

# ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ВЕЗДЕ И ВСЮДУ



В.Шурыгина

Несмотря на широкое распространение цифровой техники, реальный мир по-прежнему описывается аналоговыми функциями. И хотя большинство электронных систем содержат цифровые схемы управления, для регулировки работы многих устройств нужны аналоговые компоненты. Для объединения цифровых и аналоговых блоков системы не обойтись без аналого-цифровых (АЦП) и цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). Сегодня на рынке представлено множество микросхем АЦП и ЦАП, удовлетворяющих самым разнообразным требованиям систем. Рассмотрим последние достижения в области ЦАП.

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦАП

### Характеристики, определяющие разрешение

При выборе ЦАП в первую очередь необходимо определить требуемую разрядность  $N$  (задаваемую в битах). И  $2^N$  младших значащих бит (МЗБ) определяют максимальный выходной аналоговый сигнал.

Следующий по важности параметр ЦАП – интегральная нелинейность (Integral NonLinearity – INL), показывающая, насколько передаточная характеристика ЦАП отличается от идеальной, строго линейной характеристики (рис.1а). Выражается в МЗБ. Это отклонение измеряется на каждом этапе преобразования. Для простейших и самых дешевых ЦАП INL достигает  $\pm 16$  МЗБ. За счет применения поправочных коэффициентов в программном обеспечении этот параметр в высококачественных ЦАП может быть менее  $\pm 1$  МЗБ.

Дифференциальная нелинейность (Differential NonLinearity – DNL) определяет, насколько приращение аналогового сигнала, полученное при увеличении кода на 1 МЗБ, отличается от идеального значения (рис.1б). DNL характеризует монотонность преобразователя, т.е. способность ЦАП увеличивать аналоговый выходной сигнал при увеличении входного кода.

Погрешность смещения ЦАП, определяющая отклонение реального выходного сигнала от идеального (рис.1в),

равна выходному сигналу при отсутствии на входе цифровых данных. Эта погрешность постоянна для всех входных цифровых данных и может быть компенсирована соответствующей калибровкой. Выражается в милливольтках. Приемлемое значение погрешности обычно меньше  $\pm 10$  мВ.

И, наконец, погрешность преобразования – разность между значениями максимального напряжения идеального и реального выходного аналогового сигнала после вычета погрешности смещения (рис.1г). Погрешность преобразования выражается и в МЗБ, и в милливольтках.

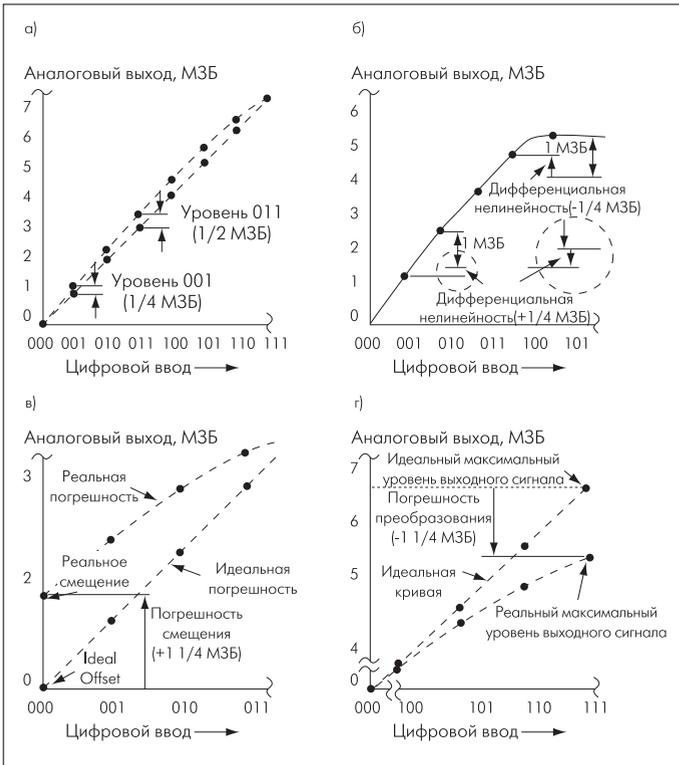
### Динамические выходные характеристики

Идеальный ЦАП должен выдавать на выходе аналоговый сигнал, как только на вход поступает цифровой код. Однако в реальных условиях время установления выходного сигнала зависит от задержки распространения сигнала в схеме и скорости нарастания выходного сигнала.

