

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ЦАП

БОРЬБА НА РЫНКЕ КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ УСИЛИВАЕТСЯ

М. Гольцова

Все большее распространение широкодиапазонных программируемых приемников (software radios) сигналов с несколькими несущими и прямых ПЧ-трансиверов побуждает поставщиков непрерывно совершенствовать входные аналоговые блоки и преобразователи данных. Для цифроаналоговых преобразователей это, помимо улучшения параметров по переменному току, шумовых и динамических характеристик, означает повышение разрешения, скорости восстановления выходного сигнала в широком диапазоне частот. И все это без увеличения потребляемой мощности устройства. К тому же, для сокращения числа компонентов системы желательно повышать функциональную сложность ЦАП чипа, не изменяя или даже уменьшая его площадь. Решение этих задач никогда не было простым, а со временем только усложняется. Тем не менее, на рынке постоянно появляются ЦАП с новыми архитектурами, выполненные по усовершенствованным КМОП- и БиКМОП-технологиям и отвечающие непрерывно растущим требованиям беспроводных систем связи.

Число потребителей разнообразных средств связи стремительно растет, тогда как частотный диапазон остается ограниченным. Удержаться на этом рынке могут лишь поставщики элементной базы, обеспечивающей высокое качество синтезируемых сигналов за счет совершенствования методов модуляции и использования схем цифровой обработки сигнала. И здесь важную роль играют преобразователи сигнала, одно из основных требований к которым – улучшение динамических характеристик при одновременном снижении стоимости. При этом необходимо не просто снижать цену самой микросхемы, но и сокращать затраты, влияющие на ее ко-

нечную стоимость. Добиться этого можно за счет облегчения и уменьшения затрат на разработку системы, создания функционально более сложных устройств. Для решения этих задач разработчики ЦАП пошли по пути создания устройств с встроенным цифровым интерполяционным фильтром, позволяющим упростить конструкцию аналогового конструкционного фильтра; применения встроенного умножителя тактовой частоты с фазовой автоподстройкой (ФАПЧ-умножитель), благодаря чему в системе может быть использован более дешевый внешний генератор тактового сигнала. К тому же, наличие такого встроенного умножителя облегчает выполнение требований по электромагнитной совместимости. Тенденция к созданию многоканальных систем связи с несколькими несущими стимулирует разработку ЦАП, поддерживающих квадратурную модуляцию сигнала. Практически все последние микросхемы ЦАП для средств коммуникации выполнены с сегментированной архитектурой на источниках тока, обеспечивающих высокую точность установления сигнала. И еще одна характерная особенность – ЦАП одного семейства полностью разъемосовместимы, что существенно облегчает их "ввод" в новые системы. Немаловажное значение имеют и такие факторы, как наличие режима энергосбережения и монтаж в малогабаритный корпус.

Развиваются и новые классы однокристалльных изделий, представляющих собой законченные устройства, заменяющие несколько микросхем. К ним в первую очередь относятся прямые цифровые синтезаторы частоты – DDS, отличающиеся от предшественников – синтезаторов с ФАПЧ – простотой фазовой и частотной модуляции несущей частоты, обеспечением заданного значения фазы, отсутствием разрыва фазы, быстрым установлением сигнала и высоким разрешением установки параметров. Правда, в сравнении с DDS, более дешевые синтезаторы с ФАПЧ потребляют меньшую мощность, уровень шумов их намного ниже (до –120 дБ) и они позволяют синтезировать частоты до нескольких гигагерц. Частота синтезируемого сигнала прямых синтезаторов, как правило, равна 0,4 частоты преобразования ЦАП. Основные области применения прямых синтезаторов – стационарные станции сотовых систем, кабельные модемы, системы связи CDMA, SSFH и SSDS-формата.

Чтобы облегчить решение этих задач, ведущие производители (Analog Devices, Burr-Brown, Intersil, Maxim Integrated Products) для оценки качества ЦАП, предназначенных для коммуникационных систем, ввели такие специальные параметры, как

SFDR – свободный от паразитных составляющих динамический диапазон,

CNR – отношение сигнал/шум на частоте несущей,

IMD – коэффициент интермодуляционных искажений,

ACPR – коэффициент развязки соседних каналов по мощности.

