

Эволюция преобразователей данных компании Analog Devices

Юрий Петропавловский (г. Таганрог)

В статье рассмотрены особенности и эволюция преобразователей данных компании Analog Devices, разработанных в 1969–2007 гг., многие из которых производятся до сих пор.

На протяжении десятилетий компания Analog Devices Inc. (ADI) разрабатывает и производит преобразователи данных высокого класса для самых различных областей применения. Клиенты ADI особо ценят АЦП, ЦАП, кодеки и многофункциональные микросхемы со встроенными преобразователями данных, предназначенные для устройств связи, ответственных промышленных, научных, космических, военных и других специальных приложений. Однако и производители массовой электронной продукции широко применяют преобразователи данной компании. Например, тяготеющие к использованию местных электронных компонентов крупные японские производители потребительской электроники применяют АЦП ADI для преобразователей сигналов ПЗС-датчиков изображения видеокамер высокой чёткости.

В каталогах компании только в категориях АЦП и ЦАП представлены многие сотни типов микросхем. Множество преобразователей данных представлено и в других категориях продуктов, в том числе в категориях компонентов для военных и аэрокосмических приложений. Следует отметить, что целый ряд преобразователей данных компании пользуются популярностью, производятся и представлены в ката-

логах ADI на протяжении многих лет и даже десятилетий. Наиболее значимые и инновационные продукты компании представила на своей «шкале времени» (Timeline), охватывающей период с 1965 по 2007 гг. В предлагаемой статье рассмотрены особенности некоторых АЦП и ЦАП, фигурирующих на Timeline и находящихся в производстве до настоящего времени.

Свои первые АЦП и ЦАП Analog Devices начала производить после приобретения в 1969 г. компании Pastoriza Electronics, лидировавшей тогда в области разработки преобразователей данных и аналоговых компьютеров, и ставшей в результате подразделением ADI. Основными специалистами этой компании были Джеймс Пасториза и доктор Джеймс Ресвик. В 1963 г. Ресвик разработал модульный аналоговый компьютер, предназначенный для обучения студентов технологического института Кейза (г. Кливленд, штат Огайо; в настоящее время – Западный резервный университет Кейза (Case Western Reserve University)). Изготовил этот компьютер выпускник Массачусетского технологического института Джеймс Пасториза, именем которого и была названа компания Pastoriza Electronics [1].

Джеймс Пасториза был изобретателем известного и запатентованного

им четырёхпозиционного переключателя токов (Quad Switch, U.S. Patent 3,747,088). На рисунке 1 показан внешний вид 12-разрядного АЦП последовательного приближения ADC-12U, разработанный подразделением Pastoriza Division of Analog Devices в 1969 г. Модуль Minidac этого АЦП, продававшийся по цене \$800, был построен на основе Quad Switch, схема которого приведена на рисунке 2. К выходной цепи подключаются комбинации из четырёх токов со значениями, кратными 2^n , где $n = 0, 1, 2, 3$. В состав модуля Minidac (см. рис. 3) входят три ячейки Quad Switch (микросхема AD550), тонкоплёночная резистивная матрица (AD850), источник опорного напряжения и инвертирующий операционный усилитель. Для реализации алгоритма последовательного приближения (Successive Approximation Register, SAR) в ADC-12U используются 14 корпусов логики.

1970-е гг. стали одним из наиболее значимых десятилетий в истории развития преобразователей данных. В эти годы АЦП и ЦАП были востребованы в таких отраслях, как промышленные системы управления производством, РЛС с фазированными решётками, медицинское оборудование, индикаторы с векторной и растровой развёртками, вольтметры с высоким разрешением и в других приложениях. В преобразователях ADI того времени использовались различные технологии: монолитная (интегральная), гибридная и модульная. Причём модульные и гибридные АЦП/ЦАП

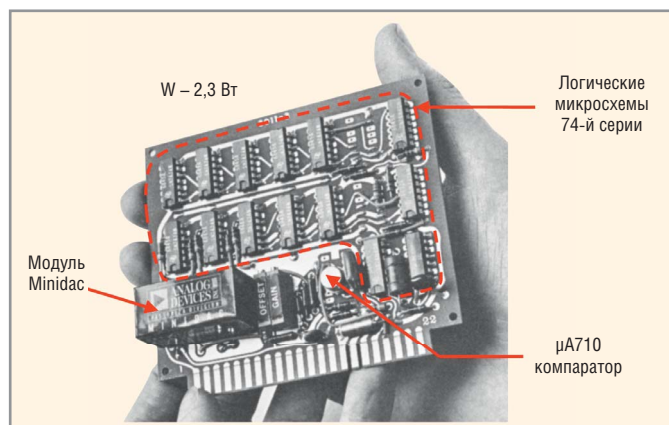


Рис. 1. АЦП ADC-12U

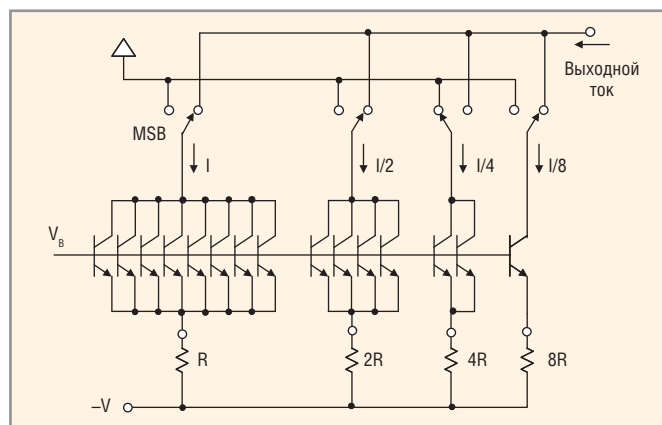


Рис. 2. Четырёхпозиционный переключатель токов

имели бóльшую разрешающую способность и быстродействие по сравнению с монолитными аналогами [2].

