому для регулирования коэффициента усиления недостаточно изменить значение одного резистора. Для управления нагрузкой, чтобы «отрезать» ее от входного каскада, в схему введен транзистор Q2. Таким образом, сигнал микрофона передается по длинной двухпроводной линии.

Схема на рисунке 2 довольно проста и экономична, но ее сложнее настраивать, чем схему на операционных усилителях (ОУ), которая представлена на рисунке 3. К тому же, у схемы на ОУ, как будет показано далее, – несколько лучше показатели по соотношению сигнал/шум. Коэффициент усиления схемы с ОУ немногим меньше 40 дБ, а полоса пропускания составляет 30–7000 Гц. В качестве фильтров используется индуктивность L1, резистор R3 и конденсатор C2.

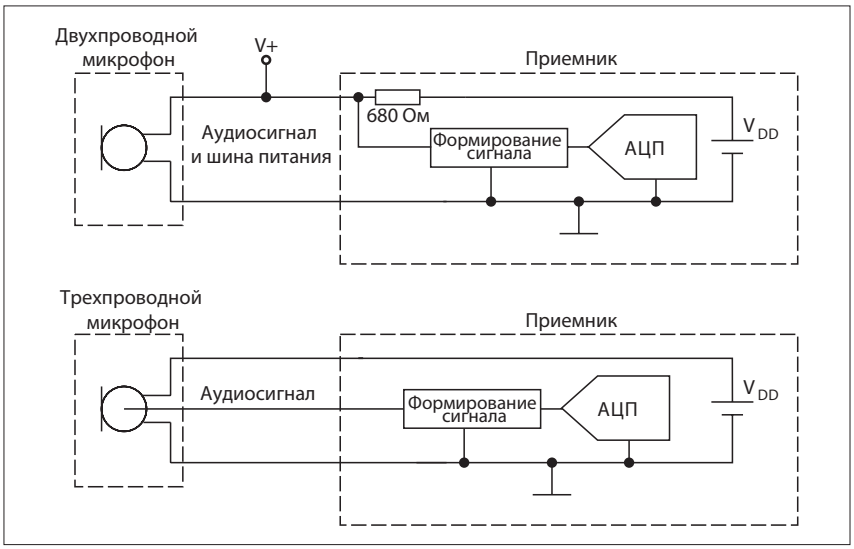

Рис. 1. **Двух- и трехпроводное соединение микрофона**

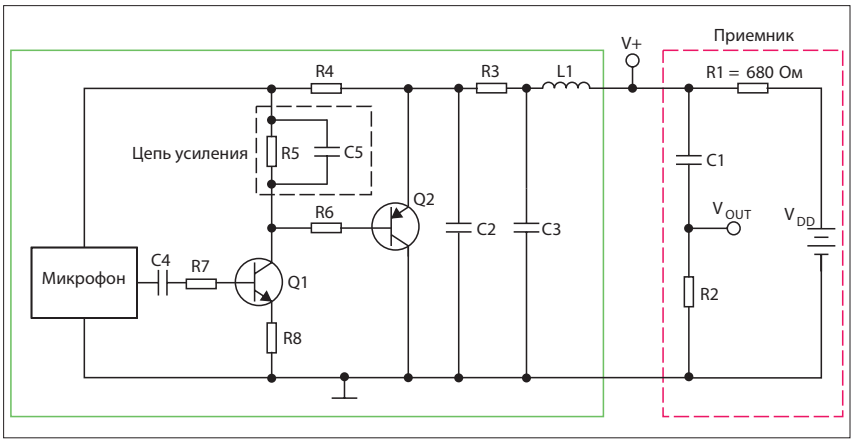

Рис. 2. **Реализация двухпроводной схемы с помощью дискретных элементов**

Резистивный делитель R8–R12 формирует напряжение V_B, которое подается на неинвертирующий вход ОУ «B». Благодаря этому смещению ОУ работает в линейном диапазоне, что приводит к минимальным нелинейным искажениям. В схеме с ОУ гораздо проще, чем в схеме с дискретными элементами, менять коэффициент усиления, который определяется соотношением сопротивлений резисторов R11/R6. Напряжение питания микрофона формируется с помощью положительной шины питания V+ резистивным делителем R4–R7/C5. ОУ канала «A» служит буфером для напряжения питания микрофона.

