

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ИНТЕРФЕЙСЫ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ЗВУКОВЫХ ФОРМАТОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Андрей Данилов, к.т.н., старший научный сотрудник Института проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова

Статья посвящена микросхемам АЦП и ЦАП, специальным преобразователям и интерфейсам, предназначенным для обработки и передачи цифровых звуковых сигналов высокого разрешения, в том числе многоканальных.

ЧАСТЬ 1. АЦП И ЦАП

Цифровые звуковые форматы высокого разрешения¹ вышли из стен лабораторий и студий звукозаписи и прочно обосновались на потребительском рынке. Двухканальный цифровой компакт-диск (CD-DA), бывший эталоном качества звучания в 1980-е, «низвергнут» многоканальными форматами высокоточного воспроизведения звукового окружения DVD-Audio, DTS-ES, SACD и др., превосходство которых способен оценить даже неподготовленный слушатель [1]. Повсеместный переход бытовой аудио/видео аппаратуры на многоканальные звуковые форматы с высокой частотой выборки потребовал «подтянуть» параметры элементной базы к требованиям, совсем недавно предъявлявшимся — в части линейности и динамического диапазона — к компонентам профессионального студийного оборудования, причем при одновременном снижении стоимости микросхем² и увеличении числа каналов, размещенных в одном корпусе [2].

Разработчики АЦП и ЦАП еще в 1980-х сошлись во мнении, что только один метод построения преобразователей — на базе $\Delta\Sigma$ (греч. дельта-сигма) модулятора — может удовлетворить противоречивым требованиям одновременного расширения полосы рабочих частот и динамического диапазона [3, 4]. Принцип такого преобразования был предложен еще в 1946 г., но получил название «delta-sigma» в Токийском университете от его сотрудников Inose и Yasuda в 1962 г. Первый дельта-сигма АЦП

был воплощен «в железе» Джеймсом Кэнди (James C. Candy) в 1975 г. Дальнейшие исследования показали, что такие преобразователи являются весьма наукоемкими устройствами, и для их успешной реализации необходима фундаментальная подготовка в области нелинейных систем автоматического регулирования, цифровой фильтрации, компьютерного моделирования и многих смежных дисциплин, а также уверенное владение дискретно-аналоговой схмотехникой и полупроводниковой технологией.

В отличие от АЦП и ЦАП других типов, дельта-сигма преобразователи являются одноразрядными приборами, осуществляющими повышающую передискретизацию сигнала (oversampling), что обеспечивает высокое (до 24 дв. разрядов включительно) разрешение в полосе рабочих частот и значительно снижает требования к обрамляющим аналоговым НЧ-фильтрам. Канонические дельта-сигма (ДС) преобразователи монотонны по своей природе, что очень важно для звуковых устройств, и совместимы со стандартным КМОП-процессом, используемым при реализации цифровых микросхем. Большим преимуществом ДС-преобразователей является их технологичность, т.е. высокие параметры в основном обеспечиваются структурными, схмотехническими и алгоритмическими методами.

Неидеальность элементов, образующих ДС-модулятор (гистерезис компаратора, конечное усиление интегратора, коммутационная помеха ключей ЦАП и др.), обуславливают тот факт, что линейность ДС-преобразователей

далека от теоретического предела, но, тем не менее, достаточно высока. Один из лучших интегральных преобразователей звуковых сигналов, работающий на другом принципе (Sign-Magnitude R-2R) и реализованный по комбинированной (BiCMOS) технологии, — ЦАП типа **PCM1704U-K** компании TI/Burr-Brown, обеспечивает разрешающую способность 24 разряда, типовой динамический диапазон 112 дБ (А-взвешенный) и уровень общих гармонических искажений плюс шум (THD + N) в полосе измерения 20 Гц...20 кГц не менее -97 дБ, и только после лазерной подгонки тонкопленочных резисторов на кристалле. Такие параметры не являются рекордными для современных ИС дельта-сигма преобразователей.

На протяжении ряда лет выпускались ИС дельта-сигма модуляторов (например, ADMOD79), предназначенные для работы с внешними цифровыми фильтрами. Прогресс КМОП-технологии позволил создать БИС, сочетающие функции АЦП, ЦАП и цифровых процессоров в одном кристалле. По мере развития технологии и схмотехники, ДС-преобразователи постепенно занимали отдельные ниши инструментальных АЦП и ЦАП (см. ЭК №2, 4 и 5, 2004), и в 1990-х стали использоваться в интегральных преобразователях звуковых сигналов. В настоящее время, уже выпускаются микросхемы радиочастотных ДС АЦП с полосой пропускания 25 МГц, где модулятор работает на частоте 1 ГГц.

Минимальное значение коэффициента передискретизации³ K дельта-сигма АЦП определяется максимальной частотой $f_{\text{ВХ,MAX}}$ входного аналогового сигнала и выходной разрядностью N , т.е., с учетом теоремы Котельникова, $K_{\text{min}} = 2N$. Поэтому

¹ Согласно публикациям AES (Общество звукоинженеров, www.aes.org), звуковой формат высокого разрешения должен обеспечивать частоту выборки звукового сигнала более 64 кГц и эффективную разрешающую способность по амплитуде не менее 20 дв. разрядов — прим. автора.