Несомненный лидер, задающий тон на рынке АЦП, – фирма **Analog Devices Inc. (ADI)**. Летом 1999 года компания выпустила

14-разрядный ЦАП нового поколения семейства дешевых быстродействующих преобразователей TxDAC с избыточной дискретизацией – AD9772. Он может работать с частотой выборки на входе 150 Msps (Мвыборок/с), на выходе – 300 Msps, его рассеиваемая мощность – 150 мВт. SFDR и CNR нового ЦАП были улучшены более чем на 6 дБ по сравнению с предыдущими устройствами семейства и равны, соответственно, 75 дБ на 26 МГц и 70 дБ в 25-МГц полосе. Выходной ток полной шкалы изменяется в пределах 2–20 мА. Рассеиваемая мощность ЦАП составляет 205 мВт, в режиме энергосбережения – 13 мВт. По значению ACPR в WCDMA-режиме (74 дБ) ЦАП вполне соответствует требованиям сотовых систем третьего поколения.

AD9772 способен полностью реконструировать форму сигнала с динамическим диапазоном до 63,3 МГц. Правда, при этом точность по постоянному току средняя – типичные значения интегральной и дифференциальной нелинейности равны ± 4 и ± 3 LSB (младший значимый бит), соответственно.

Преобразователь выполнен по 0,35-мкм КМОП-технологии. Чип содержит ядро TxDAC, двукратный интерполяционный фильтр, ФАПЧ-умножитель тактовой частоты (до 400 МГц), буфер тактовой частоты дифференциального входа, 1,2-В источник опорного напряжения и схему энергосбережения (рис. 1). При работе в полосе частот модулирующих каналов интерполяционный фильтр выполняет функцию ФНЧ, обеспечивая удвоение частоты преобразования и затухание 73 дБ в полосе подавления. При использовании в прямых ПЧ-системах фильтр может быть реконфигурирован и выполнять функцию "заполнения нуля". В этом случае частота обновления повышается в два раза, а $\sin(x)/x$ проходит через ноль с частотой $4f_{\text{так}}$. В результате сигнал полосы пропускания отсекается, а уровень сигнала на более высоких промежуточных частотах зеркальной боковой полосы возрастает. И как следствие, частота выходного сигнала широкополосного ЦАП с сегментированной архитектурой на источниках тока может превышать 120 МГц. Умножитель частоты в два/четыре раза обеспечивает все тактовые сигналы, необходимые цифровому фильтру и ЦАП.

Монтируется ЦАП в 48-выводной корпус типа TQFP. Диапазон рабочих температур преобразователя – от -40 до $+85^\circ\text{C}$. Цена в партии 1 тыс. шт. – 32,18 доллара.

В 2000 году фирма выпустила ЦАП следующего поколения семейства TxDAC – 16-разрядный AD9777 со скоростью преобразования данных на входе 160 Msps. Сдвоенный ЦАП предназначен для многоканальных беспроводных систем связи с квадратурной модуляцией, требующих точного соответствия параметров обоих каналов. Поэтому для синфазных/со сдвигом фазы на 90° (I/Q) сигналов