Для проверки обеих описанных выше схем [1] были изготовлены печатные платы. Размер платы с дискретными элементами составил 20×12,5 мм, а платы с ОУ – 20×14 мм. В первом случае использовались пассивные компоненты в габарите 0201 и 0603, а во втором – 0402 и 0603, а также ОУ в корпусе VSSOP.

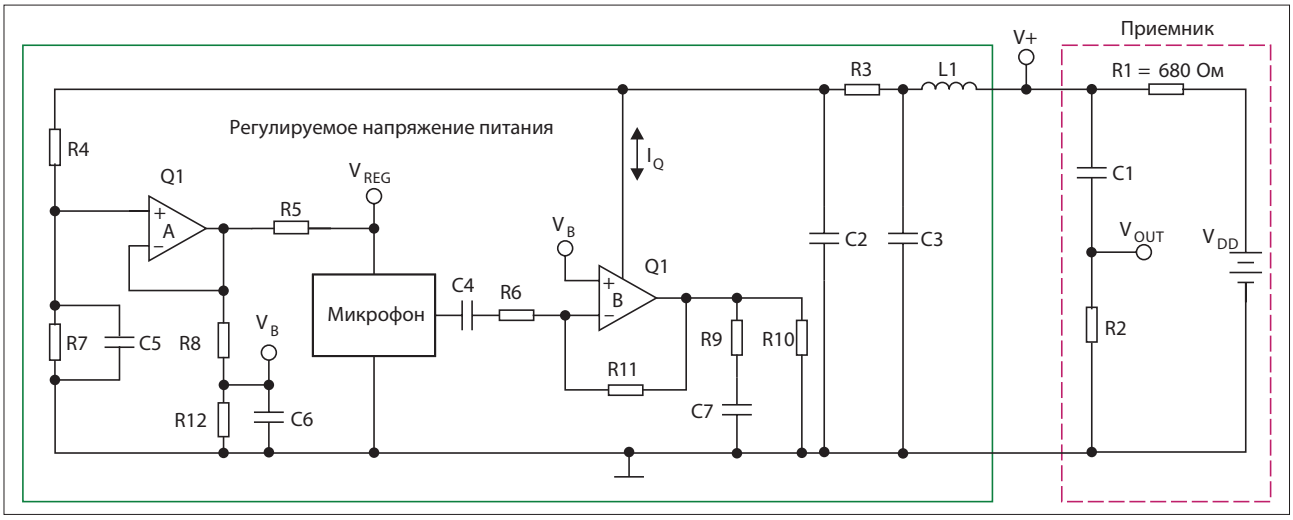

Рис. 3. **Реализация двухпроводной схемы с помощью операционных усилителей**

При сравнении двух описанных выше решений, построенных на дискретных компонентах и операционных усилителях, измерялась величина коэффициента нелинейных искажений с учетом шума THD+N в зависимости от выходного напряжения (пик–пик) и от частоты. В обоих случаях измерения проводились при температурах –20, 20 и 65°C. Экспериментальные результаты приведены на рисунках 4–5.

Как видно из рисунка 4, оптимальные значения наблюдаются в диапазоне выходного напряжения 0,7–1,5 В (пик–пик). В этом диапазоне выигрывает решение, созданное с использованием операционных усилителей. График на рисунке 5 снимался при размахе выходного напряжения 1,5 В (пик–пик). Из полученных результатов видно, что в частотном диапазоне 300–3400 Гц (телефонный диапазон) характеристика решения, построенного на операционных усилителях, и в этом случае заметно превосходит решение на дискретных компонентах.

Тем не менее, превосходство схемы с ОУ не настолько велико, чтобы можно было делать однозначные выводы о непригодности решений на дискретных компонентах. В чувствительных к цене приложениях подобные решения вполне приемлемы.

К сожалению, проблемы выбора для разработчика не заканчиваются определением схем микрофона. Немало вопросов может возникнуть при выборе компонентов для тракта воспроизведения аудиосигналов. Поскольку требования ко многим компонентам зависит от требований к качеству воспроизведения звука, нельзя рассматривать проблему в общем виде.