² 10 лет назад микросхемы 18-разрядных АЦП с частотой выборки 48 кГц продавались по 50 долл. США за корпус; большая часть описанных в статье ИС стоит 5—10 долл., в оптовых партиях.

³ В англоязычной литературе часто используется сокращение OSR (OverSampling Ratio).

одноразрядный модулятор 24-разрядного преобразователя с $f_{\text{ВХ, max}} = 20$ кГц должен работать с частотой выборки $K \times f_B$ не менее 960 кГц, тогда как для многоразрядного преобразователя параллельного типа минимальная частота выборки составляет $2 \times f_{\text{ВХ, max}} = f_{\text{В, min}} = 40$ кГц. Поскольку преобразование осуществляется с повышающей передискретизацией, спектр шума квантования ДС-модулятора простирается до частоты $K \times f_B/2$, и внеполосную часть этого шума необходимо подавить при помощи цифрового фильтра. В противном случае, наложение спектров (aliasing) и другие продукты интермодуляции ограничат прирост отношения сигнал/шум преобразователя в результате передискретизации, который должен составлять 3 дБ при удвоении частоты выборки.

Понижающая передискретизация путем прореживания выборок (decimation), осуществляемая после цифровой фильтрации, необходима для снижения в K раз (т.е. до значения f_B) частоты следования отсчетов. Затем прореженный поток битов (bit-stream) преобразуется в цифровой код, фиксируемый выходным регистром АЦП. В звуковой аппаратуре, работающей в формате DSD, фильтрация и прореживание не производятся, и т.н. прямой цифровой поток (Direct Stream Digital), поступающий с тактовой частотой $64 \times 44,1$ кГц $= 2,82$ МГц с выхода ДС-модулятора, используется при записи оптического диска Super Audio CD.

На выходе одноразрядного амплитудного квантователя, каковым является канонический дельта-сигма модулятор, отношение сигнал/шум равно 6 дБ, поэтому при $K = 48$ отношение сигнал/шум (SNR) на выходе преобразователя составит $6 + 3 \times 48/2 = 78$ дБ, что недостаточно для звуковых АЦП или ЦАП высокого разрешения. Поэтому в данных приборах используется коэффициент передискретизации не менее 64 (для $f_B = 44,1$ кГц), что дает теоретическое значение отношения сигнал/шум 102 дБ.

Наряду с повышающей передискретизацией и цифровой фильтрацией, прирост разрешающей способности ДС-преобразователя в полосе рабочих частот обеспечивает *формирование спектра шума квантования* (noise shaping) путем введения дополнительных интеграторов в контур регулирования модулятора. На рисунке 1 показана структурная схема ДС-моду-

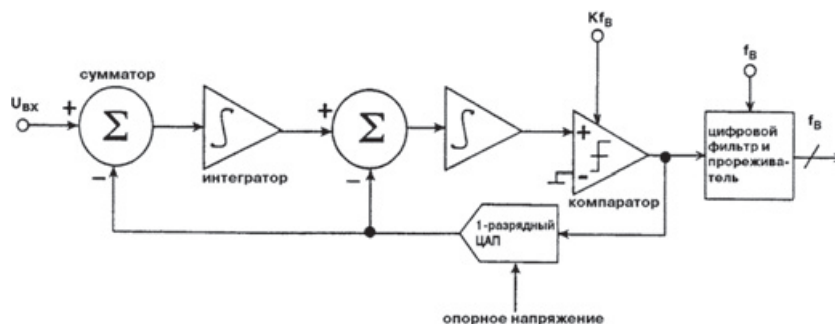


Рис. 1. Дельта-сигма модулятор второго порядка

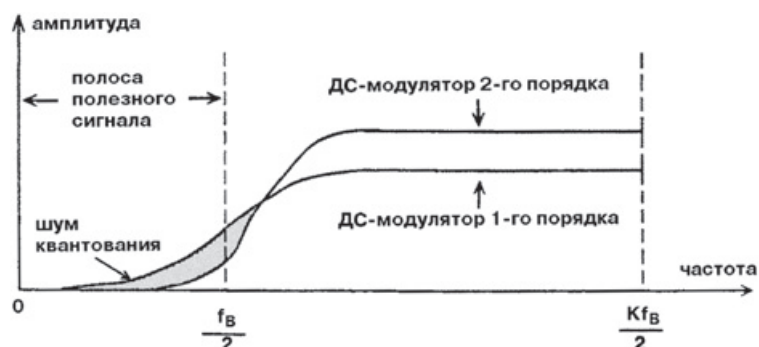


Рис. 2. Спектры шума квантования ДС-модуляторов первого и второго порядков

лятора второго порядка, содержащего два интегратора, а рисунок 2 иллюстрирует снижение шума квантования в полосе полезного сигнала в результате такой модернизации. Важной предпосылкой повышения порядка модулятора также является снижение вероятности появления паразитных частот (idle tones)⁴ и кодовых комбинаций (idling patterns) на его выходе.

