

# Сверхскоростные ЦАП фирмы Texas Instruments с частотой преобразования от 1 до 2,4 Гвыб./с

Владимир ДЬЯКОНОВ,  
д. т. н., профессор  
vpdyak@yandex.ru

Корпорация Texas Instruments (США) является крупнейшим разработчиком и производителем аналого-цифровых (АЦП) и цифро-аналоговых (ЦАП) преобразователей. Одних только ЦАП она ныне выпускает около трех сотен типов, отличающихся скоростью преобразования, разрядностью, числом каналов и другими характеристиками. В статье описываются сверхскоростные ЦАП этой фирмы с частотой преобразования от 1 до 2,4 Гвыб./с. Они в наибольшей мере характеризуют уровень технических достижений и технологий компании и открывают новые перспективы применения ЦАП в современной радиоэлектронной аппаратуре гражданского и военного назначения.

## 16-битовые ЦАП DAC5681 со скоростью преобразования 1 Гвыб./с

Современные АЦП и ЦАП относятся к одним из наиболее сложных интегральных схем, поскольку содержат как аналоговые узлы (операционные усилители, компараторы, источники стабильных токов и напряжений), так и разнообразные цифровые узлы. При этом часть из них должна удовлетворять

жестким метрологическим требованиям, а часть вообще относится к прецизионным узлам. Это накладывает на технологию изготовления таких микросхем жесткие ограничения и вынуждает специалистов усложнять схемные решения узлов АЦП и ЦАП схемами температурной компенсации, стабилизации параметров и их контроля в ходе эксплуатации.

Получение скорости преобразования с магическим барьером в 1 Гвыб./с потре-

бовало от разработчиков огромных усилий по созданию сверхскоростных электронных узлов ЦАП. Были созданы ЦАП на основе сложения токов отдельных разрядов с помощью сверхскоростных коммутаторов тока с низковольтными дифференциальными входами (LVDS). Для входных и выходных устройств в них применяются буферные схемы на основе дифференциальных каскадов, позволяющих использовать хорошо защищенные от помех дифференциальные линии передачи типа витой пары. Такие входы и выходы применяются и в узлах синхронизации и передачи тактовых импульсов. В узлах ЦАП используются высокоскоростные биполярные транзисторы и комплементарные CMOS-транзисторы, оптимизированные по скорости работы.

## 16-битовые одноканальные ЦАП DAC5681 со скоростью преобразования 1 Гвыб./с

На основе этих решений был создан и выпускается уже несколько лет 16-битовый сверхскоростной ЦАП (DAC) со скоростью преобразования 1 Гвыб./с и высокой разрядностью (16 бит) типа DAC5681. Высокие значения разрядности и скорости преобразования ЦАП этого типа позволили избавиться от казавшего бы неизбежным компромисса между желаемым высоким быстродействием ЦАП и его малой погрешностью.

Основные характеристики ЦАП DAC5681:

- Количество дифференциальных выходов: один.
- Время установки: 10 нс.