Большое значение имеет максимальная частота дискретизации, т.е. частота, на которой ЦАП способен выдавать на выходе корректный результат. Частота дискретизации должна быть не меньше удвоенной максимальной частоты в спектре сигнала. Так, для полного воспроизведения звукового сигнала, спектр которого составляет 20 кГц, частота его дискретизации должна быть не менее 40 кГц.

При выборе ЦАП, особенно для малосигнальных приложений, следует обращать внимание на суммарные гармонические искажения + шум (Total Harmonic Distortion + Noise – THD + N). Этот параметр выражается в процентах мощности гармоник и шума в выходном сигнале. Разрядность и шумовой порог ЦАП определяют его динамический диапазон – соотношение максимального и минимального сигналов, воспроизводимых ЦАП. Выражается в децибелах.

Максимальное входное напряжение ЦАП в значительной степени зависит от опорного напряжения  $V_{REF}$  (если не применяется дополнительный усилительный выходной каскад). Опорное напряжение задается встроенным или внешним источником. Напряжение  $V_{REF}$  также определяет зна-



**Рис. 1. Характеристики ЦАП: интегральная нелинейность (а); дифференциальная нелинейность (б); погрешность смещения (в) и погрешность преобразования (г)**

чение напряжения, на которое изменяется выходной сигнал при изменении входного кода на 1 МЗБ. Точность работы ЦАП в значительной степени зависит от температурной зависимости опорного напряжения. Типичное значение температурного дрейфа встроенных источников опорного напряжения при изменении входного кода на  $\pm 1$  МЗБ составляет 100 ppm/°C (0,1%/°C), т.е. они могут работать в ограниченном температурном диапазоне.

В случае применения внешнего источника опорного напряжения следует учитывать не только требуемый ток и диапазон входного опорного напряжения, но и динамические свойства структуры преобразователя. При изменении входного цифрового кода может меняться и входное сопротивление источника опорного напряжения. Таким образом, внешний источник опорного напряжения должен отслеживать каждый этап загрузки в заданное время. В противном случае следует использовать дополнительный конденсатор или операционный усилитель.

ЦАП с внешним источником опорного напряжения могут работать в режиме умножения. В этом случае на вход опорного напряжения подается переменное напряжение, которое умножается на заданный цифровой входной код и передается на выход. При работе в этом режиме следует учитывать диапазон напряжения и динамические характеристики входа опорного напряжения.

С выходного каскада ЦАП можно снимать токовый сигнал или сигнал напряжения.

## ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЦАП

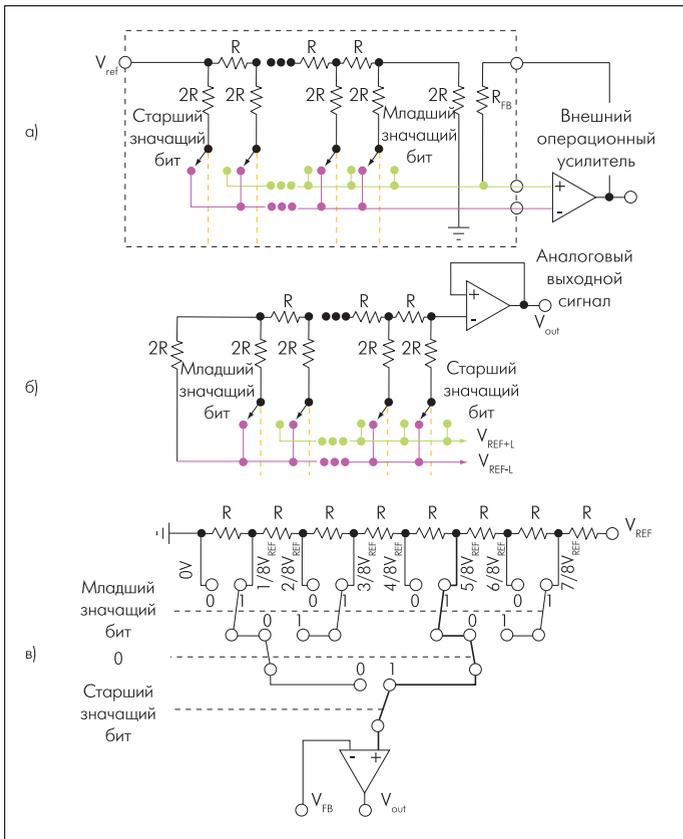
Сегодня специалисты в области средств обработки информации хорошо знакомы с аналого-цифровыми преобразователями и легко воспроизводят блок-схему и объясняют принципы работы АЦП. Что же касается ЦАП, большинство инженеров представляют этот преобразователь в виде черного ящика, на вход которого поступает цифровой сигнал, а с выхода снимается соответствующий аналоговый. Поэтому имеет смысл кратко рассмотреть основные типы современных прецизионных ЦАП.