Другим распространенным способом расширения динамического диапазона ДС-модулятора при сохранении его порядка и тактовой частоты является увеличение разрядности амплитудного квантователя и ЦАП (Multi-bit delta-sigma converter). Однако в этом случае ЦАП определяет линейные свойства ДС-модулятора, и подстройка его элементов становится такой же обязательной, как и в параллельных преобразователях. Чтобы ослабить требования к линейности встроенного ЦАП и чувствительность преобразователя к «дрожанию» фазы тактового сигнала (jitter), применяются статистические методы коррекции погрешности [5–7], в том числе рандомизаторы (скремблеры), выполняющие различные алгоритмы динамического согласования элементов (DEM). Дополнительно снизить уровень шума квантования в полосе пропускания позволяет включение скремблера в контур регулирования ДС-модулятора.

Альтернативой увеличению порядка или разрядности ДС-модулятора является архитектура с многокаскадным формированием шума (Multi-stage noise shaping, MASH), т.е. каскадирование нескольких одноразрядных модуляторов (см. рис. 3). По принципу работы, этот способ напоминает конвейерное (pipe-line) преобразование. Однако практическая реализация MASH-преобразователя довольно сложна, поскольку, для сохранения монотонности, параметры модуляторов, а также взаимнообратные передаточные функции интеграторов и дифференциаторов должны быть согласованы с высокой точностью. Рекурсивное каскадирование 4-разрядных ДС-модуляторов с динамическим согласованием элементов позволяет значительно снизить шум квантования в полосе рабочих частот, не прибегая к подстройке параметров компонентов [8].

Очевидно, что перераспределение мощности шума квантования в область высоких частот ужесточает требования к цифровому фильтру, следующему за модулятором, и качество фильтра в значительной мере определяет параметры преобразователя. Для построения фильтров, как правило, используются структуры типа КИХ или БИХ, либо их комбинация (чаще всего, КИХ пред-

⁴ Это свойство ДС-модуляторов первого порядка используется для построения управляемых генераторов.

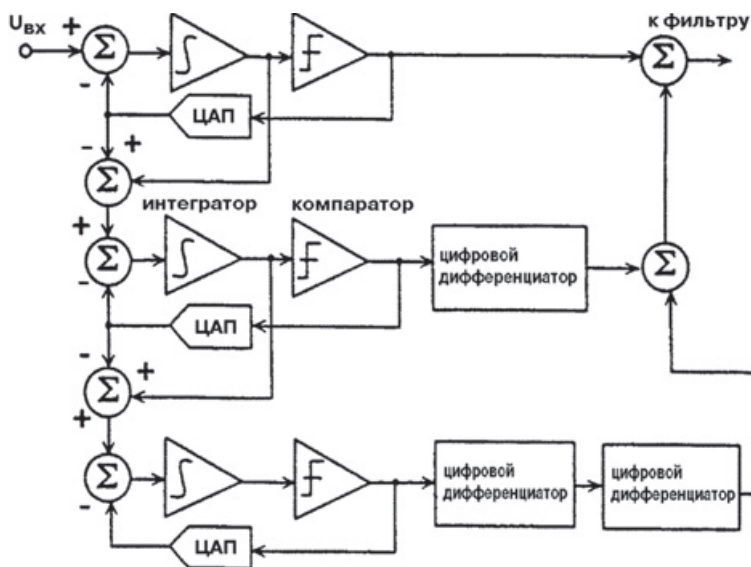


Рис. 3. Многокаскадный ДС-модулятор

варяет БИХ). Усредняющий цифровой фильтр с Конечной Импульсной Характеристикой (FIR) проще в расчете и программной реализации (он всегда устойчив), имеет линейную фазовую характеристику (что важно для звуковых сигналов), совместим с операцией прореживания отсчетов, но требует большое число коэффициентов (т.е. каскадов) для формирования передаточной функции с необходимой точностью. Среднее время задержки типового КИХ-фильтра, работающего на частоте выборки 48 кГц, равно 1,5 мс. Фильтр с бесконечной импульсной характеристикой (IIR) эффективнее по аппаратным и вычислительным затратам, дает в 4 раза меньшее время задержки (в среднем), однако из-за наличия обратной связи не совместим с операцией прореживания, потенциально неустойчив и имеет нелинейную фазовую характеристику, поэтому сложнее для расчета и программирования.

Следует отметить, что, теоретически, только ДС-модуляторы первого и второго порядков являются устойчивыми [9], и дальнейшее повышение порядка модулятора вынуждает разработчиков принимать специальные, иногда довольно сложные меры для обеспечения его нормальной работы, в том числе, после подачи напряжения питания и перегрузки по амплитуде и/или скорости нарастания входного сигнала. В целом, проблемы с устойчивостью являются преодолимыми, и большинство звуковых ДС-преобразователей реализуются на основе модуляторов 3–7 порядка.

Все вышесказанное относится и к ЦАП, поскольку ДС-преобразователи являются обратимыми устрой-

ствами: если на выход модулятора подать однобитовый цифровой поток, на входе (т.е. выходе 1-разрядного ЦАП) появится соответствующее ему напряжение. В дельта-сигма ЦАП операции выполняются в обратном порядке, т.е. двоичный входной код преобразуется в поток битов, который подвергается повышающей передискретизации, интерполяции и цифровой фильтрации. На выходе 1-разрядного ЦАП устанавливается устройство выборки-хранения или НЧ-фильтр на переключаемых конденсаторах, дополнительную фильтрацию сигнала осуществляет внешний аналоговый фильтр.

