

Звуковые усилители класса D: что, зачем и как?

Эрик ГААЛАС (Eric GAALAAS)
Перевод:
Александр КАЗАКЕВИЧ
alexandr.kazakevich@eltech.spb.ru

Популярность усилителей класса D, предложенных еще в 1958 году, заметно выросла в последние годы. Что они собой представляют? Как соотносятся с другими типами усилителей? Почему класс D представляет интерес для аудиотехники? Что необходимо, чтобы сделать «хороший» усилитель класса D? Каковы особенности усилителей класса D от Analog Devices? Ответы на эти вопросы следуют далее.

Немного о звуковых усилителях

Функция звукового усилителя заключается в воспроизведении входного сигнала элементами выходной цепи, с необходимой громкостью и мощностью, точно, с минимальным рассеянием энергии и малыми искажениями. Усилитель должен обладать хорошими характеристиками в диапазоне звуковых частот, который находится в области 20–20 000 Гц (для узкополосных динамиков, например сабвуфера или высокочастотной головки, диапазон меньше). Выходная мощность варьируется в широких пределах в зависимости от назначения усилителя — от милливатт в головных телефонах до нескольких ватт в телевизоре и персональном компьютере (ПК), десятки ватт в домашней или автомобильной стереосистеме; наконец, сотни ватт в наиболее мощных домашних или коммерческих аудиосистемах для театров и концертных залов.

Простейший вариант реализации усилителя звука — использование транзисторов в линейном режиме, что позволяет получить на выходе увеличенное входное напряжение. Усиление в данном случае обычно велико (по меньшей мере, 40 дБ). Часто используется отрицательная обратная связь, так как она улучшает качество усиления, снижая вызванные нелинейностью усилительных каскадов искажения и подавляя помехи от источника питания.

Преимущество усилителей класса D

В обычном усилителе выходной каскад содержит транзисторы, обеспечивающие необходимое мгновенное значение выходного тока. Во многих аудиосистемах выходные каскады работают в классах А, В и АВ. В сравнении с выходным каскадом, работающим в D классе, мощность рассеяния в линейных каскадах велика даже в случае их идеальной реализации. Это обеспечивает D классу значимое

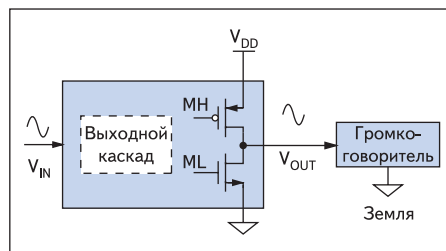


Рис. 1. Линейный выходной КМОП-каскад

преимущество во многих приложениях вследствие меньшего тепловыделения, уменьшения размеров и соответственно стоимости изделий, увеличения времени работы автономных устройств.

Линейные усилители, усилители класса D и мощность рассеяния

Выходные каскады линейных усилителей соединяются непосредственно с громкоговорителем (в некоторых случаях через емкости). Биполярные транзисторы в выходном каскаде обычно работают в линейном (активном) режиме при достаточно больших напряжениях между коллектором и эмиттером. Выходной каскад может также строиться на полевых транзисторах (рис. 1).

Энергия рассеивается во всех линейных выходных каскадах, поскольку при обеспечении выходного напряжения V_{out} , по крайней мере, в одном транзисторе каскада неизбежно возникает отличный от нуля ток I_T и напряжение V_T . Мощность рассеяния сильно зависит от начального смещения выходных транзисторов.

В выходном каскаде, выполненном в классе А, один транзистор служит источником постоянного тока, протекающего через громкоговоритель даже в отсутствие сигнала. (Примечание переводчика. *Необходим запас как по увеличению тока [положительная фаза колебания], так и по уменьшению [отрицательная фаза].*) В данном классе можно получить

хорошее качество звука, однако мощность рассеяния очень велика из-за большого постоянного тока, протекающего через выходные транзисторы (там, где ток нежелателен), даже в отсутствие тока в громкоговорителе (там, где ток собственно и нужен).

Построение выходного каскада в классе В практически исключает постоянный ток через транзисторы и существенно уменьшает мощность рассеяния. Выходные транзисторы в этом случае работают по двухтактной схеме, верхнее плечо обеспечивает положительные токи через громкоговоритель, нижнее плечо — отрицательные. Мощность рассеяния уменьшается потому, что через транзисторы протекает только связанный с сигналом ток, постоянная составляющая практически отсутствует. Однако выходной каскад класса В дает худшее качество звука вследствие нелинейного характера выходного тока при переходе через ноль (переходные искажения), что имеет место из-за особенностей включения/выключения выходных транзисторов.

В классе АВ, являющемся компромиссом между А и В классами, постоянный ток смещения существует, однако гораздо меньший, чем в классе А. Небольшого постоянного тока смещения оказывается достаточно для устранения переходных искажений и обеспечения тем самым хорошего качества звучания. Мощность рассеяния в данном случае оказывается больше, чем в классе В, и меньше, чем в А классе, но все же количественно ближе к классу В. В этом случае, как и в классе В, необходимо управление выходными транзисторами для обеспечения больших положительных и отрицательных выходных токов.

Тем не менее, даже хорошо спроектированный усилитель класса АВ характеризуется значительной мощностью рассеяния, так как средние значения выходных напряжений обычно далеки от напряжений на шинах питания. Большое падение напряжения между стоком и истоком приводит, таким образом, к рассеянию энергии. Мгновенная мощность рассеяния равна $I_T \times V_T$.