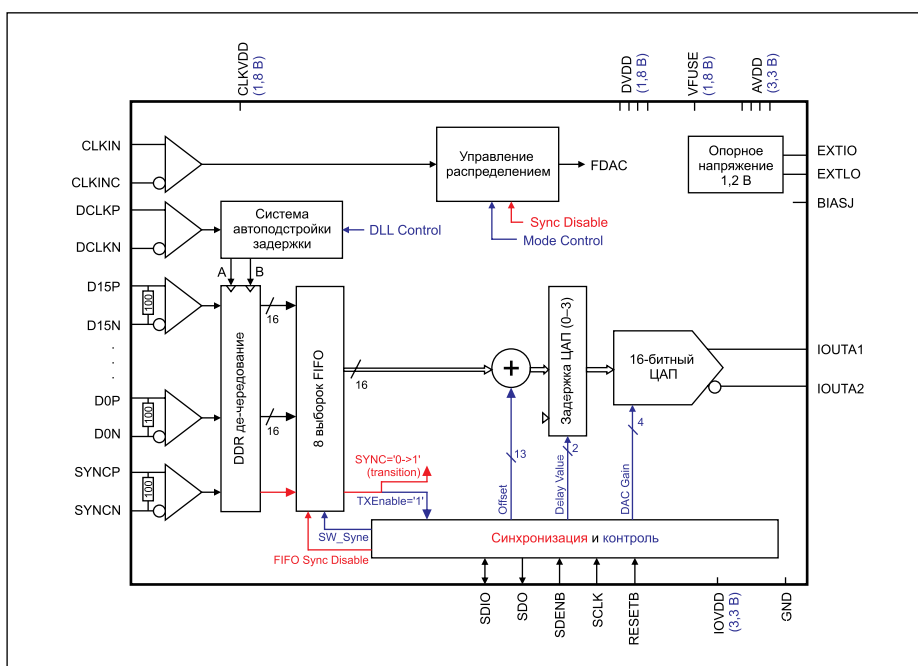


Рис. 1. Функциональная диаграмма микросхемы DAC5681

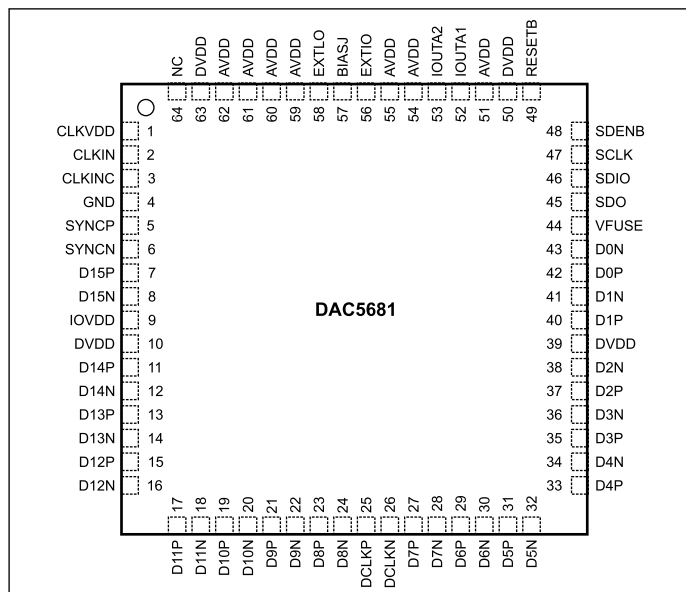


Рис. 2. Вид корпуса с указанием назначения его выводов

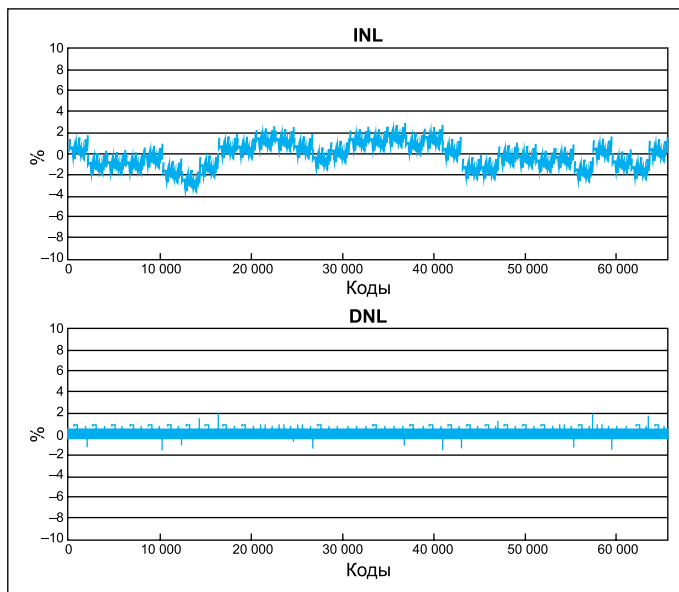


Рис. 4. Интегральная (INL) и дифференциальная (DNL) нелинейности ЦАП DAC5681

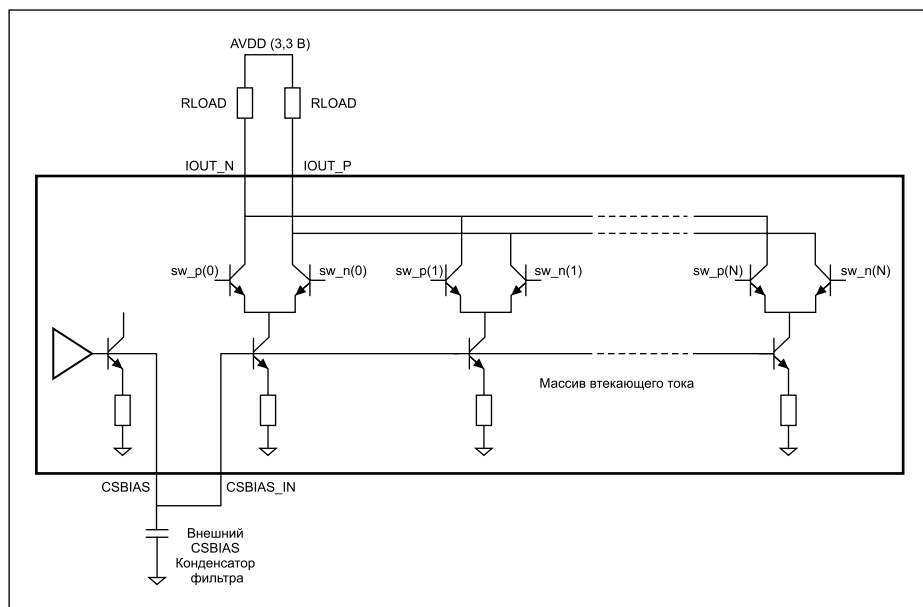


Рис. 3. Упрощенная схема ЦАП на основе массива образцовых источников тока и дифференциальных коммутаторов тока

ЦАП в портативной аппаратуре связи и измерительных приборах [2].

На рис. 3 приведена упрощенная схема ЦАП, обеспечивающая преобразование входных сигналов в дифференциальные выходные сигналы. Схема построена на основе массива образцовых источников тока и набора дифференциальных коммутаторов тока. Такие переключатели тока относятся к наиболее скоростным схемам на биполярных транзисторах (как и схемы с эмиттерной связью, например логические ЭСЛ). Именно от отработки узлов этой схемы зависят метрологические и динамические показатели сверхскоростных ЦАП, описанных в данной статье.

### Основные характеристики микросхемы DAC5681

Интегральная и дифференциальная нелинейности ЦАП DAC5681 представлены графиками зависимости, показанными на рис. 4. Дифференциальная нелинейность очень мала, а интегральная хотя и более заметна, но тоже мала.