В цифроаналоговых преобразователях, работающих в формате DSD (где входная цифровая фильтрация, как правило, не применяется), для подавления внеполосного шума и коммутационной помехи рекомендуется использовать НЧ-фильтр с частотой среза 50 кГц и крутизной спада АЧХ 30 дБ на октаву [10]. Часто с этой целью комбинируют встроенный в ИС ЦАП фильтр 2-го порядка и внешний фильтр 3-го порядка, которые, в совокупности, и обеспечивают требуемое стандартом SACD («Scarlet Book») затухание –30 дБ на частоте 100 кГц.

На рынке звуковых преобразователей, ввиду его специфики, представлены микросхемы небольшого числа фирм. Среди них — гиганты полупроводниковой индустрии: Analog Devices, Philips Semiconductors, Texas Instruments (отделение Burr-Brown), STMicroelectronics, и несколько специализированных компаний, включая японскую Asahi Kasei Microsystems Co., Ltd. (AKM), шотландскую Wolf-

son Microelectronics, не имеющую собственной фабрики, и американскую Cirrus Logic, Inc. Рассмотрим более подробно их продукцию, имеющую отношение к звуковым форматам высокого разрешения.

Компания AKM была основана в 1983 году с 50% участием американской фирмы AMI Inc. и занялась разработкой и производством специализированных КМОП БИС. В японском городе Ацуги (Atsugi) были построены научно-исследовательский центр и фабрика. На рынок аналого-цифровых (mixed-signal) микросхем AKM вышла в 1990-х. В настоящее время она выпускает ДС АЦП и ЦАП, различные мультимедийные кодеки, сетевые интерфейсы, экономичные ЭСПЗУ с последовательным интерфейсом, а также многоканальные 8-разрядные ЦАП со встроенным ЭСПЗУ. Однако известность фирме принесли именно высококачественные звуковые преобразователи профессионального и бытового назначения.

Микросхема **AK5394A** представляет собой двухканальный 24-разрядный АЦП с частотой выборки до 216 кГц (на канал, здесь и далее), который реализован на базе многоразрядного ДС-модулятора и предназначен для использования в профессиональной звуковой аппаратуре. При частоте выборки 192 кГц ($K = 64$) типовое А-взвешенное отношение сигнал шум равно 123 дБ, уровень общих гармонических искажений плюс шум в полосе измерения 80 кГц (!) не превышает –94 дБ (уровень входного сигнала – 1 дБ от полной шкалы, dBFS); в этом режиме цифровой КИХ-фильтр обеспечивает полосу пропускания 87 кГц с неравномерностью АЧХ $\pm 0,007$ дБ и внеполосное затухание 120 дБ. При частоте выборки 48 кГц ($K = 256$) уровень гармонических искажений плюс шум не превышает –110 дБ в полосе 10 Гц...20 кГц. АЦП имеет дифференциальные входы ($\pm 2,4$ В), отдельные источники опорного напряжения для каждого канала, двухрежимный выходной интерфейс I²S, контроллер и ОЗУ для калибровки постоянного смещения в пределах ± 50 мВ, отключаемый цифровой фильтр высоких частот с частотой среза 1 Гц. Аналоговые цепи ИС питаются от источника $+5$ В $\pm 5\%$, цифровые — от источника с напряжением $+3...5,25$ В. Прибор размещен в корпусе SOP28 и рассеивает мощность 665 мВт.

На основе аналогового ДС-модулятора реализован двухканальный 24-разрядный ЦАП типа **AK4396**. Его

блок-схема, показанная на рисунке 4, является типовой для современных двухформатных ЦАП, оборудованных входами ИКМ (PCM) и DSD. Прибор имеет дифференциальные выходы с максимальным размахом напряжения 5,6 В (0 dBFS), встроенный НЧ-фильтр второго порядка на переключаемых конденсаторах. При частоте выборки 192 кГц ЦАП обеспечивает уровень общих гармонических искажений плюс шум в полосе измерения 80 кГц не более -97 дБ и типовой динамический диапазон 120 дБ (А-взвешенный). К сожалению, в описании не приведены аналогичные параметры для режима DSD. Рассогласование коэффициентов передачи каналов не превышает 0,3 дБ. В режиме ИКМ возможна 256-шаговая линейная регулировка уровня выходного сигнала; 24-разрядный цифровой фильтр — интерполятор с управляемой крутизной спада АЧХ работает с 8-кратной передискретизацией (при частоте выборки 48 кГц) и обеспечивает стандартную коррекцию предискажений. Прибор размещен в корпусе VSOP28 и рассеивает мощность 200 мВт. Выпускается также 8-канальный двухформатный ЦАП типа **AK4358** с почти аналогичными параметрами, за исключением корпуса (LQFP48) и потребляемой мощности (310 мВт).