Однако имеются компоненты, выбор которых делается без должного внимания, хотя их параметры могут играть важную роль в качестве конечного изде-

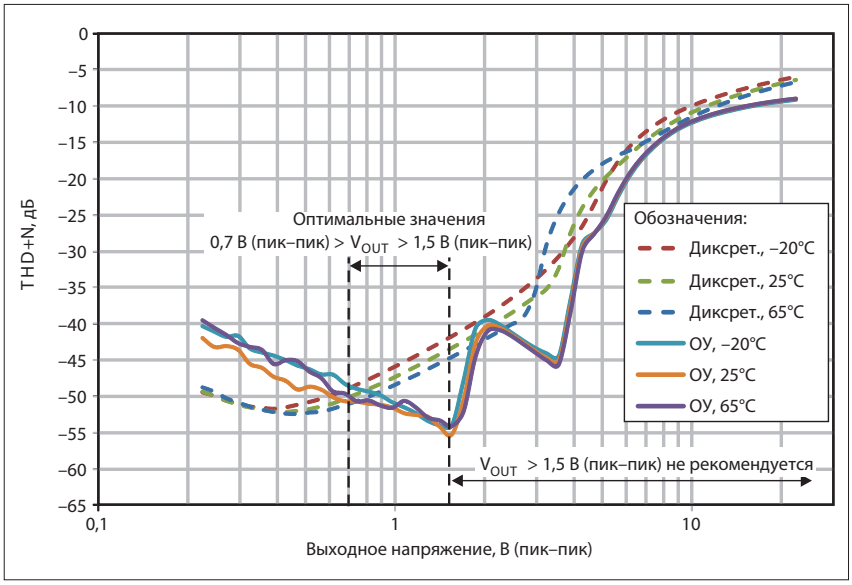

Рис. 4. **Зависимость THD+N от выходного напряжения. Пунктирными линиями обозначены графики для схем на дискретных компонентах, а сплошными – графики для схем на ОУ**

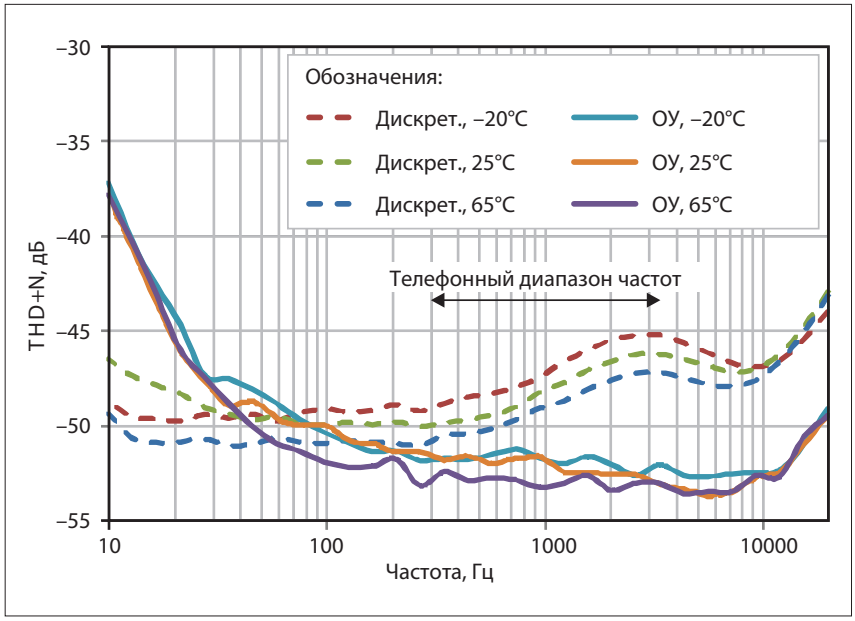

Рис. 5. **Зависимость THD+N от частоты сигнала при размахе сигнала 1,5 В (пик–пик). Пунктирными линиями обозначены графики для схем на дискретных компонентах, а сплошными – графики для схем на ОУ**

лия. Речь идет о конденсаторах. Иногда критичной может оказаться замена конденсаторов одного производителя аналогами другого. Чтобы подтвердить важность выбора этого компонента, заметим, что стоимость конденсатора высокого качества зачастую может превышать стоимость микросхемы, в комплекте с которой он работает. Исходя из рассматриваемого приложения, мы будем рассматривать свойства конденсатора в цепях переменного тока.