### Архитектура лестничного R2R ЦАП (resistor ladder)

состоит из параллельно включенных резисторов с сопротивлением R и 2R. В ней используется параллельная шина ввода данных. В случае работы с устройствами с последовательным интерфейсом в многоразрядных ЦАП применяется встроенный преобразователь последовательного кода в параллельный. В любом случае расфазировка сигналов, вызванная рассогласованием времени срабатывания переключателей, приводит к генерации ложных сигналов на выходе.

Наиболее распространена архитектура перемножающего лестничного R2R ЦАП (Multithyling DAC – MDAC, рис.2а), в которой начало "цепи" присоединено к внешнему источнику опорного напряжения. С выхода его снимается ток, эквивалентный входному цифровому коду. ЦАП такой архитектуры обеспечивают высокое выходное напряжение, высокое разрешение (16 бит), дифференциальную и интегральную нелинейности  $\pm 1$  МЗБ. Перемножающие ЦАП лестничного R2R-типа требуют применения внешнего операционного усилителя. Время установления сигнала ЦАП этого типа менее 0,3 мкс, полоса пропускания может превышать 10 МГц. Благодаря применению внешнего операционного усилителя, отвечающего требованиям конструктора системы, перемножающие ЦАП находят широкое применение в контрольных устройствах с цифровым управлением, промышленных контроллерах с программируемой логикой.

Однако в промышленных системах чаще используется обратная лестничная R2R-архитектура (рис.2б). В ЦАП этого типа в зависимости от входного цифрового кода 2R-ступени



**Рис.2. Топологии популярных ЦАП: перемножающая R2R-архитектура (а); обратная R2R-архитектура (б); строковая архитектура (в)**

подключаются либо к шине высокого уровня опорного напряжения  $V_{REF-H}$ , либо к шине низкого уровня опорного напряжения  $V_{REF-L}$ . С его выхода снимается напряжение, эквивалентное входному цифровому коду. Такая архитектура достаточно проста в изготовлении. Как и перемножающий ЦАП, обратная лестничная R2R-архитектура характеризуется малыми значениями шума, дифференциальной и интегральной нелинейности. Время установления сигнала несколько больше, чем у перемножающего ЦАП.

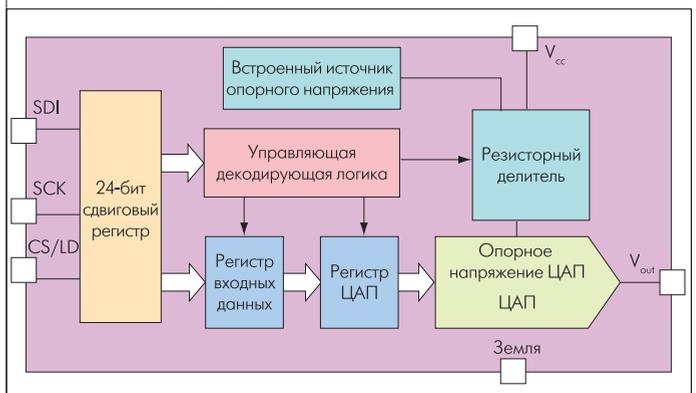
**Строковые ЦАП**, как следует из их названия, состоят из последовательно включенных резисторов с одинаковым сопротивлением (рис.2в). Теоретически число резисторов определяет точность преобразователя. Так, в восьмиразрядном ЦАП с такой архитектурой используется 256 резисторов, а для создания 16-бит преобразователя потребуется 65536 резисторов, которые практически невозможно изготовить на одном кристалле, особенно с учетом современных требований к малым габаритам, низкой потребляемой мощности и стоимости электронных компонентов. Для развязки резисторных элементов и внешней нагрузки в строковом ЦАП предусмотрен встроенный выходной операционный усилитель. Потребляемая мощность ЦАП этого типа невелика. Они отличаются монотонностью, хорошей динамической нелинейностью. Уровень ложных сигналов, как правило, ниже, чем у ЦАП других типов. Однако строковые ЦАП уступают лестничным ЦАП R2R-типа по шумовым характеристикам, которые зависят от импеданса