Первый монолитный ЦАП AD562, выполненный по биполярной технологии, был разработан ведущим инженером ADI и выпускником MIT Бобом Крейвеном. Микросхема была анонсирована компанией в 1974 г. и представляла собой монолитный компонент (Compound Monolithic), состоящий из двух чипов, смонтированных в одном корпусе. Впоследствии микросхемы выпускались в однокристалльной версии и стали первыми 12-разрядными ЦАП, квалифицированными по стандарту министерства обороны США MIL-M-38510. Для работы ЦАП требовался внешний источник опорного напряжения (0...10 В) и двуполярный источник питания ($\pm 5...15$ В), а также внешние резисторы для регулировки усиления [3].

Первый монолитный АЦП AD571 был разработан в 1978 г. инженером и изобретателем Полом Брока, который до поступления на работу в ADI был независимым консультантом ряда американских радиоэлектронных компаний. 10-разрядный АЦП последовательного приближения AD571 был спроектирован на основе биполярного процесса с использованием тонкоплёночных резисторов и интегральной инжекционной логики (I^2L) со встроенным тактовым генератором, источником опорного напряжения и выходным буфером с тремя состояниями. Микросхема производится в течение многих лет. В 2012 г. выпущена новая редакция спецификации (Data Sheet Rev.B). Статус компонента в каталоге ADI 2016 – «производство». Различные исполнения микросхем AD571S могут работать в диапазоне температур $-55...+125^\circ\text{C}$. Структура микросхемы показана на рисунке 4 [4].

В 1980-е гг. компания разработала аналого-совместимые КМОП-процессы LC^2MOS и $BiCMOS$ II, а также биполярную комплементарную технологию первого поколения, позволившую создать высокоскоростные сопряжённые p-n-p- и n-p-n-транзисторы для драйверов АЦП. В связи с выходом на рынок бытовой электроники проигрывателей компакт-дисков появилась потребность в дешёвых ЦАП для них. Первые ЦАП для CD-проигрывателей (16-разрядный AD1856 и 18-разрядный AD1860), выполненные по технологии $BiCMOS$, были выпущены компанией в 1988 г. В эти годы компания разработала десят-