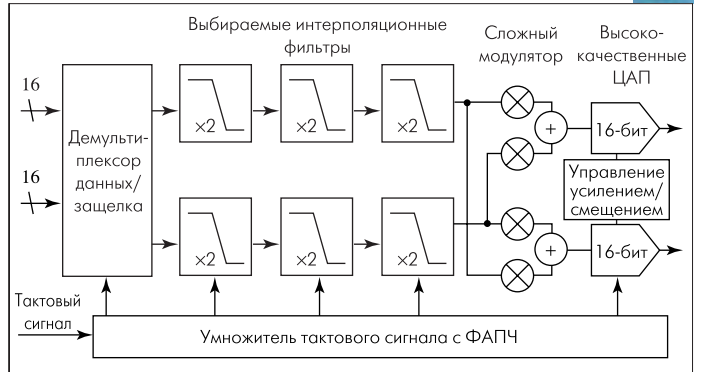


Рис.2. Функциональная блок-схема 16-разрядного усилителя AD9777

в ЦАП предусмотрены два независимых двух-/четырёх-/восьмикратных (по выбору) фильтра, рассчитанных на половину полосы пропускания (рис.2). В микросхеме также входит цифровой квадратурный модулятор. В сочетании с внешним аналоговым квадратурным модулятором он обеспечивает затухание в боковой полосе подавления 30–40 дБ при усилении сигнала канала пропускания на 3 дБ. И это не единственные достоинства нового ЦАП: по сравнению с устройствами предыдущих поколений интермодуляционные искажения снижены на 3–5 дБ, а фазовый шум – на 12 дБ. Значение SFDR в полосе 2–35 МГц равно 75 дБ, ACPR на промежуточной частоте 16,25 МГц – 73 дБ, дифференциальная нелинейность при разрешении 16 бит – ± 1 LSB. ФАПЧ-умножитель генерирует требуемый тактовый сигнал на частоте до 400 МГц. Если необходим внешний прецизионный источник тактового сигнала, умножитель блокируется, а тактовый импульс на требуемой частоте поступает через расположенный на чипе программируемый делитель. В ЦАП предусмотрен и встроенный 1,2-В источник опорного напряжения. Работает ЦАП от однополярного напряжения 3,0 В и потребляет около 800 мВт.

AD9777 может работать и в прямом режиме ПЧ – на частоте 70 МГц и выше. Это позволяет упростить блок преобразования частоты и тем самым снизить стоимость беспроводной системы связи.

Фирма доказала возможность размещения двух хорошо согласованных широкополосных ЦАП с высоким разрешением на одном КМОП-чипе. Для достижения приведенных параметров потребовалась реконфигурация переключающих ячеек ЦАП с сегментированной архитектурой на источниках тока, улучшение емкостной связи и увеличение скорости переключения транзисторов схемы.

Монтируется AD9777 в 68-выводной корпус LQFP-типа. Массовое производство запланировано на лето 2001 года.

Но это не все. Перспективный план развития быстродействующих преобразователей семейства TxDAC фирмы ADI предусматривает снижение их минимального уровня шума, фазового шума и интермодуляционных искажений. В соответствии с этим планом фирма выпустила вариант 14-разрядного ЦАП AD9772A для реконструкции сигналов с чрезвычайно большим динамическим диапазоном (до 67,5 МГц). Минимальный уровень шума и фазовый шум ЦАП по сравнению с предыдущим 14-разрядным ЦАП семейства TxDAC снижены на 6 и 6–8 дБ, соответственно, а стойкость к интермодуляционным искажениям улучшена на 10 дБ. В результате плотность спектрального шума составляет 153 дБс/Гц. К тому же, значение ACPR увеличено на 8 дБ, а скорость преобразования входных данных равна 160 Msps. Новый вариант ЦАП совместим с предшествующим преобразователем AD9772 и не отличается от него по цене. Он предназначен для GSM, WDMA, IS-195 и IS-196 систем.

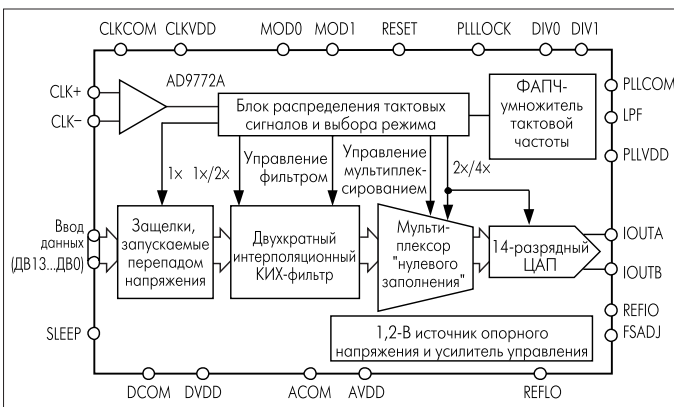


Рис.1 Функциональная блок-схема 14-разрядного 150-Msps фильтра AD9772

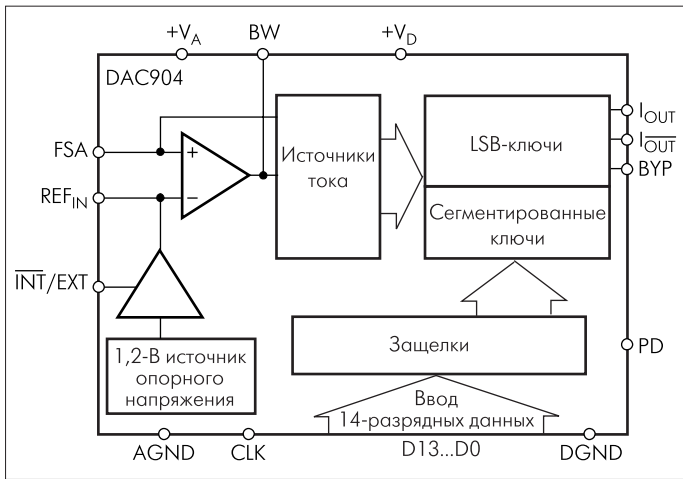


Рис.3. Блок-схема 14-разрядного ЦАП фирмы Burr-Brown типа DAC904

Пока все ЦАП фирмы ADI изготавливаются по 0,35-мкм технологии. Очевидно, эта технология будет господствовать на производственных линиях компании до конца 2001 года. Но стремление снизить напряжение питания и потребляемую мощность, не говоря об улучшении всех рабочих характеристик, заставляет разработчиков готовиться к переходу в конце 2001 года к 0,25-мкм технологии.