резисторной матрицы. Кроме того, их интегральная нелинейность чувствительна к топологии схемы и зависит от согласования резисторов. Для современных строковых ЦАП она может составлять  $\pm 4$  МЗБ, что приемлемо для основных областей их применения – портативного контрольно-измерительного оборудования, замкнутых следящих систем, систем управления производством и устройств сбора данных.

**Дельта-сигма ЦАП** относятся к классу ЦАП передискретизации. Их работа основана на изменяемой плотности импульсов. Такие преобразователи при небольшой собственной разрядности обеспечивают достаточно большую разрядность итогового преобразования. На ЦАП поступает импульсный сигнал с постоянной длительностью импульсов, но с изменяемой скважностью, который формируется с помощью цепи отрицательной обратной связи. Цепь отрицательной обратной связи выполняет функцию фильтра высоких частот для шума квантования. Для генерации сигнала с модулированной плотностью импульсов может быть использован дельта-сигма модулятор. С увеличением частоты передискретизации улучшается подавление шумов квантования. Быстродействие дельта-сигма ЦАП достигает сотни тысяч отсчетов в секунду, разрядность – 24 бит.

**Интерфейс входных данных.** Первоначально наиболее широко использовался параллельный интерфейс входных данных, обеспечивающий быструю передачу данных и возможность работы с простым протоколом. Однако меньшее число выводов последовательного интерфейса позволяет сократить площадь, занимаемую ЦАП, и монтировать их в малогабаритные корпуса. При этом доля преобразователей с SPI-интерфейсом на рынке намного больше, чем двухпроводных интерфейсов, сопоставимых с интерфейсом I<sup>2</sup>C. К достоинствам трехпроводных последовательных интерфейсов относится и простота изоляции однонаправленных линий передачи данных с помощью оптронов, которые могут быть смонтированы в одном корпусе с ЦАП.

Большинство новых ЦАП работают с однополярным источником питания. Однако при использовании внешнего биполярного транзистора можно получать на выходе двухполярное выходное напряжение.