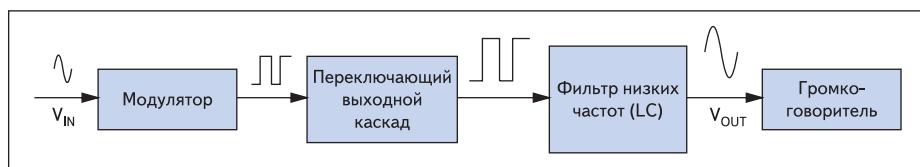


Рис. 2. Блок-схема усилителя класса D без обратной связи

Благодаря совершенно иному принципу, мощность рассеяния усилителя класса D (рис. 2) гораздо меньше, чем в вышеперечисленных случаях. Ключи выходного каскада такого усилителя коммутируют выход с отрицательной и положительной шиной питания, создавая тем самым серии положительных и отрицательных импульсов. Такая форма выходного сигнала существенно уменьшает мощность рассеяния, так как при наличии напряжения ток через выходные транзисторы практически не идет (транзистор «закрыт»), либо, когда транзистор открыт и протекает ток, на нем падает небольшое напряжение V_T . Мгновенная мощность рассеяния, $I_T \times V_T$, в этом случае минимальна.

Поскольку звуковые сигналы заметно отличаются от последовательности импульсов, для преобразования входного сигнала в набор импульсов необходим модулятор. Частотный спектр сигнала модулятора содержит как звуковую составляющую, так и высокочастотную компоненту, которая появляется в процессе модуляции. Поэтому для уменьшения высокочастотной составляющей между выходным каскадом и громкоговорителем часто включается фильтр низких частот. Фильтр (рис. 3) должен обеспечивать минимальные потери, чтобы не растерять преимущество экономичности импульсного режима работы выходного каскада. Фильтр обычно строится из емкостных и индуктивных элементов.

На рис. 4 сравнивается мощность рассеяния (P_{diss}) идеальных выходных каскадов классов А и В с измеренной мощностью рас-

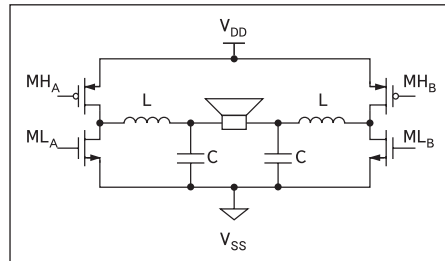


Рис. 3. Мостовое построение выходного каскада с фильтром нижних частот

сеяния усилителя класса D — AD1994, в зависимости от мощности, подводимой к громкоговорителю для синусоидального сигнала (P_{load}). Значения мощности нормированы к уровню $P_{load\ max}$, при котором общие искажения выходного сигнала составляют 10%. Зеленая вертикальная линия соответствует выходной мощности, при которой начинается «срез» синусоиды. Заметное различие в мощности рассеяния наблюдается во всем диапазоне выходных мощностей, особенно при низких и средних значениях. В начале «среза» мощность рассеяния выходного каскада класса D примерно в 2,5 раза меньше, чем в классе В, и в 27 раз меньше, чем в классе А. Заметим, что выходной каскад класса А рассеивает больше энергии, чем доходит до громкоговорителя — следствие большой постоянной составляющей тока смещения.

КПД выходного каскада, Eff (efficiency), определяется следующим образом:

$$Eff = P_{load} / (P_{diss} + P_{load}).$$

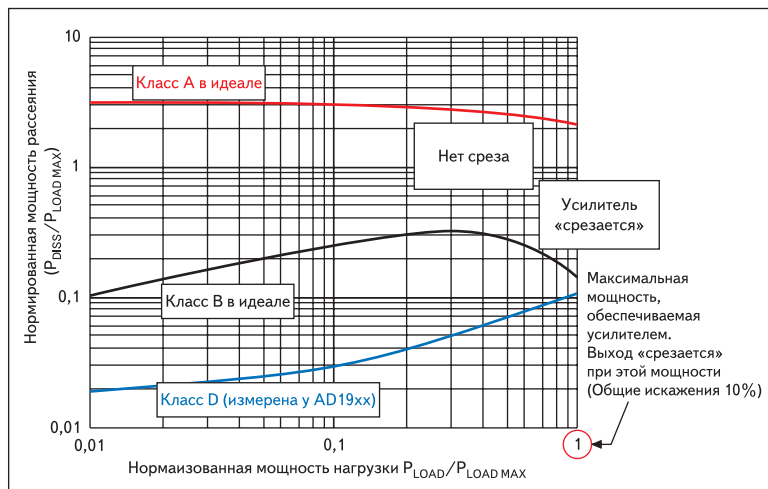


Рис. 4. Мощность рассеяния выходных каскадов классов А, В и D

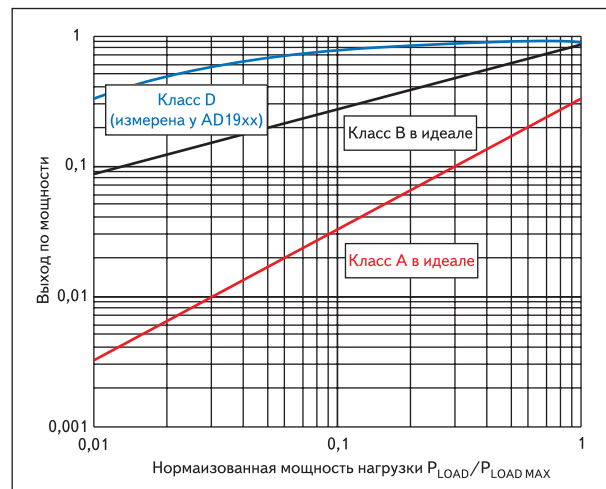


Рис. 5. Выход по мощности усилителей классов А, В и D

В начале «среза» синусоиды Eff равен 25% для усилителя класса А, 78,5% для класса В и 90% для усилителя класса D. Предельные значения КПД усилителей класса А и В часто приводятся в различного рода руководствах.