Приобретя компанию Burr-Brown, Texas Instruments* получила доступ к технологии совершенных ЦАП и теперь намерена перейти к созданию многоканальных преобразователей для систем связи с квадратурной модуляцией. В начале 2001 года фирма планирует освоить производство

10-, 12- и 14-разрядных двухканальных ЦАП. Разрабатывается 14-разрядное устройство с четырехкратным интерполяционным фильтром. Скорость вывода данных – 400 Msps. Частота выходного сигнала такого преобразователя будет лежать в диапазоне 70–100 МГц.

Пока единственный 14-разрядный ЦАП со скоростью преобразования 200 Msps, выпускаемый Texas Instruments для стационарных станций сотовых систем, – это DAC904 семейства SpeedPlus фирмы Burr-Brown (рис.3). Значение SFDR этого преобразователя с усовершенствованной сегментированной архитектурой на источниках тока равно 67 дБ для одно- и многотональных сигналов при частоте выборки на входе 100 Msps и частоте выходного сигнала 20 МГц. DAC904 имеет высокоимпедансный токовый выход (200 Ом) на номинальное значение тока 20 мА. С помощью внешнего резистора выходной ток полной шкалы можно регулировать в пределах 2–20 мА без ухудшения динамических характеристик ЦАП. Другие достоинства преобразователя: низкая энергия выброса (глитч) – 3 пВс, наличие дифференциальных токовых выходов, встроенного 1,2-В источника опорного напряжения, управляемых перепадом напряжения защелок на входе, режим энергосбережения (потребляемая мощность всего 45 мВт), возможность работы

при напряжении 2,7–5,5 В (потребляемая мощность при +5 В равна 170 мВт) и подключения внешнего источника опорного напряжения. ЦАП изготовлен по 0,5-мкм КМОП-технологии, монтируется в корпуса типа SO-28 и TSSOP-28.

Помимо цифровых систем связи DAC904 может быть установлен в генераторах сигналов специальной формы, медицинском УЗИ-оборудовании, быстродействующей контрольно-измерительной аппаратуре, цифровых видео- и ТВ-системах.

Следующий шаг Texas Instruments – создание вариантов ЦАП с более высоким быстродействием, лучшими динамическими характеристиками и шумовыми параметрами.

Интересы фирмы Intersil сосредоточены на рынке цифровых радиосистем для глобальных систем связи. Этим и определяются направления разработки ЦАП. В портфеле фирмы 12- и 14-разрядные ЦАП семейства CommLink с частотой выборки на входе 130 Msps, высокими значениями SFDR при 100 Msps (63 дБс при частоте выходного сигнала 20,2 МГц для старшей модели H15960), потребляемой мощностью 175 мВт при напряжении питания 5 В и максимальным выходным током полной шкалы 20 мА. ЦАП фирмы, как и других поставщиков, имеют сегментированную архитектуру на источниках тока. Изготавливаются микросхемы семейства по 0,5-мкм КМОП-технологии. Во всех ЦАП предусмотрена разъемо-