Зависимость свободного от ошибок динамического диапазона SFDR от средней частоты IF приведена на рис. 5. Графики даны для разных уровней тактового сигнала с частотой  $F_S$ .

О качестве работы ЦАП часто судят по спектру его выходного сигнала. Его получают с помощью анализаторов спектра [2, 3]. Спектр входного сигнала с частотой 20 МГц при частоте преобразования  $F_S = 1000$  Мвыб./с практически не имеет паразитных пиков уровнем выше  $-70$  дБм. На рис. 6 показан спектр входного сигнала с частотой 270 МГц при частоте преобразования 1000 МГц. С ростом частоты входного сигнала число паразитных линий спектра возрастает, и это отчетливо видно на рис. 6.

- Тип интерфейса входа: параллельный, низковольтный, дифференциальный (LVDS).
- Тип выхода: токовый, дифференциальный.
- Диапазон программируемых выходных токов: от 2 до 20 мА.
- Отношение сигнал/шум (SNR): 79 дБ.
- Типовая потребляемая мощность: 650 мВт.
- Архитектура: I-steering.
- Разрядность преобразования: 16 бит.
- Максимальная скорость преобразования: 1 Гвыб./с.
- Вход FIFO на 7 отсчетов.
- Тип источника опорного сигнала: встроенный 1,2 В.
- Корпус: QFN с 64 выводами.
- Размеры корпуса: 9×9 мм.