Из приборов полупрофессионального и бытового применения, предлагаемых фирмой АКМ, следует упомянуть двухканальный 24-разрядный ДС АЦП типа **AK5365** с частотой выборки до 96 кГц, оборудованный входным 5-канальным коммутатором, предварительным усилителем с НЧ-фильтром, программируемым усилителем (0...12 дБ с шагом 0,5 дБ), системой АРУ, предотвращающей перегрузку АЦП, выходным цифровым аттенуатором (128 уровней) и ВЧ-фильтром (1 Гц), а также 3-х проводным последовательным микропроцессорным интерфейсом (возможно переключение в режим I²C). Прибор обеспечивает динамический диапазон 103 дБ и уровень общих гармонических искажений плюс шум -94 дБ при частоте выборки 48 кГц, размещен в корпусе LQFP48 и рассеивает мощность 130 мВт. Функциональный аналог **AK5365** под названием **PCM1850** выпускает компания Texas Instruments. Совмещенные в корпусе кодака AK4588 24-разрядные двухканальный АЦП и 8-канальный ЦАП работают с частотой выборки до 96 кГц и 192 кГц, соответственно. ИС имеет встроенную систему ФАПЧ и цифровые звуковые интер-

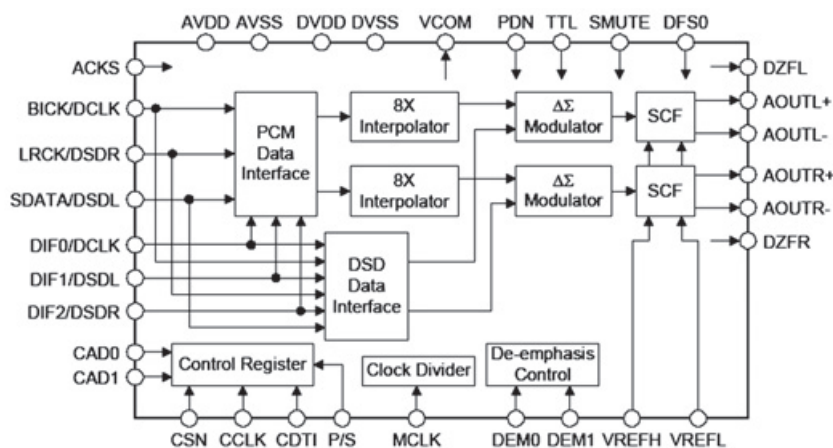


Рис. 4. Блок-схема ЦАП типа **AK4396** (SCF — фильтр на переключаемых конденсаторах, DZFL/R — выходы сигналов управления внешними ключами при нулевом коде на входе ИКМ)

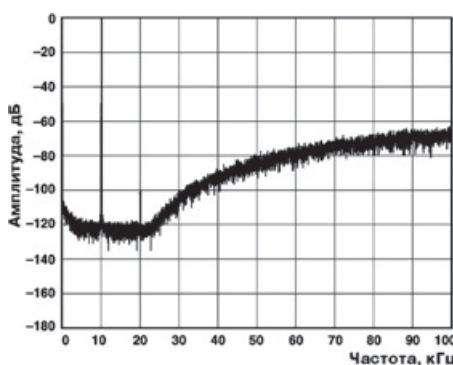


Рис. 5. Спектр 10-кГц выходного сигнала ЦАП типа **AD1955** в режиме DSD

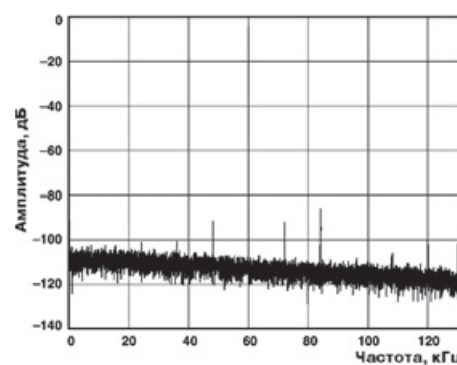


Рис. 6. Спектр выходного 60-кГц сигнала ЦАП типа **AD1955** в режиме ИКМ/192 кГц

фейсы (приемник и передатчик), совместимые со стандартами AES3, IEC60958, S/PDIF и EIAJ CP1201, которые мы рассмотрим во второй части статьи.

Компания Analog Devices предлагает 24-разрядный двухканальный АЦП типа **AD1871** с частотой выборки до 96 кГц; 4-разрядный ДС-модулятор второго порядка снабжен блоком DEM на основе скремблера, управляемого натуральным кодом амплитудного квантователя, и оптимизирован для работы с тактовой частотой 6,144 МГц ($K = 64$ при 96 кГц). К сожалению, рост общих гармонических искажений плюс шум в полосе 20 Гц...20 кГц с -104 дБ до -87 дБ при увеличении уровня входного сигнала с -5 дБ до -0,5 дБ (размах 5,656 В принят за 0 дБ), ограничивает область применения данного АЦП. Однако по функциональным возможностям **AD1871** превосходит аналогичные приборы конкурирующих фирм. Например, выход I²S и ДС-модулятор можно переключить в режим DSD с тактовой частотой 5,64 МГц ($K = 128$) и снимать сигнал непосредственно с выхода модулятора, минуя цифровые фильтры.