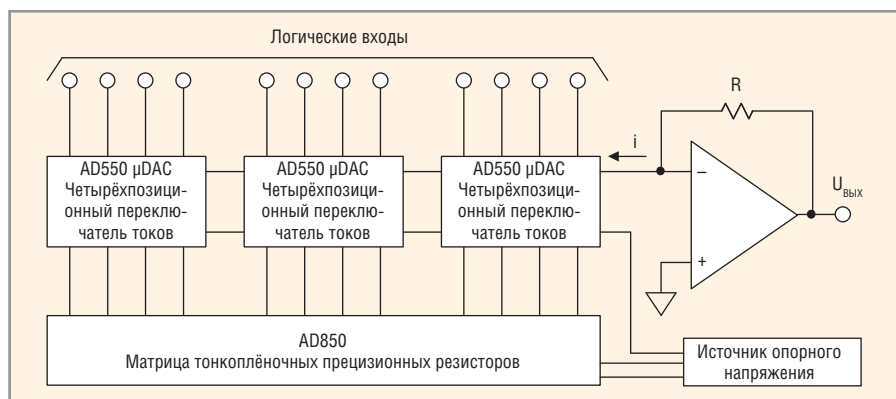


Рис. 3. Модуль Minidac

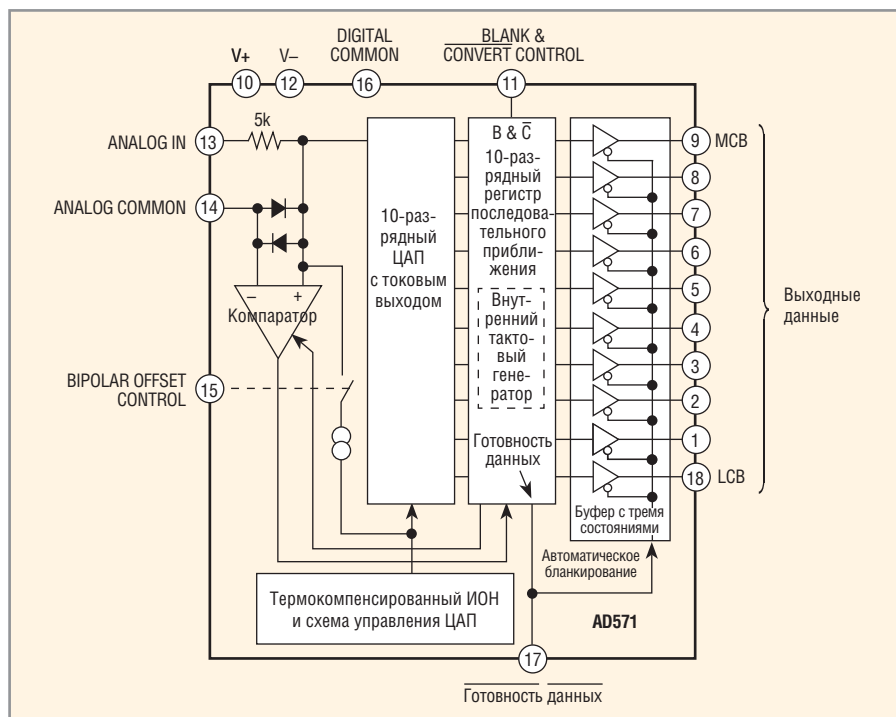


Рис. 4. Структура микросхемы AD571

ки типов АЦП и ЦАП различных структур и назначения. Рассмотрим особенности некоторых успешных преобразователей данных разработки 1980-х гг., представленных в каталогах ADI последних лет.

AD558 (1980 г.) – первый 8-разрядный ЦАП с напряжением питания 5 В, интегрированным ИОН и интерфейсом DACPORT® для прямого подключения к микропроцессорам. Каких-либо дополнительных функциональных компонентов для применения микросхемы не требуется. С момента появления микросхемы и по настоящее время выпущено около десятка исполнений в различных корпусах, в том числе – керамических D-16 (AD558SD/TD, см. рис. 5) для военных и специальных применений с диапазоном рабочих температур $-55...+125^\circ\text{C}$, квалифицированных по военному стандарту MIL-STD-883 в 1997 г.

AD574 (1980 г.) – первый однокристалльный 12-разрядный АЦП с 8/16-разрядными микропроцессорными интерфейсами. Специальные исполнения AD574AS/AT/AU в керамических корпусах D-28 квалифицированы по стандарту MIL-STD-883 и гарантируют точностные параметры во всём диапазоне рабочих температур $-55...+125^\circ\text{C}$.

AD390 (1982 г.) – первый 4-канальный 12-разрядный ЦАП с микропроцессорным интерфейсом. Ошибка линейности $1/2LSB$ и другие точностные параметры микросхемы в диапазоне температур $-55...+125^\circ\text{C}$ обеспечены за счёт заводской лазерной подгонки коэффициентов усиления и напряжений смещения всех каналов микросхемы.

AD7224/26 (1984 г.) – первые 8-разрядные КМОП ЦАП с выходами по напряжению, выполненные по технологии LC^2MOS . Одноканальные AD7224TE/UE выпускаются в керами-



Рис. 5. Микросхема AD558TD

ческих корпусах Q-18 (Cerdip Package) и D-18 (Ceramic Package) для военных и специальных приложений ($\Delta T = -55...+125^{\circ}\text{C}$), четверённые AD7226 – в различных пластиковых и керамических корпусах для промышленных применений с диапазоном рабочих температур $-40...+80^{\circ}\text{C}$.

AD7824/28 (1985 г.) – 4- и 8-канальные быстродействующие (2,5 мкс/канал) 8-разрядные КМОП АЦП с микропроцессорными интерфейсами для промышленных, специальных и потребительских приложений в пластиковых и керамических корпусах DIP, SOIC, SSOP, PLCC, LCCC. Версия спецификации REV.F выпущена в 2003 г.

AD7245 (1987 г.) – первый 12-разрядный КМОП ЦАП с ИОН и выходным усилителем, отличающийся малым временем установления (30 нс). Имеются специальные и промышленные исполнения в керамических корпусах Q-20/24 (DIP), E-28A (безвыводный) и пластиковых DIP-20/24, SOIC-20/24. Версия спецификации REV.B выпущена в 2001 г., в каталоге ADI 2016 г. представлены исполнения AD7245A, статус – «производство».

Рынок преобразователей 1990-х гг. формировался под влиянием бурного развития систем связи, требующих высокопроизводительных АЦП и ЦАП для модемов, сотовых телефонов и беспроводной инфраструктуры. При этом большое внимание уделялось снижению энергопотребления преобразователей, работающих в оборудовании с батарейным питанием. Технология КМОП стала превалировать в преобразователях общего назначения, а BiCMOS применялась для высокопроизводительных устройств. На основе КМОП-технологии в больших масштабах производились преобразователи на основе сигма-дельта архитектуры для голосовых и аудиоприложений. Произошёл и значительный сдвиг в технологических процессах, когда паразитные параметры микросхем стали фактором, ограничивающим производительность высокоскоростных преобразователей.

В предыдущий период гибридные микросхемы, состоящие только из кристаллов и проводов (Chip-and-Wire), имели более высокие параметры быстродействия, чем монолитные. В 1990-х гг. ситуация коренным образом изменилась, технология производства новых монолитных микросхем, размеры кристаллов которых были соизмеримы с размерами корпусов, стала обеспечивать большее быстродействие, чем технология Chip-and-Wire. Преобразователи, выполненные по новым технологиям, обеспечили и увеличившиеся потребности рынка

в микросхемах для обработки сигналов на высоких частотах и с большим динамическим диапазоном. Стала также реализовываться возможность интеграции в одном корпусе с АЦП и ЦАП различных интерфейсов, цифровых фильтров и других функциональных узлов.