Разность в мощности рассеивания увеличивается при умеренных уровнях мощности на нагрузке. Это существенно, поскольку даже при высоком уровне громкости преобладающие мгновенные значения мощности заметно меньше пиковых значений, $P_{load\ max}$ (в 5–20 раз, в зависимости от типа звука). Таким образом, для звуковых усилителей $P_{load} = 0,1 \times P_{load\ max}$ является разумным средним значением выходной мощности, для которой можно посчитать мощность рассеяния, P_{diss} . При таком уровне выходной мощности усилитель класса D рассеивает в 9 раз меньше, чем усилитель класса В, и в 107 раз меньше, чем усилитель А класса. Для звукового усилителя с $P_{load\ max} = 10$ Вт средняя мощность $P_{load} = 1$ Вт может рассматриваться как вполне реальная. При этих условиях выходной каскад класса D будет рассеивать 282 мВт, класса В — 2,53 Вт и А класса — 30,2 Вт. КПД при этом составит 78% для класса D, что несколько ниже 90% при максимальной мощности. Но даже в таком случае это гораздо больше, чем КПД каскадов класса В и А — 28% и 3% соответственно.

Это различие имеет важные последствия для конструкции системы. При уровне мощности более 1 Вт, во избежание перегрева, линейные выходные каскады требуют специальных средств охлаждения — обычно это массивные металлические радиаторы или вентиляторы. Если усилитель выполнен в виде микросхемы, для обеспечения отвода тепла может потребоваться специальный корпус, повышающий стоимость устройства. Это особенно критично, например, в плоских телевизионных приемниках, где пространство ограничено, или в автомобильной аудиотехнике, где налицо тенденция к увеличению числа каналов при сохранении того же объема.

При мощностях ниже 1 Вт основной проблемой является не разогрев, а собственно перерасход энергии. При автономном питании линейный выходной каскад опустошит батарею гораздо быстрее, чем усилитель класса D. В приведенном выше примере выходной каскад D класса потребляет в 2,8 раза меньше, чем выходной каскад класса B, и в 23,3 раза меньше, чем выходной каскад класса A, что позволяет существенно увеличить срок работы источников питания сотовых телефонов, портативных ПК, mp3-проигрывателей.

Для упрощения анализ был сосредоточен на выходных каскадах усилителя. Однако, если учесть все потери усилительной системы, при низких мощностях линейные усилители могут оказаться более предпочтительными. Причина в том, что при низком уровне мощности доля рассеиваемой при модуляции и генерации энергии может оказаться значительной. Таким образом, хорошо спроектированные усилители класса AB с малой мощностью рассеяния покоя могут конкурировать с усилителем класса D в разряде усилителей малой и средней мощности. Среди усилителей большой мощности устройства класса D являются непревзойденными по экономичности.

Усилители класса D: терминология. Мостовая и полумостовая схемы

На рис. 3 показано мостовое построение выходного каскада и LC-фильтра в усилителе класса D. Мост имеет два плеча, выдающих импульсы противоположной полярности на фильтр, состоящий из двух индуктивностей и двух емкостей. Каждое плечо моста содержит два выходных транзистора: верхнее плечо — транзистор, соединенный с положительной шиной питания (MH), и нижнее плечо — транзистор, соединенный с отрицательной шиной питания (ML). Верхнее плечо на рис. 3 образовано рМОП-транзистором. Для этой цели часто используют nМОП-транзистор, что позволяет уменьшить площадь и емкость, однако в этом случае необходима особая техника управления затворами транзисторов [1].

В мостовых схемах нередко используется однополярное питание V_{DD} , при этом вместо отрицательной шины питания V_{SS} транзисторы подключаются к общему выводу. При данном напряжении питания мостовая схема включения, являясь по сути дифференциальной, может давать вдвое больший выходной сигнал и вчетверо большую мощность в сравнении с обычной схемой. Обычная (полумостовая) схема включения может иметь однополярное и двухполярное питание, однако при однополярном питании необходимо включать громкоговоритель через блокирующую емкость, чтобы убрать постоянную составляющую выходного напряжения, $V_{DD}/2$.

Напряжение шин питания может колебаться относительно среднего значения за счет

индуктивных токов LC-фильтра. Значение производной напряжения, dV/dt , может быть уменьшено включением больших емкостей между шинами питания, V_{DD} и V_{SS} . В мостовых схемах индуктивная «подкачка» не страшна, так как индуктивный ток, втекающий в одно плечо, вытекает из другого, создавая таким образом локальную токовую петлю и минимально воздействуя на источник питания.

Факторы, определяющие конструкцию аудиоусилителя класса D

Пониженное энергопотребление делает усилитель класса D весьма привлекательным решением, при этом разработчик должен учесть ряд аспектов. Среди них:

- выбор типоразмера выходных транзисторов;
- защита выходного каскада;
- качество звучания;
- способ модуляции;
- электромагнитные помехи;
- конструкция LC-фильтра;
- стоимость системы.

Выбор типоразмера выходных транзисторов

Типоразмер выходных транзисторов выбирается для оптимизации теплорассеяния во всех режимах работы. Для того чтобы напряжение на транзисторе V_T было малым при большом токе I_T , транзистор должен иметь маленькое сопротивление во включенном состоянии, R_{on} (обычно 0,1 или 0,2 Ом). Для этого требуются большие транзисторы, с большой емкостью затвора (C_G). Потребляемая цепями управления затворами мощность — CU^2f , где C — емкость, U — изменение напряжения при переключении транзисторов, f — частота переключения. Потери на переключение становятся большими, если емкость или частота велики, поэтому существует практический верхний предел. Выбор типоразмера транзистора — компромисс между потерями $V_T \times I_T$ и потерями на переключение. Резистивные потери будут преобладать при высокой выходной мощности, потери на переключение — при низкой. Производители силовых транзисторов стараются минимизировать произведение $R_{on} \times C_G$ для уменьшения общей мощности рассеяния транзисторных ключей и обеспечения гибкости при выборе частоты переключения.