Функциональная диаграмма микросхемы ЦАП DAC5681 показана на рис. 1. В левой ча-

сти расположены дифференциальные входы: тактовых импульсов CLK, 16 разрядов данных и импульсов синхронизации. В правой части диаграммы находятся выводы источника опорного напряжения Reference и выходы ЦАП IOUTA1 и IOUTA2. Помимо собственно ЦАП в микросхему входят буферные каскады, устройства подготовки данных для ЦАП, распределитель тактовых сигналов, устройство синхронизации/контроля и источник опорного напряжения с уровнем 1,2 В.

На рис. 2 представлен корпус микросхемы DAC5681 с указанием назначения его 64 выводов. Корпус имеет 64 вывода (по 16 выводов с каждой стороны) и малые размеры — 9×9 мм. Это наряду с малой (для скоростных ЦАП) потребляемой от источника питания мощностью позволяет применять такие

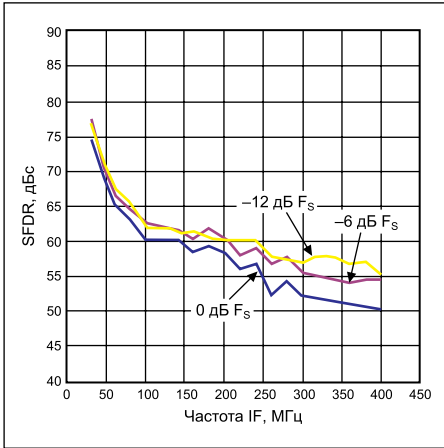


Рис. 5. Зависимость SFDR от средней частоты IF

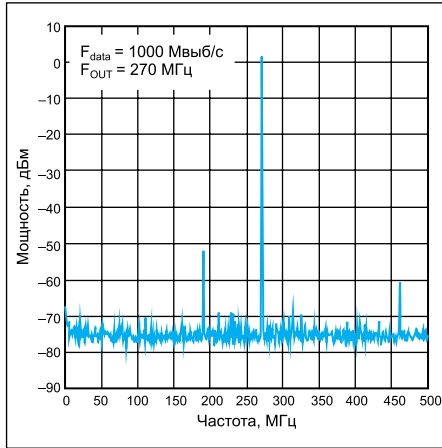


Рис. 6. Спектр сигнала с частотой 270 МГц при частоте преобразования 1000 Мвыб./с