**Рис.3. Блок-схема ЦАП LTC2630-12**



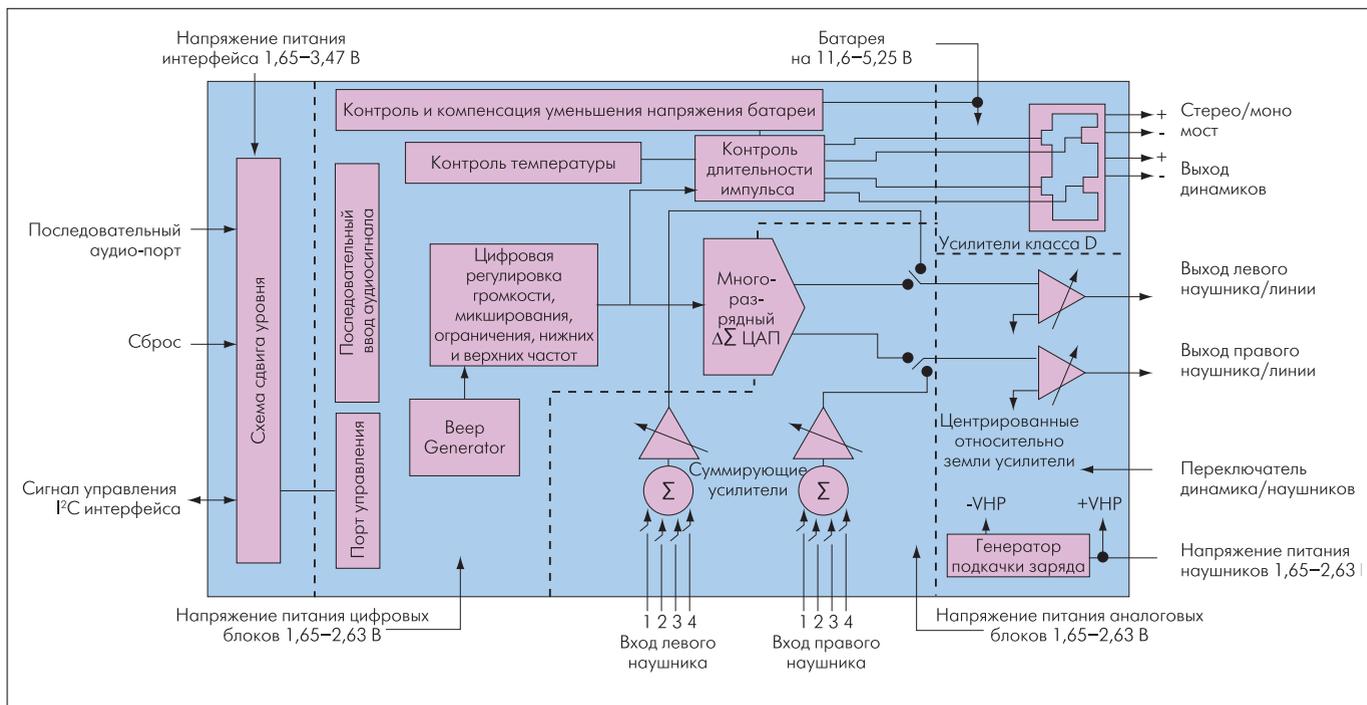


Рис.5. Блок-схема ЦАП CS43L22

Для портативной бытовой техники (медиаплееров, игровых платформ, установочных станций с батарейным питанием, портативных навигационных систем) компания **Cirrus Logic** выпустила 24-бит маломощный стереоЦАП модели CS43L22 с дельта-сигма архитектурой, встроенными выходными каскадами для наушников (мощностью 44 мВт/канал) и усилителем класса D, обеспечивающим подачу на динамики сигнала мощностью 1 Вт/канал.

В микросхему входят модуль цифровой обработки сигнала с функциями регулировки тембра, громкости, переключатель для подключения наушников и громкоговорителей, гибкий тракт передачи сигнала с возможностью транзитной передачи аналогового сигнала (рис.5). Стереоусилитель наушников питается от отдельного источника положительного напряжения, отрицательное напряжение обеспечивает встроенный генератор подкачки заряда. Это позволяет получать сбалансированный относительно потенциала земли выходной сигнал с широким размахом и исключает необходимость применения внешних блокирующих конденсаторов. Усилитель класса D не требует применения внешнего фильтра. Питается он непосредственно от батареи. Встроенный блок контроля и компенсации напряжения источника питания обеспечивает постоянное усиление, несмотря на падение напряжения питания. Встроенный блок контроля температуры предупреждает пользователя о превышении температуры (вследствие перегрузки) безопасной работы и автоматически регулирует или отключает ШИМ-выход громкоговорителя.

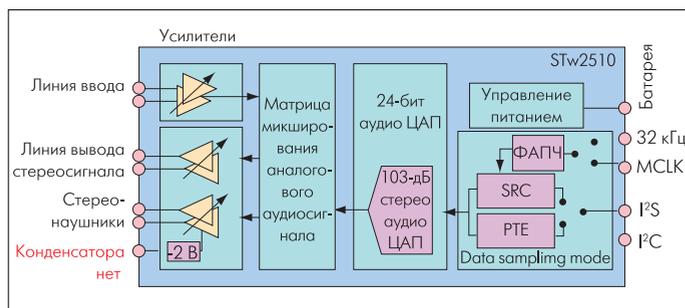
Аналоговый сигнал непосредственно передается усилителю наушников, благодаря чему микросхема может исполь-

зоваться в устройствах с ЧМ-тюнером, требующих передачи эфирного аудиосигнала непосредственно на наушники.