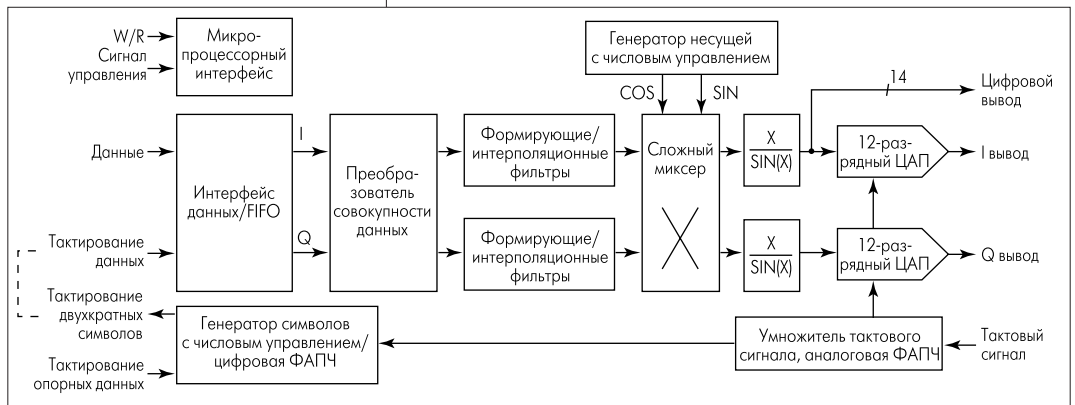


Рис.4. Блок-схема широкополосного программируемого модулятора HSP50415

совместимость с будущими моделями.

Преобразователи первого поколения рассчитаны на применение в узкополосных системах с одной несущей. Чтобы попасть на рынок систем, работающих с несколькими несущими и в разных стандар-

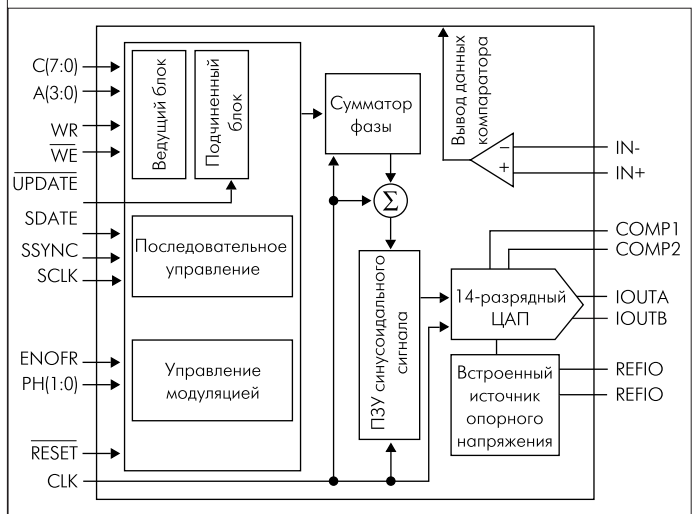


Рис.5. Блок-схема автономного прямого цифрового синтезатора частоты ISL5314

*ЭЛЕКТРОНИКА; НТБ, 2000, №5, с.74.

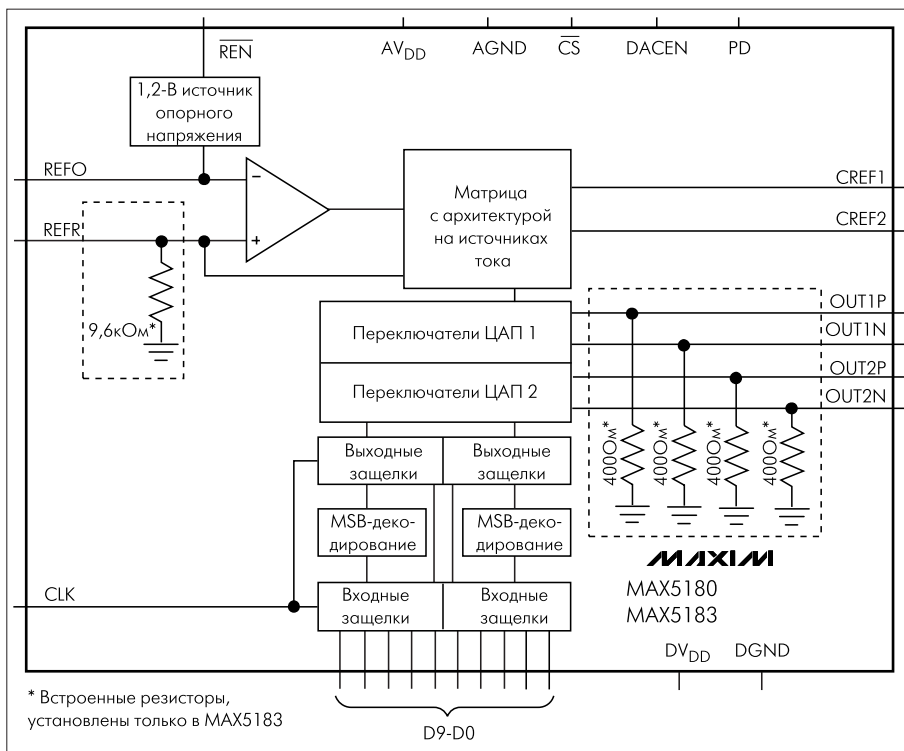


Рис.6. Функциональная блок-схема 10-разрядный ЦАП MAX5180/MAX5183

тах, частота выборки разрабатываемых ЦАП следующих поколений должна быть увеличена вдвое. Необходимо также улучшить SFDR и динамические характеристики в полосе частот сотовых систем. И, конечно, в этих новых быстродействующих ЦАП предусмотрены встроенные интерполяционные фильтры. Первые устройства второго поколения должны появиться в первой половине 2001 года. Вынашивается и идея размещения двух согласованных преобразователей на одном чипе.