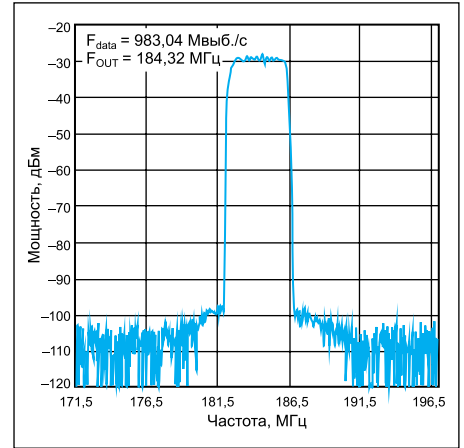


Рис. 7. Спектр одного канала со средней частотой 184,32 МГц

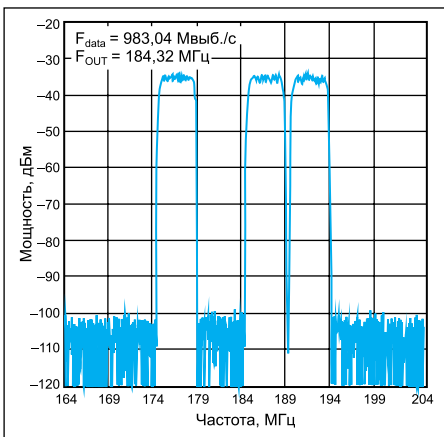


Рис. 8. Спектр четырех каналов со средней частотой 184,32 МГц

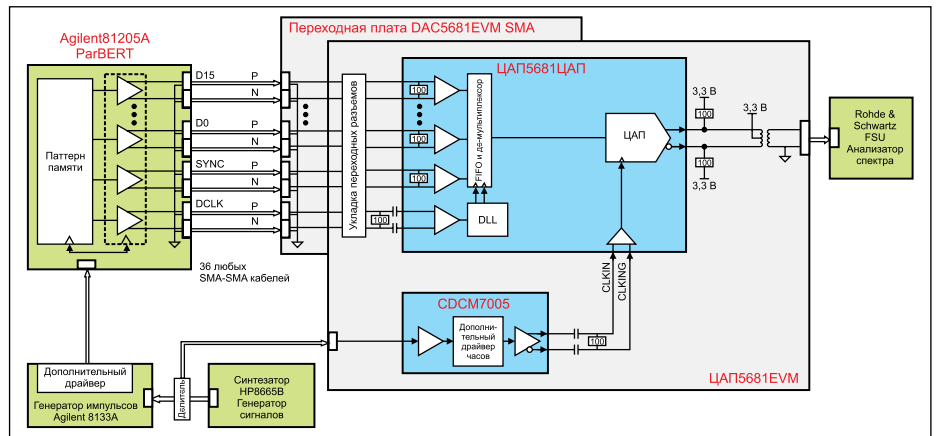


Рис. 9. Установка для тестирования ЦАП DAC5681

Скоростные ЦАП часто применяют в многоканальных системах связи с частотным разделением каналов. При этом важно обеспечить как правильное преобразование во всех каналах, так и четкое их разделение. На рис. 7 показан типичный спектр одного канала со средней частотой 184,32 МГц, полученный при частоте квантования 1000 Мвыб./с. Другие каналы при этом отключены. При отсечении шумовой дорожки рабочая часть спектра характеризуется кривой, которая близка к прямоугольной форме.

Спектр четырех каналов со средней частотой 184,32 МГц при частоте квантования 983,04 Мвыб./с приведен на рис. 8. В одном из каналов сигнал отсутствует. На рис. 7 можно видеть высокую степень разделения каналов. Спад АЧХ между каналами происходит практически до уровня собственных шумов ЦАП.

Для снятия основных характеристик ЦАП фирма рекомендует установку, представленную на рис. 9. В нее входят приборы фирм Agilent и HP [2].

Временная диаграмма сигналов (тактовых, синхронизации и данных) представлена на рис. 10. Множество диаграмм работы различных узлов ЦАП DAC5681 дано в до-