В отличие от упомянутого выше **AD1871**, линейность двухформатного, двухканального ЦАП типа **AD1955** (24 разряда, 192 кГц) очень высока, хотя, судя по технической документации, в нем использован аналогичный ДС-модулятор. По сравнению с ЦАП **AK4396** компании АКМ, в **AD1955** отсутствует фильтр на переключаемых конденсаторах и выходной сигнал является токовым (макс. размах 8,64 мА). На рисунке 5 приведен спектр выходного сигнала ЦАП в режиме DSD, соответствующий полной шкале 10-кГц синусоиды. Видно, что уровень внеполосного шума нарастает медленно (порядок модулятора не более 2), и вторая гармоника полезного сигнала не превышает -100 дБ. На рисунке 6 показан спектр выходного сигнала 60 кГц (0 дБ полной шкалы) в режиме ИКМ с частотой выборки 192 кГц; график показывает, что уровень продуктов наложения спектров заведомо ниже -80 дБ.

Комбинацией быстродействующего 26-разрядного ЦПОС (DSP) и трехканального ЦАП является **AD1953**, — ЦАП с цифровой обработкой сигналов (SigmaDSPTM Signal Processing DAC), предназначенный для построе-

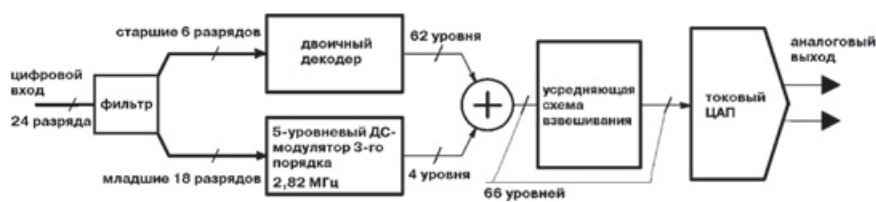


Рис. 7. Блок-схема ЦАП типа DSD1794A

ния кинотеатральных (2.1) и мультимедийных систем, музыкальных инструментов и цифровых громкоговорителей. Достаточно производительный ЦПОС, выполняющий большую часть операций с двойной точностью (48 разрядов), позволяет в реальном времени обрабатывать 3 входных ИКМ сигнала с частотой выборки 48 кГц. По умолчанию, в каждом канале программно реализованы 7-полосный параметрический эквалайзер (на основе БИХ-фильтров) и схема задержки (0...6 мс); два независимых динамических процессора обеспечивают регулируемые компрессию (атака, удержание, затухание) и ограничение амплитуды отдельно для широкополосных стереоканалов и НЧ-канала («сабвуфера»). Высокие параметры многоразрядного ДС ЦАП (динамический диапазон 112 дБ и уровень искажений —100 дБ), возможности загрузки программы пользователя и наращивания производительности за счет подключения внешних ЦПОС посредством многоканальной подсистемы ввода-вывода позволяют эффективно использовать AD1953 в профессиональной аппаратуре. Прибор размещен в корпусе LQFP48 и рассеивает 540 мВт. Компания Analog Devices также выпускает 24-разрядный кодек **AD1837A**, содержащий 2-канальный ДС АЦП (уровень искажений —95 дБ) и 8-канальный ДС ЦАП (—92 дБ), оба с частотой выборки 96 кГц.

Флагманом линейки АЦП компании Cirrus Logic является 24-разрядный прибор **CS5381** с частотой выборки до 200 кГц, реализованный на основе многоразрядного дельта-сигма модулятора 5-го порядка со встроенным в контур скремблером. АЦП имеет дифференциальные входы с КОСС 100 дБ, входным сопротивлением 2,5 кОм и полной шкалой 5,65 В (размах). При частоте выборки 192 кГц невзвешенный динамический диапазон составляет 114 дБ (А-взвешенный 120 дБ) в полосе измерения 40 кГц. Уровень общих гармонических искажений плюс шум не хуже —107 дБ (—1 dBFS) в той же полосе. Отключаемый цифровой фильтр высоких частот имеет частоту

среза 1 Гц. Схема обнаружения перегрузки входным сигналом восстанавливает нормальную работу прибора через 680...740 мс, индицируя нерабочее состояние логическим уровнем на специальном выводе микросхемы. АЦП размещен в 24-выводном корпусе SOIC или TSSOP и потребляет не более 260 мВт от двух источников питания (аналогового 5 В $\pm 5\%$ и цифрового 3,1...5,25 В).

Блок-схема ЦАП типа CS4398 соответствует рисунку 4. Динамический диапазон (120 дБ) и функциональные возможности **CS4398** также очень близки прибору AK4396 фирмы AKM. В численном выражении, уровень гармонических искажений ниже у преобразователя Cirrus Logic (—107 дБ), однако, он приведен для полосы измерения в 4 раза уже (20 кГц). Особенностью CS4398 является отключаемый цифровой НЧ-фильтр в канале DSD (50 кГц, 27 дБ/октаву). В режиме Direct DSD (без фильтра) невзвешенный динамический диапазон преобразователя составляет 114 дБ (А-взвешенный 117 дБ), а типовой уровень общих гармонических искажений плюс шум равен —104 дБ. Прибор размещен в корпусе TSSOP28 и рассеивает не более 340 мВт. Для многоканальных звуковых систем предназначен 8-канальный ЦАП типа CS4385, имеющий аналогичные функциональные возможности и очень близкие параметры нелинейных искажений (—104 дБ) и динамического диапазона (114 дБ). Данная микросхема размещена в корпусе LQFP48 и рассеивает не более 482 мВт. Кодек CS42528 не поддерживает формат DSD, но в добавление к 8-канальному ЦАП в него включены двухканальный АЦП и приемник S/PDIF с системой ФАПЧ; линейность 24-разрядных АЦП/ЦАП заведомо лучше —94 дБ, сквозной А-взвешенный динамический диапазон составляет 114 дБ (192 кГц).