Динамический диапазон микросхемы составляет 98 дБ, суммарные гармонические искажения + шум – 88 дБ. Напряжение питания ядра цифроаналогового преобразователя – 1,8–2,5 В, усилителя класса D – 1,6–5 В, усилителя наушников – 1,8–2,5 В, логики I<sup>2</sup>C-интерфейса – 1,6–3,3 В. При напряжении 1,8 В мощность, потребляемая при передаче аналогового стереосигнала, равна 10 мВт, в режиме воспроизведения с подключенными наушниками – 14 мВт.

Поставляется ЦАП в 40-выводном корпусе QFN-типа. Диапазон рабочих температур – -40...+85°C и -40...+105°C.

В конце 2007 года отделение **AKM Semiconductor** компании Kasei EMD Corporation (AKM) представило микросхему 24-разрядного ЦАП со встроенным выходным усилителем наушников и чрезвычайно малой потребляемой мощностью. ЦАП типа AK4372 входит в семейство изделий компании, выпускаемых под торговой маркой Audio2go и предназначенных для портативных устройств, в том числе мобильных и смарт-телефонов, медиаплееров. Мощность, потребляемая ЦАП совместно с наушниками, в отсутствие выходного сигнала составляет 6,8 мВт при напряжении питания 1,8 В. Минимальное напряжение питания – 1,6 В. Встроенный блок ФАПЧ, помимо стандартных частот мобильных телефонов, обеспечивает синхронизирующие импульсы разрядов (BICK) и полевой синхросигнал (LRCK). Это облегчает синхронизацию ЦАП и процессора без задающего генератора. В микросхеме ЦАП предусмотрены аналоговые и цифровые блоки регулировки громкости наушников, а также возможность работы с внешними источниками входных стерео- и моносигна-



**Рис.6. Блок-схема АП STw5210**

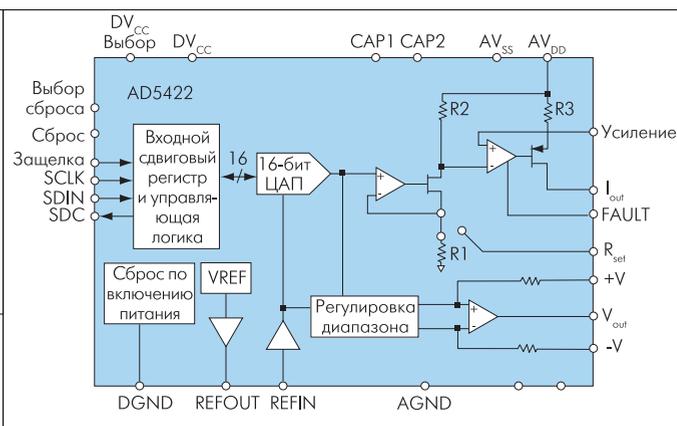
лов. Это обеспечивает микширование сигналов и исключает необходимость применения внешних переключателей. В микросхеме использован I<sup>2</sup>C совместимый интерфейс. Монтируется микросхема АК4372 в 24-выводной корпус с размерами кристалла (2,5×3 мм), который на 61% меньше QNF-корпуса предыдущих 24-разрядных ЦАП АК4370/АК4371.

Интерес представляет 24-разрядный ЦАП с продленным временем воспроизведения записи, выпущенный в начале 2008 года компанией **STMicroelectronics** для устройств воспроизведения музыкальных записей. В микросхеме ЦАП типа STw5210 предусмотрены линейный выход и выход наушников (рис.6). Отношение сигнал-шум составляет 103 дБ во всем диапазоне воспроизведения аудиосигнала. Разработанный компанией блок продления времени воспроизведения (Playback Time Expender – PTE) позволяет сократить потребляемую микросхемой мощность за счет автономного воспроизведения аудиосигнала при подаче тактового сигнала с частотой 32 кГц и работе остальных блоков системы в спящем режиме. В результате время воспроизведения музыкальных записей мобильного телефона может превышать 20 ч без увеличения потребляемой мощности. Мощность, потребляемая микросхемой при воспроизведении, составляет 44 мВт при отношении сигнал-шум 103 дБ и 29 мВт при 94 дБ, мощность в спящем режиме – 1 мкВт. Встроенная программируемая память PTE хранит музыкальные программы длительностью до 100 мс (5120×24 бит стереослов). Тактовая частота микросхемы составляет 13; 19,2; 26 или 38 МГц.