Защита выходного каскада

Выходной каскад должен быть защищен от случаев, которые могут привести его к выходу из строя.

Перегрев. Хотя усилители класса D рассеивают меньше тепла, чем линейные, опасность перегрева все еще остается, если уси-

литель долго работает при повышенной мощности. Чтобы избежать этого, необходима цепь температурного контроля. В простых схемах защиты выходной каскад выключается, если его температура, измеренная встроенным датчиком, превысит температурный порог отключения, и не включается, пока температура не придет в норму. Можно использовать и более сложные схемы контроля. Измеряя температуру, цепи управления могут плавно снижать громкость, уменьшая тепловыделение и удерживая температуру в заданных рамках — вместо периодического отключения звука.

Превышение абсолютной величины тока выходных транзисторов. Низкое сопротивление выходных транзисторов во включенном состоянии не является проблемой, если выходные цепи подключены правильно. Большие токи могут возникнуть в случае короткого замыкания выходной цепи либо при ее замыкании с положительной или отрицательной шиной питания. При отсутствии защиты такие токи могут привести к выходу из строя транзисторов или других цепей. Следовательно, необходимы защитные цепи по выходному току. В простых схемах защиты выходной каскад отключается при превышении порогового значения выходного тока. В более сложных схемах выход сенсора тока вносит свой вклад в обратную связь усилителя, обеспечивая достаточно продолжительную работу усилителя без отключения. В таких схемах отключение производится только тогда, когда остальные меры защиты оказываются неэффективными. Качественные схемы обеспечивают защиту усилителя и от больших пиковых токов, возникающих вследствие резонанса в громкоговорителе.

Низкое напряжение. Большинство выходных ключевых каскадов работает нормально, если напряжение питания достаточно велико. Проблема обычно решается при помощи введения цепей блокировки, которые разрешают работу выходного каскада только если превышен определенный порог напряжения питания.

Синхронизация включения выходных транзисторов. Транзисторы верхнего и нижнего плеча имеют очень низкое сопротивление во включенном состоянии (рис. 6). Поэтому важно избегать ситуаций, когда оба транзистора включены одновременно, и большой сквозной ток протекает между положительной и отрицательной шиной питания. В лучшем случае транзисторы будут просто нагреваться и тратить лишнюю энергию, в худшем — они могут выйти из строя. Управление по принципу break-before-make («отключил перед тем как включить») позволяет убрать сквозные токи выключением обоих ключей перед тем, как включить один из них. Интервал времени, в который оба транзистора выключены, называется временем простоя (nonoverlapped time) или «мертвым» временем (dead time).

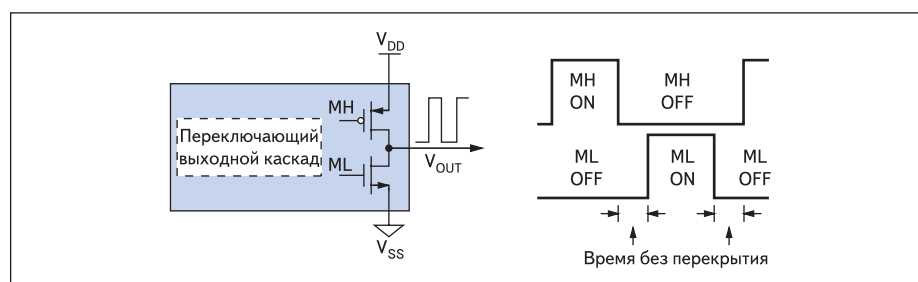


Рис. 6. Переключение транзисторов выходного каскада по принципу «отключил перед тем как включил»

Качество звучания

Для получения хорошего качества звучания усилителя D класса необходимо учесть ряд факторов.

Щелчки и треск, которые возникают при включении и выключении усилителя, могут раздражать пользователя. Они возникают в усилителях D класса, если не уделить самого пристального внимания состоянию модулятора, синхронизации выходного каскада и состоянию LC-фильтра в моменты включения и выключения.

Отношение сигнал/шум. Чтобы собственные шумы усилителя были практически не слышны, отношение сигнал/шум должно быть не менее 90 дБ у маломощных усилителей для портативных устройств, 100 дБ у усилителей средней мощности и 110 дБ у мощных устройств. Для достижения приемлемого отношения сигнал/шум при разработке усилителя необходимо отслеживать все отдельные источники шума.

Искажения включают нелинейность, определяемую способом модуляции и «мертвым» периодом, который необходим для предотвращения сквозных утечек.

Информация об уровне сигнала обычно кодируется шириной импульса модулятора. Наличие «мертвых» периодов влечет за собой нелинейную ошибку тактирования по отношению к импульсам идеальной длины. Для минимизации искажений всегда лучше меньшая длительность «мертвых» периодов. Детальное описание метода оптимизации выходных каскадов для уменьшения искажений можно найти в [2].

Другими источниками искажений являются: различие длительностей фронтов и спадов выходных импульсов, несоответствие временных характеристик цепей управления выходными транзисторами, нелинейность компонентов LC-фильтра низких частот.

Подавление помехи от источника питания. В схеме на рис. 2 шумы источника питания проходят на выход практически без подавления. Это происходит потому, что выходные ключи коммутируют выход усилителя с шинами источников питания через очень низкие сопротивления. Фильтр подавляет высокочастотную составляющую шумов, но пропускает сигналы звуковой частоты, включая шумы. В [3] дается хорошее описание эффек-

та шумов источника питания в мостовых и обычных двухтактных схемах выходных каскадов.

Если специально не заниматься проблемами качества звучания, трудно достичь величины подавления помехи от источника питания лучше, чем 10 дБ, и общих искажений менее 0,1%.