Компания Texas Instruments присоединилась к производителям высококачественных звуковых преобразователей после приобретения в 2001 году фирмы Burr-Brown, известной своими разработками в данной области. В свою очередь, инженеры Burr-Brown получили доступ к технологическому

потенциалу TI и ее опыту в области цифровой обработки сигналов. В результате, продукция отделения Burr-Brown укрепила свои позиции на рынке компонентов для профессиональной и бытовой аппаратуры.

Четырехканальные АЦП **PCM4204** (корпус HTQFP64) и ЦАП **PCM4104** (TQFP48) имеют дифференциальные входы и выходы и поддерживают частоту выборки до 216 кГц. Двухформатный преобразователь PCM4204 содержит четыре одноразрядных ДС-модулятора, снабженных — для расширения динамического диапазона — схемами подмешивания псевдослучайного шума модулированной плотности (density modulated dither); выходные КИХ-фильтры обеспечивают подавление внеполосного шума не менее 100 дБ на всех стандартизованных частотах выборки. Четыре выхода DSD (K = 128) могут быть переключены в режим входов для преобразования внешних сигналов DSD в 24-разрядные выборки ИКМ, т.е. *ИС может работать в качестве преобразователя форматов*. Динамический диапазон АЦП составляет не менее 108 дБ (невзвешенный, режим ИКМ) и 115 дБ (А-взвешенный, DSD), уровень общих гармонических искажений плюс шум не превышает —103 дБ во всех режимах. ЦАП типа PCM4104 реализован на базе многоразрядных ДС-модуляторов и снабжен выходными НЧ-фильтрами на переключаемых конденсаторах (—0,2 дБ на частоте 20 кГц). Максимальный размах выходного напряжения составляет 6,15 В, выходное сопротивление 5 Ом. При частоте выборки 192 кГц уровень искажений не превышает —97 дБ в полосе измерения 40 кГц, А-взвешенный динамический диапазон 118 дБ.

Двухформатный 24-разрядный ЦАП типа **DSD1794A** с дифференциальным токовым выходом (размах 7,8 мА) реализован на основе сегментированного ЦАП (см. рис. 7), что обеспечило динамический диапазон 127 дБ (А-взвешенный, частота выборки 48...192 кГц) и общие гармонические искажения 0,0015% (ИКМ, 192 кГц) и 0,0005% (DSD, 2,82 МГц) в полосе измерения 20 Гц...20 кГц. Старшие 6 разрядов при помощи декодера преобразуются в инвертированный дополнительный смещенный двоичный (ИСОВ) код. Младшие 18 разрядов поступают на 2,3-разрядный ДС-модулятор 3-го порядка. Выходные уровни обеих ветвей эквивалентны по весу. Натуральный 66-уровневый код поступает на скремблер, осуществляющий взвешивающее

усреднение (DWA, разновидность алгоритма DEM), и далее на сегментированный токовый ЦАП. Такое решение, использованное и в некоторых других ЦАП компании, обеспечивает низкий уровень собственного шума и пониженную чувствительность к нестабильности тактового сигнала, но линейность для средних и больших сигналов (когда включаются старшие разряды) не улучшается. На рисунке 8 приведен график спектра выходного сигнала ЦАП частотой 1 кГц (–60 дБ), характеризующий малосигнальную линейность DSD1794A в режиме ИКМ (48 кГц). Рисунок 9 иллюстрирует проблемы с линейностью (график искажений теряет монотонность), возникающие в сегментированной схеме в области больших амплитуд выходного сигнала (–20...0 дБ, режим ИКМ/48 кГц). Для переходной характеристики такого ЦАП большое значение имеет точность временного согласования разнородных сегментов (ветвей), которая должна обеспечиваться цифровым фильтром. Управление режимами работы ЦАП, в том числе крутизной спада АЧХ фильтра, осуществляется по шине I²C. Прибор размещен в корпусе SSOP28 и рассеивает 335 мВт (192 кГц).

Сняв с производства три модели ИС ЦАП, подпадавшие под определение Административного суда США о нарушении патентных прав компании Cirrus Logic, фирма Wolfson представила в 2004 году новые преобразователи высокого разрешения, в том числе, двухканальный АЦП типа **WM8786** и усовершенствованную версию двухканального ЦАП типа **WM8740** (оба — в корпусе SSOP28). Взвешенное отношение сигнал/шум АЦП составляет 111 дБ (192 кГц, K = 32), общие гармонические искажения плюс шум на частоте 1 кГц — 102 дБ или 0,0008% (типичное значение) в полосе измерения 20 Гц...20 кГц, полная шкала дифференциального входного сигнала 2 В с.к.з.⁵, типовой разбаланс каналов, как и у большинства описанных выше ЦАП, равен 0,1 дБ. Выходной КИХ-фильтр обеспечивает внеполосное затухание –85 дБ; ВЧ-фильтр имеет частоту среза 3,7 Гц. Преобразователь реализован на основе многоразрядного ДС-модулятора высокого порядка.