Выходная мощность усилителя наушников, не требующего развязывающего конденсатора, составляет 2×50 мВт на нагрузку 32 Ом и 2×80 мВт на нагрузку 16 Ом. Программируемое усиление усилителя – 66 дБ.

Микросхема STw5210 также содержит блок управления питанием, что облегчает проектирование системы на базе ЦАП, а также обеспечивает прямое подключение к батарее на напряжение 2,7–4,8 В. Напряжение питания схемы – 1,62–3,6 В. По своим параметрам ЦАП STw5210 согласовано с процессорами компании STM семейства Nomadik – STn8810/8815 и соответствующими им схемами управления питанием STw4810/4811.

Выполнена микросхема по 0,13-мкм КМОП-технологии. Монтируется в корпуса с матричным расположением шариковых выводов типа TFBGA40 размером 4×4×1,2 мм с шагом



**Рис.7. Блок-схема ЦАП AD5422**

выводов 0,5 мм и VFPN44 размером 7×7×1 мм с таким же шагом выводов. В третьем квартале 2008 года компания планирует выпустить вариант микросхемы в корпусе WLCSP36 размером 2,6×2,6×0,65 мм с шагом выводов 0,4 мм.

### ЦАП АТАКУЮТ ПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ТЕСТОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В последнее время было представлено немало ЦАП для промышленных систем. Компания **Analog Devices** выпустила четыре высокоточных одноканальных ЦАП, способных работать в неблагоприятных промышленных условиях, в том числе при высоких значениях температуры и напряжения. Это 16-разрядный ЦАП AD5422, работающий с однополярным (12–48 В) и двухполярным ±(12–24) В напряжением питания от встроенного источника с температурным дрейфом 5ppm/°C (рис.7); 12-разрядный AD5412 с токовым входом и выходом по напряжению; 16-разрядный AD5420 и 12-разрядный AD5410, работающие только в токовом режиме (возможны варианты с программируемым выходным током в диапазонах 4–20, 0–20 и 0–24 мА). Общая нерегулируемая погрешность (Total Unadjustable Error – TUE) преобразователей AD5422 и AD5420 составляет 0,1%, AD5412 и AD5410 – 0,3%. Температурный диапазон ЦАП – -40...85°C. Встроенная схема обнаружения неисправностей микросхемы ЦАП AD5422 идентифицирует обрывы и короткие замыкания кабельных прово-

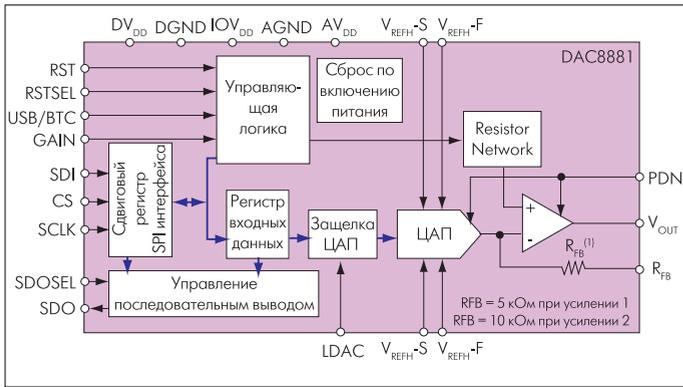


Рис.8. Блок-схема ЦАП DAC8881

дов или удаленных нагрузок. В микросхему входит индикатор превышения температурой допустимого уровня. Для установления выходного напряжения в микросхеме предусмотрен буферный вывод напряжения с возможностью компенсации влияния последовательно включенных резисторов и обмоток возбуждения оборудования. Программируемый прецизионный выходной усилитель микросхемы формирует выходной сигнал, равный по амплитуде напряжению питания. ЦАП допускает работу на емкостные (до 1 мкФ) и индуктивные (до 1 Гн) нагрузки. Все приборы имеют последовательный интерфейс SPI, выполняют сброс по включению питания.