К счастью, решение этих проблем существует. Хорошо помогает глубокая обратная связь (исправно работающая во многих линейных усилителях). Обратная связь (ОС), взятая с входа LC-фильтра, значительно уменьшит влияние источника питания и ослабит все искажения, не относящиеся к самому LC-фильтру. Нелинейности LC-фильтра можно ослабить включением громкоговорителя в контур обратной связи. В хорошо спроектированном усилителе класса D можно достичь качества, достойного меломана, — подавление помехи источника питания более 60 дБ, искажения менее 0,01%.

Введение обратной связи несколько усложняет конструкцию усилителя. Необходимо учитывать проблему стабильности цепи обратной связи — это усложняет процесс проектирования системы. Для непрерывной обработки сигнала обратной связи необходимо включение специальных аналоговых цепей, что в итоге приводит к увеличению стоимости кристалла (в случае интегрального исполнения усилителя).

Для уменьшения стоимости ИМС некоторые производители предпочитают минимизировать или вообще убирать цепи обработки сигнала обратной связи. В некоторых решениях используется модулятор без обратной связи плюс аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для контроля источника питания — для коррекции работы модулятора [3]. Это может улучшить подавление помехи источника питания, но практически не уменьшает общие искажения сигнала. В других цифровых модуляторах используется предкомпенсация ожидаемых ошибок тактирования выходного каскада, или коррекция ошибки модулятора. Это может хотя бы частично учесть некоторые типы искажений, но не все. Усилители класса D без обратной связи могут использоваться в тех случаях, когда к качеству звучания не предъявляется серьезных требований, в остальных случаях обратная связь представляется весьма желательной.

Модуляторы в усилителях D класса могут выполняться многими способами, что отражает большое количество соответствующих разработок. В данной статье будут представлены основные концепции построения модуляторов.

Все способы модуляции в классе D кодируют аудиосигнал в поток импульсов. Обычно ширина импульсов связана с амплитудой звукового сигнала, спектр импульсов при этом включает полезный звуковой сигнал и нежелательную (но неизбежную) высокочастотную (ВЧ) составляющую. Общая мощность высокочастотной составляющей во всех схемах примерно одинакова, так как практически одинакова мощность импульсов, а согласно теореме полноты суммарная мощность сигнала во временной области равна таковой в частотной области. Однако распределение энергии по частоте варьируется широко: в некоторых случаях это выраженные ВЧ-тоны над низким шумовым фоном, тогда как в других распределение таково, что тоны отсутствуют при более высоком основном фоне.

Наиболее общим способом модуляции является широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Суть ее заключается в том, что звуковой сигнал сравнивается с сигналом треугольной или пилообразной формы фиксированной частоты (несущей). Получается поток импульсов той же частоты, при этом длительность каждого импульса пропорциональна величине звукового сигнала. В примере на рис. 7 аудиосигнал и треугольные импульсы центрированы относительно 0 В, тогда при 0 В на аудиовходе скважность выходных импульсов составит 50%. При большом положительном входном сигнале скважность будет около 100%, при большом отрицательном — около 0%. Если амплитуда звукового сигнала превысит амплитуду треугольных импульсов, получим полную модуляцию, когда переключение прекращается, скважность составит 0% или 100%.

Способ ШИМ предпочтительнее потому, что может обеспечить до 100 дБ и выше подавление помехи источника питания при достаточно низкой частоте несущей — в несколько сотен кГц, что дает возможность ограничения потерь при переключении выходного каскада. Кроме того, многие ШИМ устойчивы почти до 100%-ной модуляции, что обеспечивает стабильность работы усилителя на максимальных мощностях, вблизи области перегрузки. Тем не менее, ШИМ имеет и некоторые минусы. Во-первых, вследствие своей собственной природы, искажения вносит сам процесс ШИМ [4], во-вторых, гармоники несущей ШИМ дают помехи в радиодиапазоне длинных и средних волн, наконец, ширина импульсов ШИМ становится очень малой вблизи полной модуляции. Это в большинстве случаев вызывает