Блок-схема ЦАП типа WM8740 соответствует приведенной на рисунке 4, за исключением цепей DSD (этот формат не поддерживается).

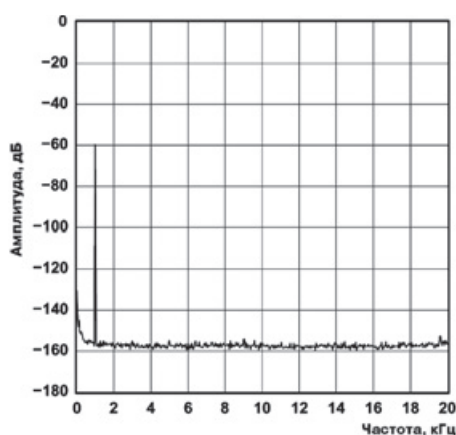


Рис. 8. Спектр выходного сигнала ЦАП типа DSD1794A 1 кГц/–60 дБ в режиме ИКМ/48 кГц

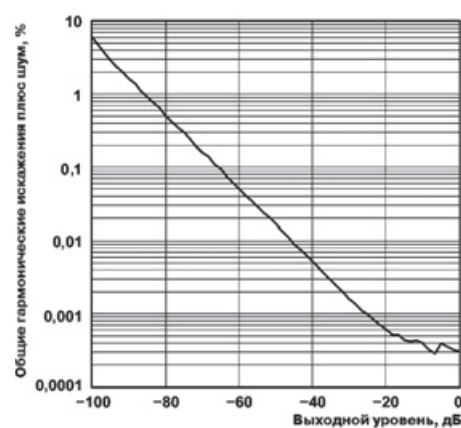


Рис. 9. Зависимость нелинейных искажений ЦАП типа DSD1794A от уровня сигнала

Выходной фильтр — аналоговый, с частотой среза 192 кГц. Для эффективного подавления внеполосного шума 6-разрядного ДС-модулятора (2,82 МГц) и снижения требований к входному фильтру, ЦАП оборудован блоком DEM, осуществляющим декомпозицию 6-разрядного кода ИКМ в натуральный неравновесный 14-разрядный код при помощи взвешивающей многокаскадной матрицы, состоящей из нескольких столбцов (каскадов). Для предотвращения появления комбинационных частот, двойные элементы матрицы выбираются псевдослучайным образом. Остатки, получающиеся в конце каждой строки, суммируются с равными весами и поступают на выходной фильтр. В результате, типовое отношение сигнал/шум составляет 116 дБ (96 кГц) и уровень искажений не превышает –95 дБ в полосе измерения 20 Гц...20 кГц при полной шкале (2 В с.к.з.) выходного сигнала 1 кГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цифровая звукозапись, *n/ped.* Дж. Маеса и М. Веркаммена, пер. с англ., М.: Муп, 2004, 352 с.
2. Joshua Israelsohn, *Sound Bytes*, EDN, June 24, 2004, pp. 41–52.
3. J. Candy and G. Temes, *Oversampling methods for A/D and D/A conversion*, in *Oversampling Delta-Sigma Data Converters*, IEEE Press, 1992, pp. 1–25.
4. *Sigma-delta ADCs and DACs*, Application Note AN-283, Analog Devices, Inc.
5. R.T. Baird and T.S. Fiez, *Improved delta-sigma DAC using data weighted averaging*, IEEE International Symposium on Circuits and Systems, vol.1, pp. 13–16, 1995.

6. E. Fogleman and I. Galton, *A Dynamic Element Matching Technique for Reduced-Distortion Multibit Quantization in Delta-Sigma ADCs*, IEEE Transactions On Circuits and Systems – II: Analog and Digital Signal Processing, Vol. 48, No.2, February 2001.

7. E. Bach, *Multibit oversampling D/A converters using dynamic element matching methods*, SIEMENS AG Semiconductors Group HL SC PE1 MS, SysConv 27.727.

8. D. Schinkel, Ed van Tuijl and Anne-Johan Annema, *Reducing quantization noise with recursive delta-sigma modulators*, ISCAS 2004, pp. 1084–1087.

9. R.T. Baird and T.S. Fiez, *Stability analysis of high-order delta-sigma modulation for ADC's*, IEEE Transactions On Circuit and Systems – II: Analog and Digital Signal Processing, vol. 41, January 1994, pp. 59–62.

10. Steven Green, *The ABCs of DACs*, Pro Sound News, November 2003.

Материалы сайтов:

11. www.akm.com
12. www.analog.com
13. www.cirrus.com
14. www.ti.com
15. www.wolfsonmicro.com

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

УСЛУГИ ПО СБОРКЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Москва, Нижегородская ул., 31
 тел./факс: (095) 278-9660, 278-9674, 913-8421
 E-mail: sales@melt.com.ru
<http://www.melt.com.ru>

МЭЛТ

⁵ Среднеквадратическое (R.M.S.) значение.