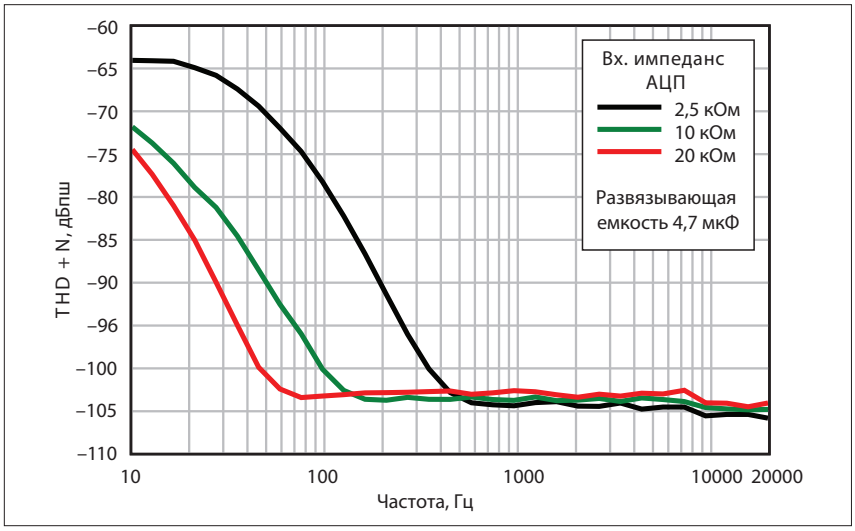

Рис. 6. **Зависимость THD+N от частоты для разных значений сопротивления в развязывающей цепочке**

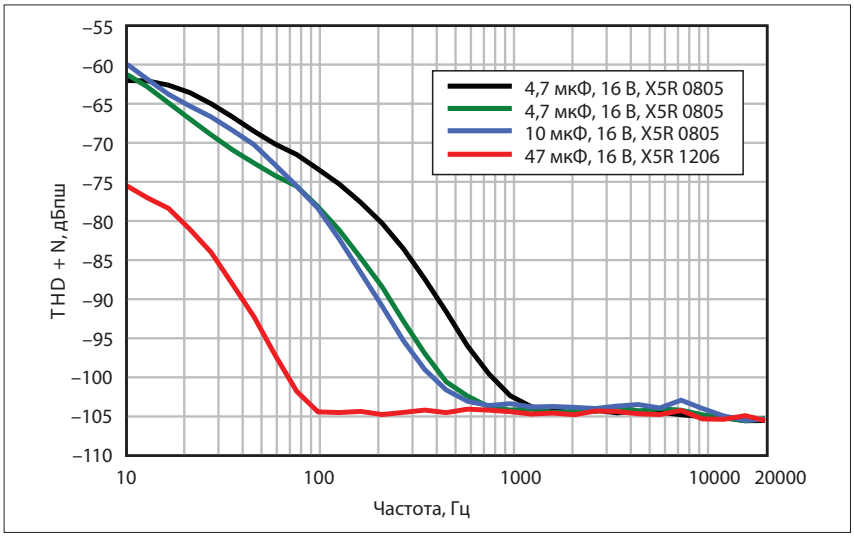

Рис. 7. **Зависимость THD+N от частоты для разных значений емкости конденсатора в развязывающей цепочке**