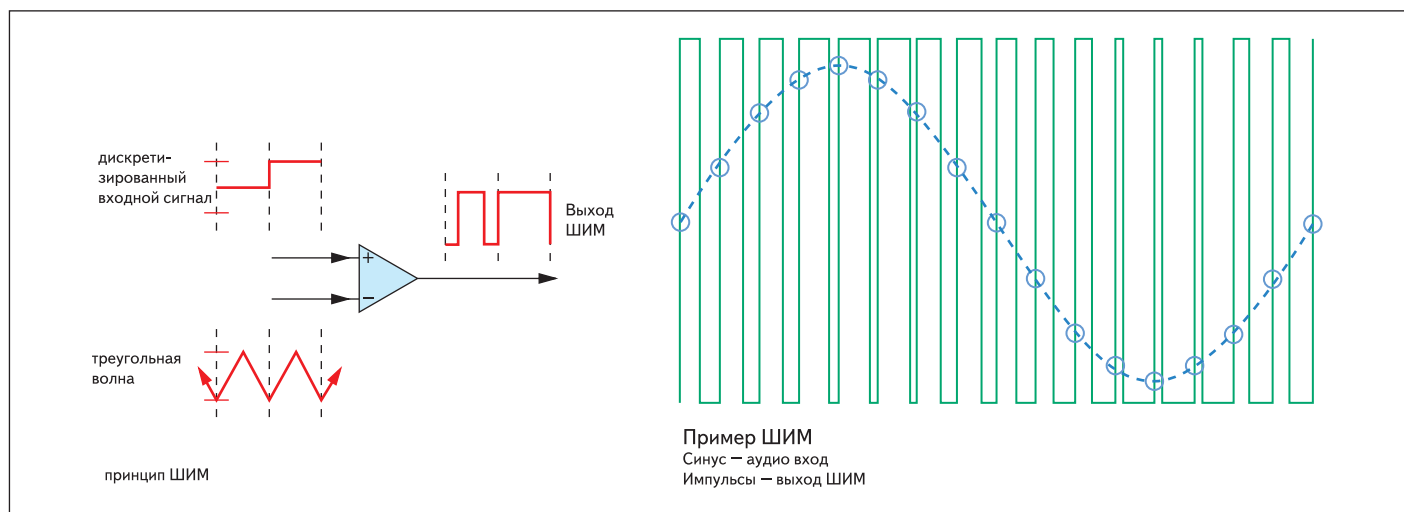


Рис. 7. Широтно-импульсная модуляция

проблемы в цепях управления выходным каскадом — из-за естественных ограничений процесс переключения не может быть настолько быстрым, чтобы получать импульсы длительностью в единицы наносекунд. Поэтому полная модуляция часто недостижима в усилителях с ШИМ, что ограничивает максимальную мощность значениями ниже теоретических, учитывающих лишь мощность источника питания, сопротивление включенного транзистора и эквивалентное сопротивление громкоговорителя.

Альтернативой ШИМ является модуляция плотностью импульсов (МПИ), когда число импульсов за определенный отрезок времени пропорционально среднему значению звукового сигнала. Ширина отдельного импульса не является определяющей, как в ШИМ, вместо этого импульсы «квантованы» кратко периоду генерации модулятора. Одной из разновидностей МПИ является 1-битный сигма-дельта модулятор.

Значительная часть ВЧ составляющей мощности сигма-дельта модулятора распределена в широком диапазоне частот без концентрации в отдельные тоны с частотами, кратными несущей, как это происходит в ШИМ. Это дает преимущество сигма-дельта модуляции по сравнению с ШИМ в плане электромагнитных помех. Некоторая составляющая на частоте дискретизации в методе МПИ все же имеется, однако, учитывая, что типичные значения частоты составляют от 3 до 6 МГц, что значительно выше звукового диапазона, эти тоны сильно подавляются LC-фильтром нижних частот. Другим преимуществом сигма-дельта модулятора является то, что минимальная длительность импульса составляет один период дискретизации даже при больших сигналах, близких к условию полной модуляции. Это упрощает конструкцию цепей управления выходным каскадом и обеспечивает их надежную работу вплоть до теоретически максимального уровня мощности. Несмотря на это, обыч-

ные 1-битные сигма-дельта модуляторы не слишком часто используются в усилителях D класса [4], поскольку они обеспечивают лишь до 50% модуляции, и выход по мощности ограничен. Кроме того, для достижения приемлемого отношения сигнал/шум в звуковой полосе частот требуется не менее, чем 64-кратная передискретизация, что соответствует частоте импульсов минимум 1 МГц.

В последнее время были предложены усилители на основе автогенератора [5]. В этих усилителях всегда используется обратная связь, определяющая частоту переключения модулятора, при этом внешний задающий генератор не применяется. Спектр ВЧ составляющей, как правило, более равномерен, чем в ШИМ. Благодаря обратной связи в данном случае возможно высокое качество звука, однако контур является автоколебательным, поэтому его трудно синхронизировать с какой-либо другой колебательной системой или соединить с цифровым источником звука без предварительного преобразования в аналоговый.

В мостовой схеме (рис. 3) для снижения электромагнитных помех может использоваться 3-ступенчатая модуляция. При работе мостового усилителя в обычном дифференциальном режиме плечо А должно находиться в противофазе с плечом В. Используется два состояния моста: плечо А подключено к положительной шине, плечо В — к отрицательной, и наоборот. В общем случае существует еще два состояния, в которых оба плеча моста находятся в одинаковых состояниях (оба подключены к положительной шине или оба к отрицательной). Одно из этих синфазных состояний может быть использовано наряду с дифференциальными для 3-ступенчатой модуляции, когда на дифференциальном входе LC-фильтра может быть положительный сигнал, нулевой или отрицательный. Нулевое состояние может использоваться как соответствующее низкому уровню мощности вместо переключения между

положительными и отрицательными уровнями в 2-ступенчатой схеме. При нулевом состоянии снижается дифференциальная электромагнитная помеха на LC-фильтре, хотя, в то же время, увеличивается синфазная составляющая. Этот режим возможен только при малых выходных мощностях, так как лишь дифференциальные выходные сигналы способны обеспечить работу такой схемы на максимальной мощности. Схемы с переменным уровнем синфазного напряжения в 3-ступенчатой модуляции представляют в некоторой степени альтернативу усилителям с замкнутой обратной связью.

Уменьшение электромагнитных помех (ЭМП)

ВЧ-компоненты выхода усилителя класса D заслуживают отдельного рассмотрения. При недостаточном понимании процессов и отсутствии адекватных мер эти части системы могут давать сильные ЭМП и мешать работе остального оборудования.

Необходимо учесть два вида ЭМП: сигналы, излучаемые в пространство, и те, которые распространяются по проводам громкоговорителя и питающей сети. Спектры излучаемых ЭМП и тех, которые распространяются по проводам, определяет схема модуляции усилителя класса D. Однако существуют схемотехнические решения, позволяющие значительно снизить уровень ЭМП усилителя.

Весьма полезное правило заключается в минимизации размеров петли обратной связи, по которой протекают высокочастотные токи, так как воздействие ЭМП на другие цепи определяется площадью петли и расстоянием до них. Например, весь LC-фильтр, включая проводку громкоговорителя, должен размещаться как можно более компактно и близко к усилителю. Для уменьшения площади петель провода каждой из цепей должны размещаться ближе друг к другу (не лишней будет витая пара для проводки громкоговорителя).