Analog Devices в 1990-е гг. разработала многие десятки типов преобразователей, как индивидуальных АЦП и ЦАП, так и многофункциональных микросхем со встроенными преобразователями данных. Некоторые микросхемы компании, разработанные в то время, имели большой успех у производителей самой различной электронной аппаратуры и выпускались на протяжении многих лет. Назовём некоторые инновационные микросхемы этого периода, которые представлены в каталогах компании последних лет.

AD7701 (1990 г.) – 16-разрядный сигма-дельта АЦП с высокой линейностью (погрешность 0,0015%), интегрированной схемой автокалибровки и программируемым ФНЧ. Микросхема отличается крайне низким энергопотреблением (20 мкВт в режиме ожидания) и предназначена для промышленных систем управления, портативных измерительных приборов и удалённых датчиков физических величин. Выходные данные доступны через конфигурируемый последовательный порт, имеющий асинхронный режим, совместимый с UART, и два синхронных режима для работы с микроконтроллерами промышленных систем управления.

AD7710 (1992 г.) – 24-разрядный сигма-дельта АЦП с перераспределением и полнофункциональным входным интерфейсом для схем измерения низкочастотных сигналов. Микросхема имеет два дифференциальных аналоговых входа, один из которых является основным, а другой, как правило, используется для периодического измерения входного сигнала на первом входе. Микросхема отлично подходит для применения в интеллектуальных системах на основе микроконтроллеров и содержит двунаправленный последовательный порт, при помощи которого пользователи могут управлять выбором входных сигналов, регулировать усиление и полярность сигналов.

AD7890 (1993 г.) – 8-канальная система сбора данных с последовательным интерфейсом (её структура показана на рисунке 6). Микросхема содержит: входной 8-канальный мультиплексор несимметричных сигналов, усили-

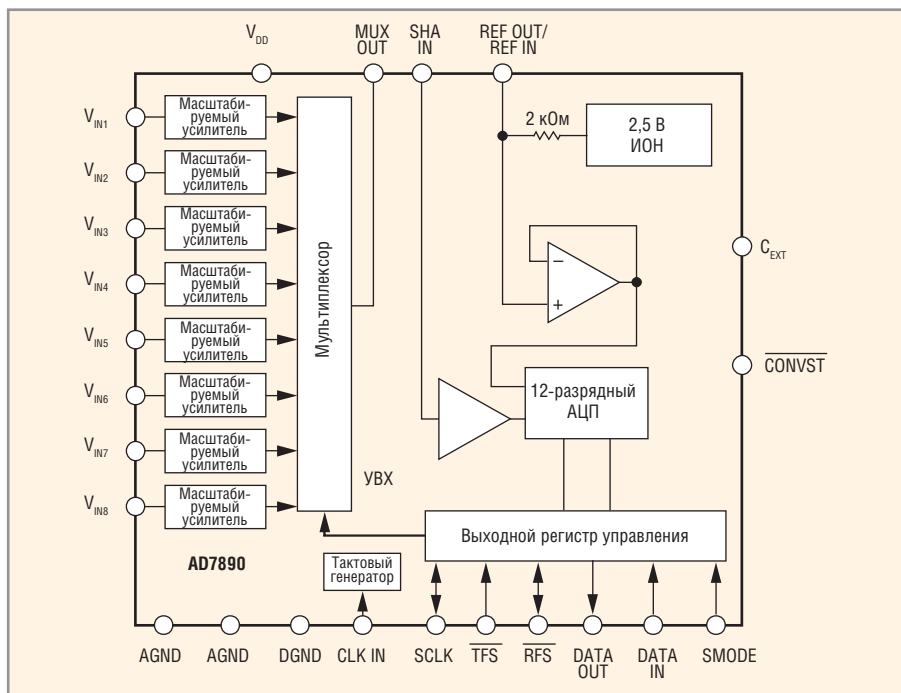


Рис. 6. Структура микросхемы AD7890

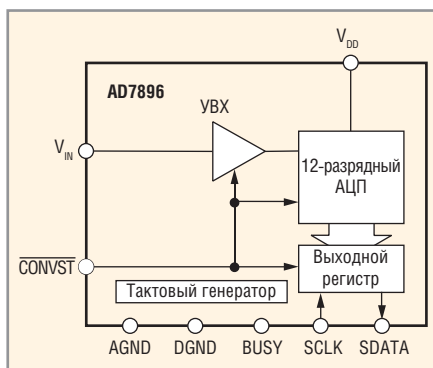


Рис. 7. Структура микросхемы AD7896

тель выборки-хранения, быстродействующий 12-разрядный АЦП с временем преобразования 5,9 мкс, источник опорного напряжения 2,5 В, высокоскоростной последовательный интерфейс. Выпускается в трёх исполнениях, отличающихся диапазоном входных сигналов: AD7890-2 – 0...2,5 В, AD7890-4 – 0...4,096 В, AD7890-10 – ±10 В. Для питания микросхемы используется однополярное напряжение 5 В. Мощность потребления – 50 мВт, в режиме экономии – 75 мкВт.