Intersil предлагает также широкополосный программируемый модулятор HSP50415 для средств цифровой модуляции, используемых в беспроводных системах. Этот чип объединяет 12-разрядный двухканальный ЦАП, формирующие и интерполяционные фильтры, сложный модулятор и генераторы синхронизации и несущей с числовым управлением (рис. 4). В схему модулятора входят и $x/(\sin x)$ фильтры компенсации ослабления сигнала $(\sin x)/x$.

Микросхема принимает квадратный программируемый поток данных (программируемая частота ввода символов – до 25 Msps) и выводит модулированный квадратный поток данных с частотой до 100 Msps. Центральная частота несущей может быть задана в диапазоне 0,025 Гц–50 МГц. Вносимый системой или ЦАП разбаланс усиления I/Q-каналов корректируется схемой до вывода сигнала. При частоте вывода 100 Msps SFDR модулятора превышает 70 дБ, максимальный выходной ток полной шкалы равен 20 мА, напряжение питания – 3,3 В. Благодаря объединению генератора несущей с числовым управлением и I/Q-формирующих КИХ-фильтров

соотношение частот выборки на входе и выходе может быть нецелочисленным или переменным. Цифровой модулятор фактически выполняет функции квадратурного амплитудного модулятора и преобразователя с повышением частоты в одном лице. HSP50415 предназначен для преобразования частоты полосы прямой передачи в ПЧ в многоканальных радиостанциях и поддерживает форматы квадратурной фазовой манипуляции, 16–256 квадратурной аналоговой манипуляции и квадратурной импульсной модуляции. Основные достоинства HSP50415 – существенное сокращение времени проектирования и стоимости системы, а также сроков выпуска ее на рынок. Поставляется микросхема в 100-выводном плоском корпусе типа MQFP.

Опыт конструирования быстродействующих ЦАП с высоким разрешением позволил фирме Intersil создать и сложный цифровой синтезатор частоты. В КМОП-микросхему синтезатора типа ISL5314 входят 48-разрядный программируемый генератор несущей с числовым управлением, 14-разрядный 125-Msps ЦАП, компаратор и интерфейсы

параллельного и последовательного управления (рис.5). Параллельный интерфейс предназначен только для ввода восьми разрядов центральной частоты и частоты смещения, последовательный асинхронный интерфейс – для загрузки 40-разрядных данных настройки частоты. На тактовой частоте 125 МГц и частоте выходного сигнала 25 МГц SFDR равен 75 дБс, потребляемая мощность не превышает 500 мВт при напряжении питания 3 В. Точность синтезатора ISL5314 – 0,4 мкГц. Поставляется ISL5314 в 48-выводном плоском корпусе LQFP-типа.

Не осталась в стороне от разработок ЦАП для широкополосных систем со многими несущими фирма **Maxim Integrated Products**, поставившая перед собой задачу создать быстродействующие устройства с высоким разрешением и малой потребляемой мощностью. Сейчас фирма выпускает 8- и 10-разрядные ЦАП серии MAX518x с частотой выборки 40 Msps и потребляемой мощностью