Следует обратить внимание и на большие зарядные токи, возникающие при переключении выходных каскадов. Это происходит из-за наличия выходных емкостей, образующих петлю тока, содержащую обе емкости. ЭМП в данном случае зависят от уменьшения площади этой петли, что означает минимальные расстояния от емкостей до транзисторов, которые их заряжают.

В некоторых случаях бывают полезны ВЧ-дрессели, включенные последовательно с питанием усилителя. Правильно размещенные, они способны «запереть» зарядные ВЧ-токи в локальных участках цепей усилителя и не давать им распространяться на значительные расстояния по шинам питания.

Если время простоя схемы управления затворами выходных транзисторов достаточно велико, индуктивные токи громкоговорителя или LC-фильтра могут сместить в прямом направлении паразитные диоды у выводов выходных транзисторов. При включении управления смещение на диодах сменится на обратное. При смене смещения диодов на обратное могут иметь место большие выбросы тока, что создает дополнительный источник ЭМП. Для ослабления этого типа помех нужно минимизировать время простоя выходного каскада (это полезно и для уменьшения искажений). Если же этого недостаточно, необходимо включать диоды Шоттки параллельно паразитным диодам для отвода токов и предотвращения включения паразитных диодов. Это помогает благодаря специфическим свойствам, присущим диодам Шоттки.

LC-фильтры с тороидальными сердечниками, хорошо концентрирующими магнитное поле, также способствуют уменьшению электромагнитного излучения. Излучение от более дешевых, цилиндрических сердечников может быть снижено при помощи экранирования — разумного компромисса между ценой и ЭМ-помехами. В этом случае должны быть приняты меры для того, чтобы экранирование не ухудшило линейность индуктивности и таким образом снизило качество звука до неприемлемого уровня.

Конструкция LC-фильтра

Для уменьшения габаритов и стоимости системы большинство LC-фильтров для усилителей класса D представляют собой фильтры низких частот второго порядка. На рис. 3 представлена мостовая версия LC-фильтра второго порядка. Громкоговоритель позволяет предотвратить внутренний резонанс выходной цепи. Хотя импеданс громкоговорителя часто аппроксимируется простым резистором, его структура более сложна и содержит существенную реактивную составляющую. Чтобы грамотно спроектировать фильтр, необходимо использовать точную модель громкоговорителя.

При конструировании фильтра основной проблемой является наиболее узкая полоса

Таблица 1. Стандартные значения L и C для построения фильтров

Индуктивность L (мкГн)	Емкость C (мкФ)	Сопротивление громкоговорителя (Ом)	Полоса частот -3 дБ (кГц)
10	1,2	4	50
15	1	6	41
22	0,68	8	41

пропускания с минимальным спадом в области верхних звуковых частот. Типичный фильтр имеет характеристику Баттерворта в 40 кГц для достижения максимальной равномерности характеристики в полосе пропускания). Данные таблицы 1 дают возможность построения фильтров с характеристикой Баттерворта для громкоговорителей с типичными импедансами и стандартных значений L и C.

Если отсутствует обратная связь с громкоговорителем, величина искажений будет зависеть от линейности составляющих фильтра.

Факторы, определяющие конструкцию индуктивности. Важными факторами являются величина и форма сигнала тока, а также сопротивление обмотки.

Выбранная индуктивность должна иметь номинальные токи выше, чем максимальные токи усилителя. Причина в том, что сердечники индуктивностей испытывают магнитное насыщение, если величина тока становится слишком большой, а плотность магнитного потока — слишком высокой. Это приводит к значительному снижению индуктивности.

Чтобы получить индуктивность, необходимо намотать провод на сердечник. Если витков много, сопротивление, пропорциональное длине провода, становится значительным. Так как это сопротивление включается последовательно между плечом моста и громкоговорителем, часть выходной мощности будет рассеиваться на нем. Если сопротивление получается слишком большим, необходимо использовать провод большего диаметра или другой материал сердечника, чтобы снизить число витков без уменьшения индуктивности.

И, как уже отмечалось выше, не следует забывать, что геометрия индуктивности также влияет на уровень ЭМП.

Стоимость системы

Каковы наиболее важные факторы, определяющие общую стоимость аудиосистемы на основе усилителя D класса? Как минимизировать затраты?

Активные компоненты усилителя класса D состоят из выходного ключевого каскада и модулятора. Стоимость их приблизительно такая же, что и линейного усилителя. Вопросы выбора возникают при рассмотрении остальных компонентов системы.

Пониженное тепловыделение усилителей класса D позволяет экономить на теплоотво-

дах и вентиляторах. Усилитель класса D, построенный на интегральной схеме, может быть выполнен по той же причине в более компактном и дешевом корпусе, чем линейный усилитель той же мощности. При использовании цифрового источника звука для линейного усилителя, кроме того, нужен цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Это, конечно, необходимо и для усилителя D класса, требующего аналогового входного сигнала, однако варианты усилителей с цифровым входом исключают необходимость использования ЦАП.

С другой стороны, принципиальным недостатком усилителей D класса является необходимость включения LC-фильтра. Его части, в особенности индуктивность, требуют места и увеличивают стоимость. В усилителях большой мощности цена LC-фильтра компенсируется большой стоимостью системы охлаждения. Однако в недорогих устройствах малой мощности стоимость индуктивности становится заметной. Например, стоимость микросхемы усилителя для мобильного телефона может быть меньше, чем общая стоимость LC-фильтра. И даже если пренебречь ценой, остается проблема занимаемого места для компактных устройств.

Это явилось причиной создания усилителей, в которых LC-фильтр отсутствует. При таком решении экономится место и снижается стоимость, хотя и теряется преимущество низкочастотной фильтрации. В отсутствие фильтра уровень ЭМП может возрасти до неприемлемого уровня — если громкоговоритель не индуктивный и находится на удалении от усилителя, токовый контур и мощность усилителя достаточно велики. Нереальная для мощных усилителей, например, домашней стереосистемы, такая ситуация типична для мобильного телефона.