AD7896 (1994 г.) – 12-разрядный АЦП с внутренней выборкой, частотой преобразования 100 кГц, низким напряжением питания (2,7...5,5 В, $P_{\text{потр}} = 9$ мВт) и высокоскоростным последовательным интерфейсом (см. рис. 7). В микросхеме реализован автоматический режим понижения энергопотребления, в который микросхема входит по завершении преобразования (время преобразования – 8 мкс).

AD8300 (1994 г.) – 12-разрядный ЦАП с последовательным интерфейсом, низким напряжением питания (2,7...5,5 В), потребляемой мощностью 2,6 мВт и разрешением 0,5 мВ/бит (полный размах выходного сигнала составляет 2,0475 В). Области применения микросхемы: сервоуправление, периферия для ПК, цифровые калибраторы.

AD9042 (1995 г.) – быстродействующий (41 MSPS) 12-разрядный АЦП со свободным от искажений динамическим диапазоном 80 дБ (см. рис. 8). Области применения микросхемы: базовые станции мобильной связи, связные радиоприёмники, анализаторы спектра, средства визуализации для медицины.

В 2000-х гг. множество преобразователей компании были реализованы в высокоинтегрированных многофункциональных микросхемах для применения в различной радиоэлектронной аппаратуре, телекоммуникационных системах, промышленных, коммер-

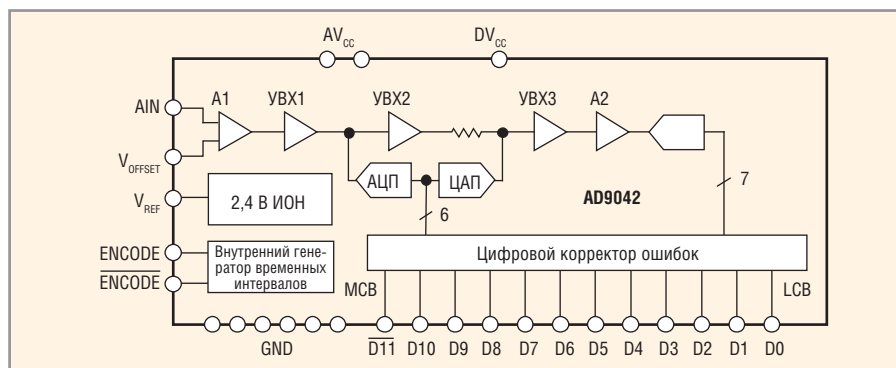


Рис. 8. Структура микросхемы AD9042

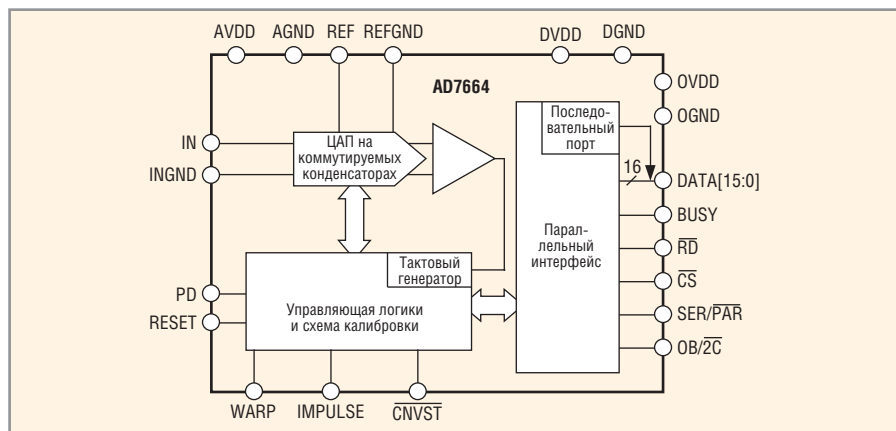


Рис. 9. Структура микросхемы AD7664

ческих и специальных приложениях. Однако, несмотря на это, Analog Devices руководствовалась принципом «разумного разделения» (Smart Partitioning) и выпускала преобразователи с меньшей степенью интеграции, обеспечивающие при этом более высокую производительность и более эффективные ценовые решения конечных систем, чем при использовании концепции система-на-кристалле. В этот период последовательно уменьшались напряжение питания (3,3, 2,5, 1,8 В) и энергопотребление преобразователей. Рассмотрим особенности некоторых микросхем преобразователей 2000-х гг., представленных в каталогах компании последних лет.

Быстродействующие преобразователи данных семейства **PulSAR**[®] (2000 г.) имеют ряд интересных особенностей. В АЦП этого семейства преобразователей последовательного приближения удалось увеличить частоту дискретизации до мегагерцовых значений за счёт применения внутренней коммутации конденсаторов и автоматической калибровки средствами КМОП-логики без применения дорогостоящей тонкоплёночной лазерной подгонки. Первая микросхема семейства PulSAR – 16-разрядный АЦП последовательного

приближения AD7664 – обеспечивает производительность до 570 kSPS (киловыборок в секунду). Структура микросхемы показана на рисунке 9. Микросхема характеризуется высокой линейностью (INL не более ±2,5 LSB / 0,0015% от полной шкалы), высоким отношением сигнал/шум (90 дБ) и малыми искажениями (THD = –100 дБ на частоте 45 кГц). Диапазон аналоговых входных сигналов – 0...2,5 В, потребляемая мощность – 115 мВт (снижается до 21 мкВт при частоте выборок 100 SPS). Микросхемы рассчитаны на промышленный диапазон рабочих температур –40...+85°C.