Изготовлены микросхемы по разработанной компанией КМОП-технологии – iCMOS. Поставляются в 24-выводном корпусе типа TSSOP и 40-выводном корпусе размером с кристалл LFCSP.

Одноканальный 16-разрядный буферированный ЦАП с R2R-архитектурой и выходом по напряжению в 2007 году выпустила компания **Texas Instruments** (рис.8). Максимальная интегральная нелинейность преобразователя типа DAC8881 составляет  $\pm 1$  МЗБ, уровень шума –  $24 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , время установления напряжения – 5,0 мкс. Прецизионный усилитель обеспечивает выходной сигнал, равный по амплитуде напряжению питания в диапазоне 2,7–5,5 В, потребляемая мощность – 6 мВт при напряжении питания 5 В и 125 мкВт в спящем режиме. Микросхема содержит программируемый блок сброса по включению питания, последова-

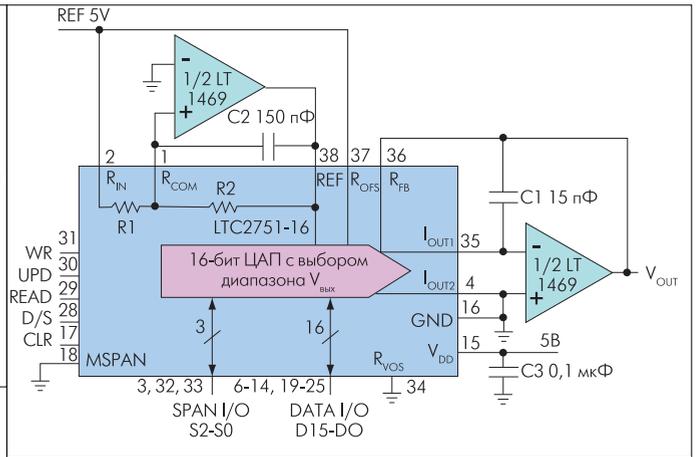


Рис.9. Блок-схема ЦАП LTC2751

тельный 50-МГц SPI интерфейс, совместимый с 1,8-В/3-В/5-В логическими уровнями, что позволяет ему взаимодействовать с микросхемами DSP, FPGA и микропроцессоров. Значение выходного сигнала определяется выбранным внешним источником опорного напряжения в диапазоне 1,25–5,5 В. При использовании внешнего операционного усилителя, для смещения сигнала, возможно получение биполярного выходного сигнала с кодированием дополнительным кодом.

Микросхема работает в расширенном температурном диапазоне от  $-40^\circ$  до  $105^\circ\text{C}$ . Выпускается в корпусе QFN-24 размером 4×4мм. Благодаря своим высоким характеристикам DAC8881 может найти широкое применение в системах управления промышленным оборудованием, автоматическом тестовом оборудовании, системах сбора данных и связанной аппаратуре. В первом квартале 2008 года компания планирует выпустить опытные образцы ЦАП.

Компания **Linear Technology** выпустила семейство маломощных перемножающих 16/14/12-разрядных ЦАП с токовым выходом моделей LTC2751-16, LTC2751-14 и LTC2751-12, соответственно. Семейство предназначено для систем позиционирования, регулировки нулевого смещения и усиления, автоматического тестового оборудования и систем сбора данных. Через параллельный интерфейс задаются шесть диапазонов программно управляемого (SoftSpan) однополярного (0–5 В и 0–10 В) и двухполярного ( $\pm 5$ ,  $\pm 10$ ,  $\pm 2,5$  и  $-2,5$ – $7,5$  В) выхода (рис.9). Программное управление выходом позволяет исключить применение дорогих прецизионных резисторов, блоков усиления, устанавливаемых вручную перемычек. Микросхемы работают от одного источника питания на напряжение 2–5,5 В и имеют монотонную характеристику в коммерческом и промышленном диапазонах рабочих температур ( $0...70^\circ\text{C}$  и  $-40...85^\circ\text{C}$ ). Максимальный потребляемый ток – 1 мкА. Значения интегральной и дифференциальной нелинейности ЦАП LTC2751-16 составляют  $\pm 1$  МЗБ. Время установления – 2 мкс, уровень паразитного выброса – 1 нВ·с.

Монтируются ЦАП в 38-выводные корпуса QFN-типа размером 5×7 мм.