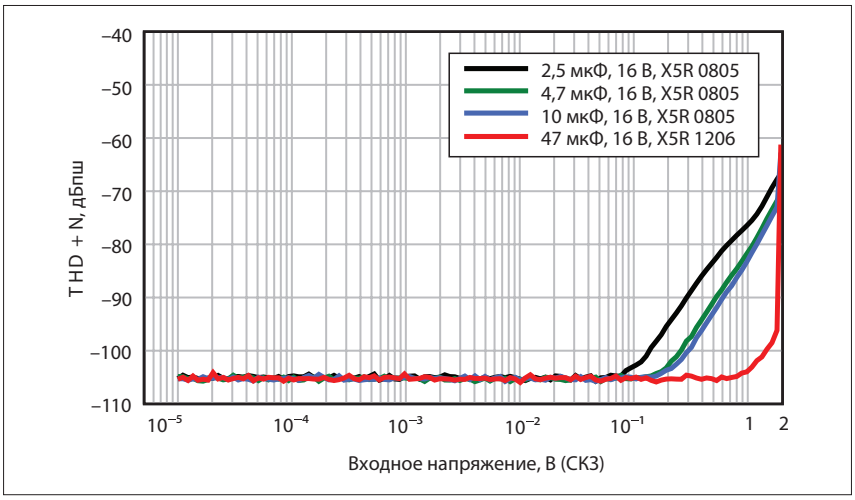

Рис. 8. **Зависимость THD+N от входного сигнала для разных значений емкости конденсатора в развязывающей цепочке**

Как известно, эти свойства определяются используемым в нем диэлектриком. Чем меньше его относительная диэлектрическая проницаемость, тем меньше потери в конденсаторе, следовательно, тем ближе реальный конденсатор к идеальному. Увы, как свидетельствует известная формула, определяющая емкость классического конденсатора (из уважения к читателю мы не будем ее приводить), уменьшение относительной диэлектрической проницаемости ведет к уменьшению емкости конденсатора.

С учетом тенденции миниатюризации в электронике у разработчиков может возникнуть соблазн при выборе конденсаторов емкостью от нескольких микрофарад и выше использовать керамические конденсаторы класса II. У диэлектрика этих конденсаторов – очень высокая относительная диэлектрическая проницаемость. Следовательно, у них высокая плотность емкости. К сожалению, именно из-за высокой диэлектрической проницаемости емкость керамических конденсаторов класса II существенно меняется в зависимости от температуры и приложенного напряжения. Этот эффект определяется наличием в диэлектрике титаната бария, обладающего сегнетоэлектрическими свойствами.

Изменение емкости конденсатора под действием приложенного напряжения может внести основной вклад в нелинейные искажения на низких частотах, где сопротивление конденсатора довольно велико. На высоких частотах вклад конденсатора в нелинейные искажения уменьшается. Для минимизации этих эффектов в случае, когда конденсатор используется в развязывающей цепи, последовательно ему можно включить сопротивление, что позволит уменьшить напряжение на конденсаторе.

Подобный эксперимент, а также несколько других аналогичных были выполнены в [2]. В экспериментах использовался многоканальный аудио АЦП TLV320ADC5140 от компании Texas Instruments. На рисунке 6 показаны графики THD+N в зависимости от частоты для разной величины сопротивления в развязывающей цепочке, которая подключалась к входу АЦП. Как и следовало ожидать, при увеличении последовательного сопротивления значение THD+N возрастает по модулю. К сожалению, добавление резистора несколько увеличивает шум и ошибку усиления, поэтому такое решение уместно лишь в чувствительных к стоимости приложениях.

Увеличение емкости развязывающего конденсатора – другой вариант, нивелирующий изменение емкости конденсатора от приложенного напряжения. На рисунке 7 показана зависимость искажений THD+N от частоты при разных значениях емкости конденсаторов развязывающих цепочек. И в данном случае эксперимент подтвердил логику наших рассуждений. При увеличении емкости конденсаторов увеличивается полоса частот с минимальными искажениями.

Зависимость искажений THD+N от величины входного напряжения при разной емкости развязывающих конденсаторов представлена на рисунке 8. Добавим, что эксперимент проводился при частоте входного сигнала 100 Гц. Как видно, в этом случае применение конденсатора большей емкости также дает лучший результат. Поскольку конденсатор емкостью 47 мкФ имеет габарит 1206, в отличие от других конденсаторов габарита 0805, участвующих в испытаниях, использование этого конденсатора приведет к небольшому увеличению габаритов платы.

Заметим, что во всех случаях при увеличении емкости конденсатора развязывающей цепочки уменьшается и частота среза фильтра высоких частот (ФВЧ). При использовании в разделительной цепочке керамических конденсаторов можно следовать эмпирическому правилу, суть которого заключается в том, что частота среза ФВЧ должна быть примерно в 100 раз меньше нижнего предела полосы частот аудиоканала. Другими словами, величина емкости конденсатора должна быть в 100 раз больше. Казалось бы, исходя из описанных выше соображений и подтверждающих их экспериментов, это правило играет нам на руку. Увы! С увеличением емкости конденсаторов и, следовательно, с ростом полосы пропускания ФВЧ возрастает шум вида 1/f.