В состав семейства PulSAR входит более трёх десятков микросхем с различными конфигурациями входов, числом разрядов (14, 16, 18) и производительностью (100–1000 kSPS и более):

- с биполярными входами (AD7951, AD7612/71);
- с дифференциальными биполярными входами (AD7952, AD7634);
- с униполярными входами (AD7651/50/53, AD7660/52/67, AD7661/64/66);
- с дифференциальными униполярными входами (AD7675/76/77, AD7621/22/23, AD7678/79/74, AD7641/43);
- многоканальные с униполярными входами (AD7654/55).

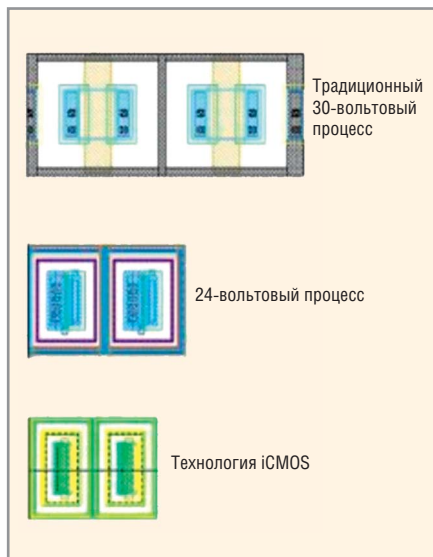


Рис. 10. Размеры транзисторов на кристаллах

Микросхемы семейства PulSAR нашли применение в таких областях, как анализаторы спектра, медицинские приборы, измерительная техника, системы управления процессами, компьютерные томографы, сигма-дельта преобразователи, высокочастотные системы сбора данных.

AD5764 (2004 г.) – 16-разрядный 4-канальный ЦАП высокой точности с последовательным интерфейсом и биполярными выходами, выполненный по технологии iCMOS (Industrial CMOS). Данная технология существенно изменила ситуацию на рынке компонентов для промышленной электроники и автоматики (компания ADI называет iCMOS прорывной технологией).

Устройства и микросхемы, используемые в промышленности, зачастую работают в условиях значительных электромагнитных помех от различного оборудования. Для повышения помехоустойчивости необходимо увеличивать размах полезного сигнала и, соответственно, напряжение питания микросхем, а также размеры транзисторов на кристалле. Технология iCMOS позволяет изготавливать микросхемы с напряжением питания до 30 В, оставаясь при этом в субмикронном диапазоне технологических норм. На рисунке 10 показаны размеры транзисторов, выполненных по традиционным BiCMOS-технологиям в сравнении с iCMOS. Кроме МОП-транзисторов на кристаллах iCMOS возможно создание и комбинированных биполярных транзисторов (также с повышенным рабочим напряжением). При этом обеспечивается высокая плотность расположения элементов

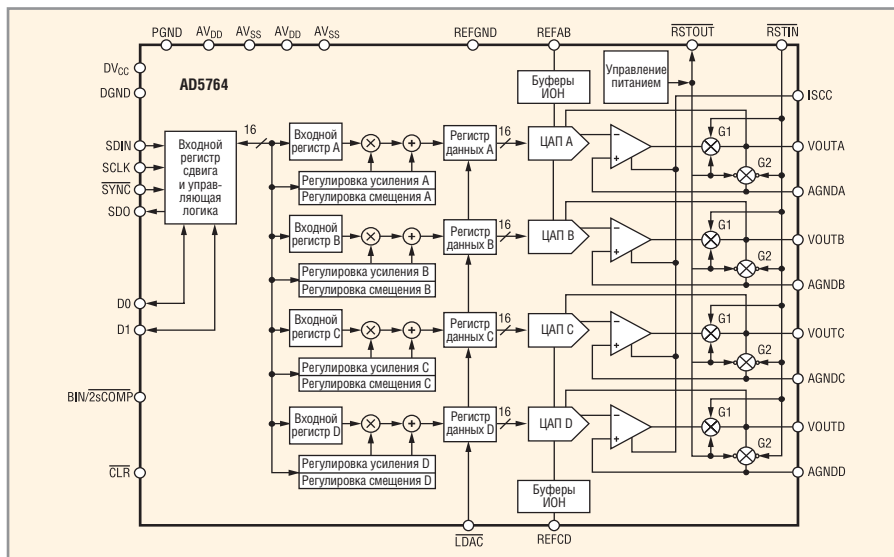


Рис. 11. Структура микросхемы AD5764

и возможность создания автономных модулей на одном кристалле с оптимальными для конкретных задач параметрами. В частности, возможно совмещение современной логики с высоковольтными аналоговыми модулями.

Технология iCMOS позволяет создавать 12–16-разрядные АЦП с программно переключаемыми входами, допускающими работу с уровнями $\pm(2,5...10)$ В. При этом их энергопотребление на 70...85% меньше, чем у микросхем, выполненных по более ранним технологиям. Значительно ниже (до 80%) и сопротивление открытых каналов iCMOS мультиплексоров (3...4 Ом) [5].