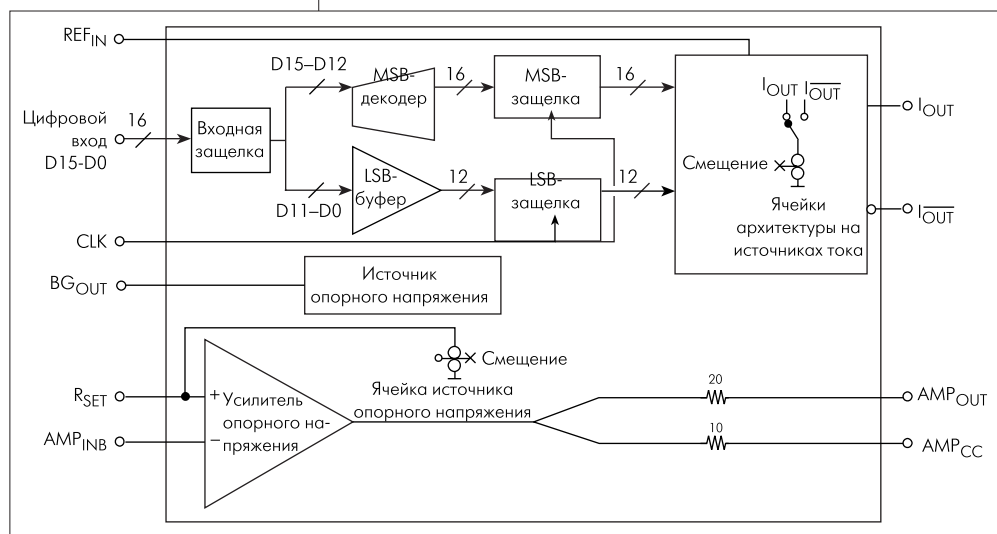


Рис.7. Блок-схема 16-разрядного ЦАП SPT 5510

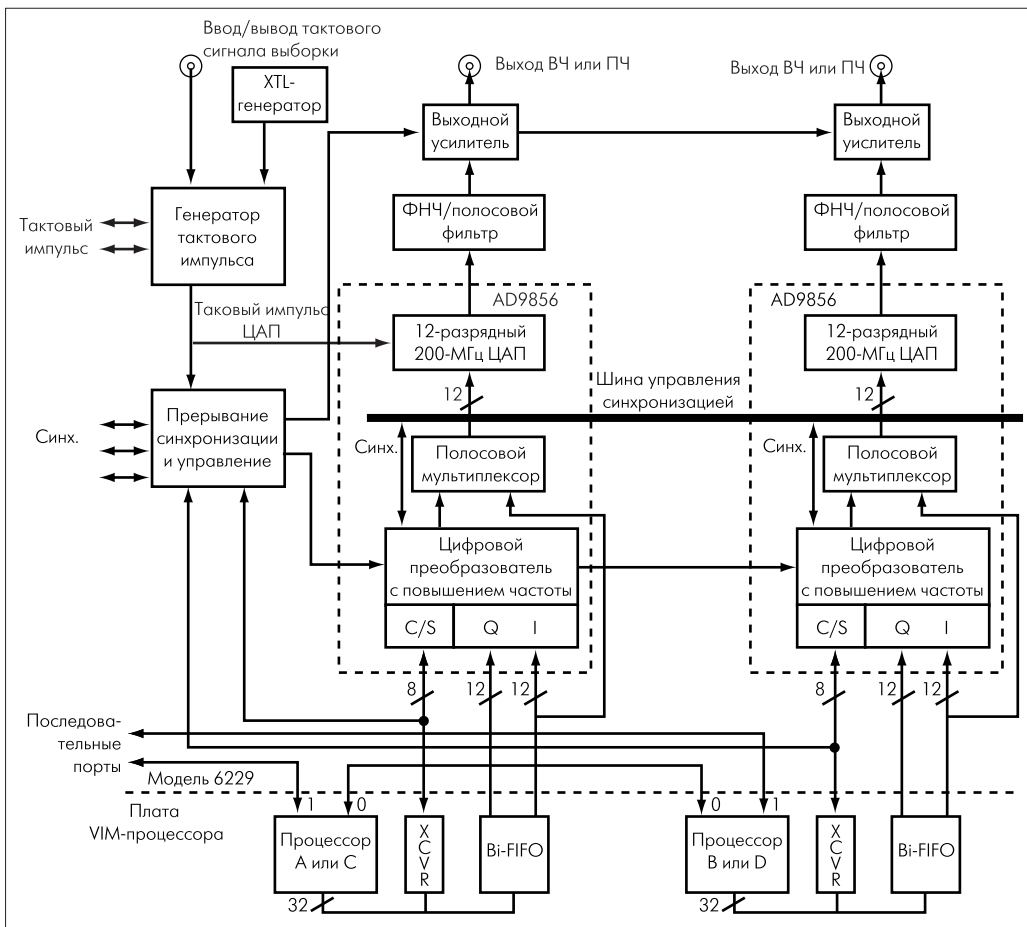


Рис.8. Блок-схема модуля 6229

18 мВт при напряжении питания 3 В. Разработан и вариант ЦАП на 80 Msps, но на рынке он появится лишь в конце 2001 года. В серию входят и сдвоенные 10-разрядные ЦАП для систем с квадратурной модуляцией – MAX5180/5183 с встроенными прецизионными 400-Ом резисторами для вывода напряжения (рис.6). Оба преобразователя работают на тактовой частоте до 40 МГц от единичного напряжения 2,7–3,3 В. Возможны три режима работы: нормальный, с пониженным энергопотреблением и полное отключение. В последнем режиме максимальный потребляемый ток равен всего 1 мкА. SFDR преобразователей – 70 дБ при частоте выходного сигнала 2,2 МГц. Монтируются микросхемы в 28-выводной корпус QSOP-типа.