Существует и другой подход для уменьшения числа компонентов LC-фильтра. Можно использовать не мостовую, а обычную двухтактную схему выходного каскада, что позволяет вдвое сократить число емкостей и индуктивностей. Однако такая схема требует двухполярного питания, и дополнительная стоимость, связанная с созданием отрицательного источника питания, может оказаться критической, если, конечно, отрицательное плечо уже не используется для других целей, или усилитель имеет достаточное число каналов. Двухтактный выходной каскад может питаться и однополярным источником, но это несколько снижает выходную мощность и зачастую требует блокирующего конденсатора большой емкости.

Усилители D класса Analog Devices

Затронутые выше проблемы свидетельствуют, что разработка усилителя D класса — дело достаточно сложное. Для экономии времени разработчиков компания

Таблица 2. Звуковые усилители класса D от Analog Devices

	Число каналов	Выходная мощность (Вт)	КПД (%)	Динамический диапазон (дБ)	Сигнал / шум (дБ)	Общие искажения (дБ)	Напряжение питания (В)	Ток потребления
AD1990	2	5	84	102	102	-90	4,5-5,5	20 мА
AD1991	2	20	87	—	—	—	4,5-5,5	2,75 мА
AD1992	2	10	84	102	102	-90	4,5-5,5	20 мА
AD1994	2	25	84	102	102	-90	4,5-5,5	20 мА
AD1996	2	40	84	102	102	-90	4,5-5,5	20 мА
SSM2301	1	1,4	85	—	98	-67	2,5-5	4,5 мА
SSM2302	2	1,4	85	—	98	-67	2,5-5	6,6 мА
SSM2304	2	2	85	—	98	-67	2,5-5	6,6 мА

Analog Devices предлагает разнообразные усилители D класса на интегральных схемах, включающих усилители с программируемым коэффициентом усиления, модуляторы и выходные каскады. Для каждого типа усилителя имеются специальные демонстрационные отладочные платы. Конструкция плат позволяет эффективно, без изобретения очередного велосипеда, решить все проблемы, стоящие перед разработчиками усилителей класса D.

Рассмотрим, например, AD1990, AD1992, AD1994 и AD1996 — семейство интегральных схем (ИС), представляющих собой двоянные усилители средней мощности для двухканальных устройств, с выходной мощностью 5, 10, 25 и 40 Вт на канал соответственно.

Некоторые свойства этих ИС:

- Звуковой усилитель D класса AD1994 включает два канала с программируемым усилением, два сигма-дельта модулятора и два выходных каскада, что позволяет использовать его в мостовых схемах с однополярным питанием. Он способен обеспечивать 25 Вт на канал в стереорежиме или 50 Вт в мостовой схеме включения с КПД до 90%. Для усиления сигнала имеется программи-

руемый коэффициент усиления в 0, 6, 12 и 18 дБ.

- Микросхема обладает встроенными устройствами защиты выходного каскада от перегрузки и перегрева, а также от сквозных токов. Благодаря специальному управлению синхронизацией и калибровке смещения, усилители обеспечивают минимальные помехи при включении/выключении. Следящая обратная связь и оптимизированное управление выходным каскадом обеспечивают уровень искажений 0,001%, динамический диапазон 105 дБ и подавление помехи источника питания более 60 дБ. Одноритный сигма-дельта модулятор специально усовершенствован для применения в усилителях D класса, обеспечивает среднюю частоту потока данных 500 кГц, высокое усиление до 90% модуляции и стабильность вплоть до полной модуляции. Специальный режим работы модулятора обеспечивает повышенную выходную мощность.
- Логика, программируемый усилитель и модулятор питаются от источника 5 В, выходной каскад питается напряжением от 8 до 20 В. Рекомендуемый дизайн усилителя обеспечивает соответствие правилам FCC

Class B по уровню ЭМП. При нагрузке 6 Ом и питании 5 и 12 В AD1994 рассеивает 487 мВт в покое, 710 мВт при выходной мощности 2×1 Вт и 0,27 мВт в режиме экономии. Выпускается в 64-выводном корпусе LFCSP, рабочий диапазон температур от -40 до +85 °С.

Технические характеристики звуковых усилителей класса D от Analog Devices содержатся в таблице 2.

Литература

1. International Rectifier, Application Note AN-978, HV Floating MOS-Gate Driver ICs.
2. Nyboe F., et al. Time Domain Analysis of Open-Loop Distortion in Class D Amplifier Output Stages. The AES 27th International Conference, Copenhagen, Denmark, September 2005.
3. Zhang L., et al. Real-Time Power-Supply Compensation for Noise-Shaped Class D Amplifier. The 117th AES Convention, San Francisco, CA, October 2004.
4. Nielsen K. A Review and Comparison of Pulse-Width Modulation (PWM) Methods for Analog and Digital Input Switching Power Amplifiers. Te 102nd AES Convention, Munich, Germany, March 1997.
5. Putzeys B. Simple Self-Oscillating Class D Amplifier with Full Output Filter Control. The 118th AES Convention, Barcelona, Spain, May 2005.
6. Gaalaas E., et al. Integrated Stereo Delta-Sigma Class D Amplifier. IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 40, no. 12, December 2005. About the AD199x Modulator.
7. Morrow P., et al. A 20-W Stereo Class D Audio Output Stage in 0.6 mm BCDMOS Technology. IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 39, no. 11, November 2004. About the AD199x Switching Output Stage.
8. PWM and Class D Amplifiers with ADSP-BF535 Blackfin® Processors. Analog Devices Engineer-to-Engineer Note EE-242. ADI website: www.analog.com (Search) EE-242 (Go)