Технология iCMOS позволяет создавать полностью изолированные модули на одном кристалле с различными напряжениями питания, а также самые различные компоненты: подстраиваемые резисторы, конденсаторы, диоды, полевые и биполярные транзисторы различных типов, ячейки памяти (ПЗУ). Например, в микросхему AD5764 (её структура показана на рисунке 11) входят четыре 16-разрядных ЦАП ($f_s = 1,25$ МГц, время установления – 8 мкс) на одном кристалле, регистры, драйверы с выходами по напряжению, регулируемые усилители, ИОН, схема управления питанием и входные регистры. Для работы микросхемы используются два напряжения питания: ± 15 и 5 В. При этом полная шкала выходного напряжения составляет ± 10 В. Микросхема выпускается в исполнениях для промышленных, военных и аэрокосмических приложений.

AD732x, AD765x (2004 г.) – многоканальные АЦП с биполярным входом и числом разрядов 12 плюс знаковый разряд (AD732x) и 16 плюс зна-

ковый разряд (AD765x), рассчитанные на входные напряжения $\pm 2,5...10$ В (технология iCMOS). Микросхемы серии AD732x отличаются числом каналов: два канала (AD7321/22), четыре канала (AD7323/24), восемь каналов (AD7327/28/29) и производительностью (500/1000 kSPS). На рисунке 12 показана структура микросхемы AD7327.

Микросхемы этих серий представляют собой АЦП последовательного приближения с поддержкой однополярных и двуполярных входных напряжений. Диапазон входных сигналов из значений $\pm 10, \pm 5, \pm 2,5$ или $0...10$ В выбирается программно и независимо для каждого канала. Схемные решения в части программируемого выбора входного диапазона сигналов, применённые в микросхемах, защищены патентом (U.S. Patent №6,731,232, автор изобретения Томас Паул Керни). Исполнения микросхем с окончанием EP (AD7321-EP...) предназначены для военных и аэрокосмических приложений.

AD9228, AD9219 (2005 г.) – четырёхканальные 12- и 10-разрядные преобразователи аналоговых сигналов в последовательные цифровые сигналы формата LVDS 1,8 В. Микросхемы отличаются низким энергопотреблением (119...94 мВт на канал) при производительности 65 MSPS, высокой линейностью и широкой полосой пропускания (315 МГц на большом сигнале). Питание цифровой и аналоговой частей микросхем осуществляется от источников напряжением 1,8 В. Сферы применения микросхем – медицинское оборудование, портативные ультразвуковые системы, радиоприёмники различных типов, портативные измерительные приборы.

AD7980, AD7982 (2006 г.) – 16- и 18-разрядные АЦП последовательного приближения серии PulSAR с производительностью 1 MSPS и низким энергопотреблением (7 мВт), выполненные в миниатюрных корпусах MSOP/LFCSP/QFN размерами 3 × 3 мм. Для питания микросхемы используется один источник – 2,5 В. При использовании дополнительно источника питания обеспечивается совместимость с логикой 1,8 / 2,5 / 3 / 5 В. Исполнение AD7980-EP предназначено для военных и аэрокосмических приложений.

AD7356 (2006 г.) – двоясненный 12-разрядный АЦП последовательного приближения с дифференциальным входом и одновременной выборкой. Микросхема обеспечивает производительность 5 MSPS при потребляемой мощности 36 мВт. Структура микросхемы показана на рисунке 13. Сфера применения – системы сбора данных, управление движением, квадратурная демодуляция.

AD7766/AD7766-1/AD7766-2 (2007 г.) – высококачественные 24-разрядные АЦП последовательного приближения с избыточной дискретизацией, большим динамическим диапазоном (115 дБ / 32 kSPS для AD7766-2) и широкой полосой пропускания (см. рис. 14). Микросхемы характеризуются высоким быстродействием (128 / 64 / 32 kSPS) и низкой потребляемой мощностью (8,5 мВт / 32 kSPS для AD7766-2). Другие особенности и параметры:

- интегрированный КИХ-фильтр нижних частот с линейной фазовой характеристикой, неравномерность в полосе пропускания ±0,005 дБ, ослабление в полосе непрозрачности 100 дБ;
- напряжение питания 2,5 В, питание логического интерфейса 1,8 / 2,5 / 3 / 3,6 В;
- малый температурный дрейф нуля (15 нВ/°C) и коэффициента усиления (0,4 ppm/°C);
- конфигурируемый интерфейс передачи данных с синхронизацией нескольких устройств или объединение нескольких устройств в цепочку;
- диапазон рабочих температур –40...+105°C.

Области применения микросхем: малопотребляющие системы сбора данных с интерфейсами PCI/USB, малопотребляющие беспроводные системы сбора данных, анализ вибраций, измерительная техника, прецизионные медицинские исследования.