Сейчас фирма работает над повышением частоты выборки преобразователей серии до 150 Msps. Микросхемы следующего поколения будут изготовлены по 0,35-мкм технологии.

На рынке ЦАП для широкополосных беспроводных систем связи представлены и устройства фирм **Signal Processing Technologies** и **Pentek**. ЭСЛ-совместимый 16-разрядный ЦАП типа SPT5510 фир-

мы Signal Processing (рис.7) характеризуется частотой преобразования 200 МГц. Время установления при разрешении 14 бит равно 25 нс, 16 бит – 35 нс, энергия выброса – 30 пВс. Дифференциальная нелинейность – ±0,6 LSB, интегральная нелинейность – ±0,75 LSB. Поставляется SPT5510 в 44-выводном плоском пластмассовом корпусе с метрическими размерами MQFP-типа.

Цель фирмы Pentek – разработка многоканальных узко-/широкополосных цифровых приемников и передатчиков для цифровых систем связи. В рамках этой программы на фирме создан VIM-модуль (модуль независимого от вектора формирования сообщений), преобразующий цифровые сигналы на частоте полосы передачи в сигналы ПЧ, достигающей 80 МГц. Модуль типа 6229 объединяет на одной плате квадратурный преобразователь с повышением частоты с встроенными четырех-/восьмикратными интерполяционными фильтрами, программируемый генератор, сложный смеситель и сдвоенный 12-разрядный ЦАП с избыточным квантованием (рис.8). Тактовая частота модуля достигает 200 МГц. Он предназначен для подключения сигнального процессора к ВЧ-передатчику. Помимо систем связи типа software radio модуль может найти применение в оборудовании тестирования систем связи и радиолокационных систем, в электронных средствах РПД.

Таким образом, благодаря появлению широкополосных ЦАП с высокими быстродействием и разрешением один прибор теперь может генерировать несколько высокочастотных носителей с минимальными взаимными помехами и шумом. А в результате реальностью становятся стационарные станции, способные работать в нескольких стандартах. Теперь с появлением новых стандартов не нужно списывать старое оборудование.

Electronic Design, 2000, Dec.18.
Data Sheets фирм ADI, Texas Instruments, Intersil, Maxim Integrated Products, Signal Processing Technologies, Pentek.

Закон Мура все еще справедлив *Жив. курилка*

Две крупнейшие фирмы – IBM и Intel – сообщили о готовности приступить к производству КМОП-процессоров на частоту 2 ГГц по 0,13-мкм технологии. IBM намерена начать поставки микросхем со структурой *кремний-на-сапфире*, девятислойной медной металлизацией и диэлектриком с низкой диэлектрической постоянной (2,7) уже в 2001 году. Новая технология CMOS 9S разработана совместно с германской компанией Infineon Technologies и тайваньской UMC. Следующий шаг этих трех фирм – переход к 0,1-мкм нормам. Опытное производство сосредоточено в Центре НИОКР фирмы IBM в Ист-Фишкеле, серийный выпуск начнется на заводе в Барлингтоне.

Intel также планирует начать в этом году производство микросхем по 0,13-мкм технологии с шестислойной медной металлизацией.

Первоначально схемы будут изготавливаться на 200-мм пластинах, а в 2002 году – на 300-мм. Длина затвора транзисторов равна 70 нм, толщина затворного окисла – 1,5 нм, отношение ширины соединительных линий к длине – 1,6:1. Структура изготовлена с помощью литографии с использованием дальнего УФ-излучения. Следующий шаг – масштабирование размеров до 0,03 мкм (толщина затворного окисла при этом составит три монослоя). Цель фирмы – создание через пять-десять лет микропроцессоров, содержащих 400 млн. транзисторов и работающих на тактовой частоте 10 ГГц при напряжении менее 1 В.

Electronic Design, 2001, Feb.5.