В очередной раз мы убеждаемся в справедливости известного афоризма о двух сторонах медали. В идеальном варианте было бы хорошо использовать керамические конденсаторы групп C0G/NP0 – их емкость практически не зависит от приложенного напряжения и крайне мало изменяется во всем диапазоне рабочей температуры. К сожалению, поскольку емкость конденсаторов этих групп невелика и не превышает 1 мкФ, они не находят широкого применения в рассматриваемом нами приложении.

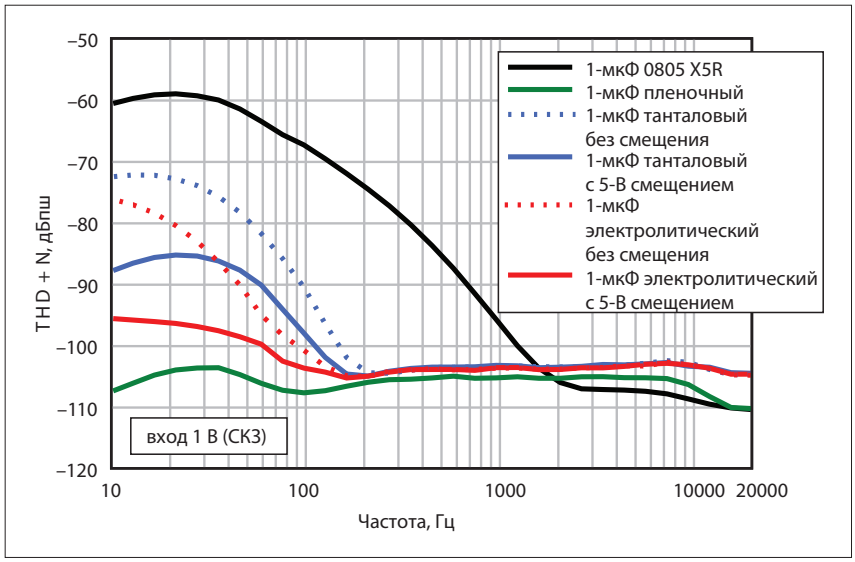

Рис. 9. **Зависимость THD+N от частоты для конденсаторов разных типов**

Но на керамических конденсаторах свет клином не сошелся. Поэтому были рассмотрены конденсаторы других технологий, а именно: танталовый конденсатор и пленочный конденсаторы для поверхностного монтажа, а также электролитический конденсатор для монтажа в отверстия; для сравнения использовался керамический конденсатор. Емкость всех этих конденсаторов составила 1 мкФ.

Результаты испытаний представлены на рисунке 9, где показаны экспериментальные графики зависимости коэффициента нелинейных искажений с учетом шума THD+N от частоты. Никаких сюрпризов эксперимент не принес. Лучшие характеристики во всем диапазоне частот продемонстрировали пленочные конденсаторы, вторыми оказались электролитические конденсаторы. Выбор пленочных конденсаторов очень хорош, если нет значительных ограничений на габариты. Из-за низкой относительной проницаемости диэлектрика пленочных конденсаторов его размеры довольно велики: конденсатор емкостью 1 мкФ имеет габарит 1206. Дважды, а лучше трижды стоит подумать, прежде чем выбрать электролитические конденсаторы. Во-первых, следует выбрать габариты, во-вторых, полярность – необходимо предусмотреть дополнительное смещение во избежание отрицательной полярности. И, наконец, следует учесть фактор старения – уменьшение емкости конденсаторов по мере высыхания электролита.

Итак, мы рассмотрели некоторые особенности построения аудиосхем. Мы не преследовали цель выбрать наилучшие решения, поскольку таковых попросту не существует – все зависит от требования конкретного приложения. Мы лишь обратили внимание разработчиков на некоторые проблемы, с которыми они могут столкнуться при построении аудиоканалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Comparing two-wire microphone circuits for automotive applications//www.ti.com.

2. Selecting capacitors to minimize distortion in audio applications//www.ti.com.