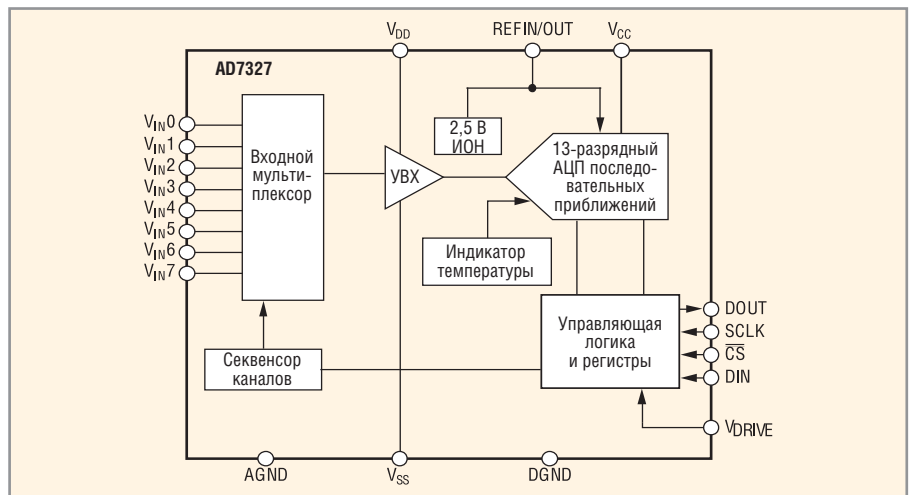


Рис. 12. Структура микросхемы AD7327

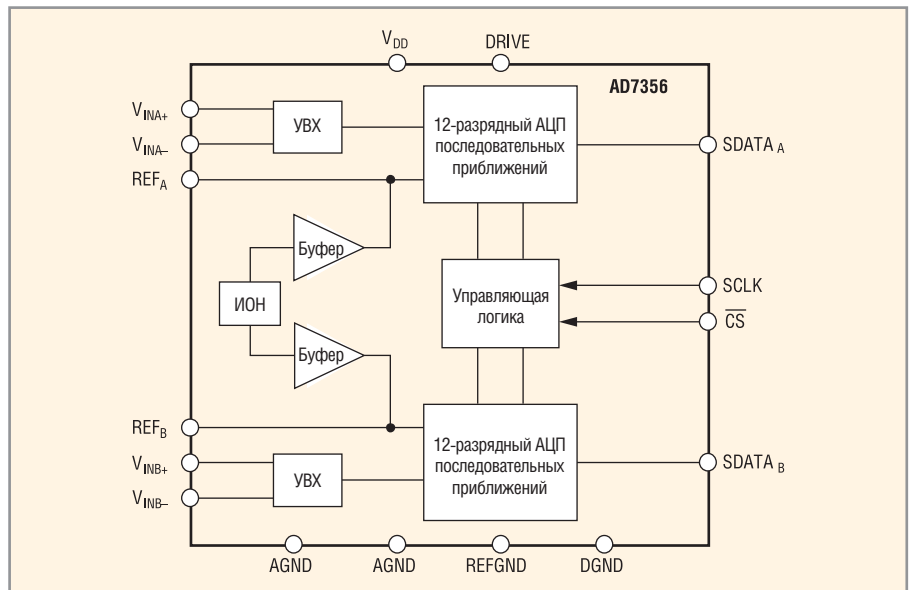


Рис. 13. Структура микросхемы AD7356

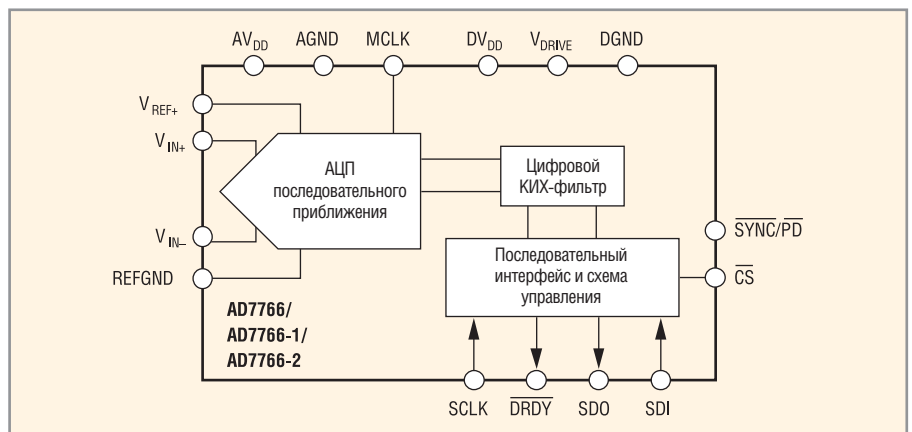


Рис. 14. Структура микросхемы AD7766

ЛИТЕРАТУРА

1. www.analogfootsteps.blogspot.ru/2014/01/a-personal-analog-computer-story.html.
2. *Walt Kestler. The Data Converter Handbook.* Analog Devices Inc. 2005.
3. www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-06/Chapter%201%20Data%20Converter%20History%20F.pdf.
4. Analog Dialogue. Volume 8. №2. 1974. www.analog.com/library/analogDialogue/cd/vol8n2.pdf#page=3.
5. Analog Dialogue. Volume 12. №1. 1978. www.analog.com/library/analogDialogue/cd/vol12n1.pdf.
6. www.analog.com/en/education/education-library/articles/icmos-breakthrough-industrial-sector-electronics.html.