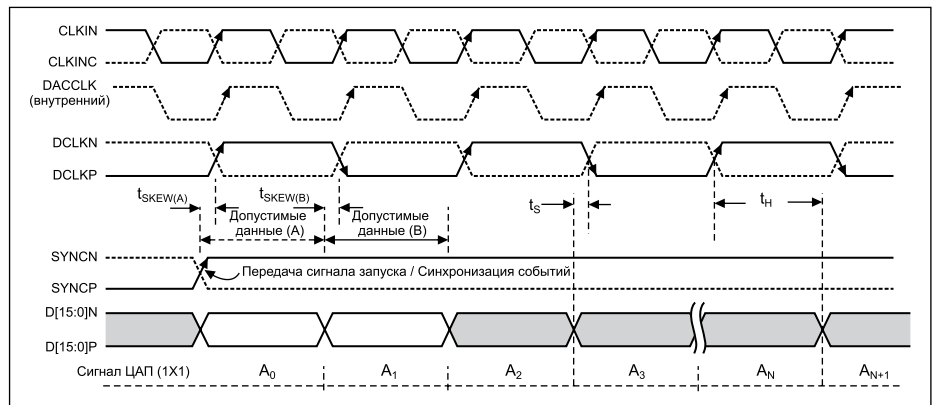


Рис. 10. Временная диаграмма сигналов ЦАП DAC5681

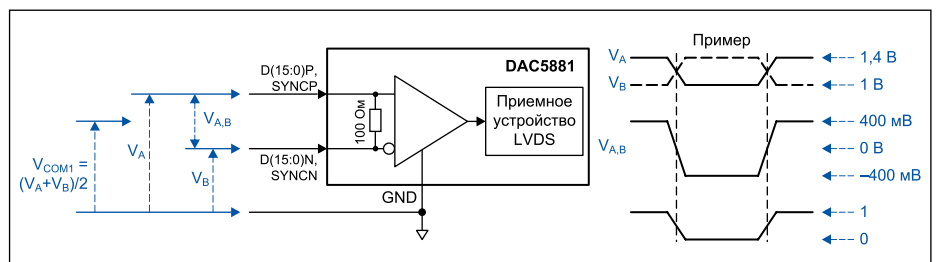


Рис. 11. Диаграмма уровней LVDS сигналов синхронизации

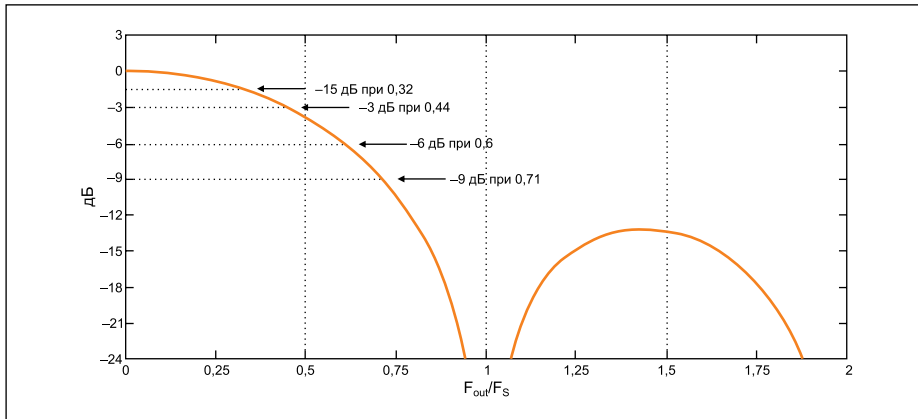


Рис. 12. АЧХ интерполирующего фильтра типа  $\sin(x)/x$  (SINC)

Точность и скорость работы ЦАП сильно зависят от выбора типа интерполирующего фильтра. Одним из наиболее часто применяемых является фильтр типа  $\sin(x)/x$  (SINC), отвечающий требованиям теоремы об отсчетах, именуемой у нас как теорема Котельникова. АЧХ такого типа показана на рис. 12: фильтр имеет неплохие свойства интерполятора, но он недостаточно хорошо подавляет шум на высоких частотах.

**Примеры применения сверхскоростных ЦАП**

Сверхскоростные ЦАП, как и АЦП, широко применяются в системах связи с кодоимпульсной модуляцией. Пример построения такой системы представлен на функциональной схеме (рис. 13). Цифровой исходный сигнал с помощью ЦАП преобразуется в широкополосный аналоговый сигнал, который служит для осуществления кодоимпульсной модуляции векторного сигнала с помощью I/Q-модулятора. После фильтрации и усиления сигнал направляется в антенну. Принимаемый антенной сигнал от другой радиостанции выделяется супергетеродинным радиоприемником (его узлы показаны внизу на рис. 13), подвергается I/Q-демодуляции и после усиления и фильтрации подается на АЦП, превращающий его вновь в цифровой сигнал.

Пример построения радиопередатчика прямого преобразования с кодоимпульсной модуляцией показан на рис. 14. Назначение такого радиопередатчика — передача аналоговых сигналов от ЦАП DAC5681. Исходный цифровой сигнал создается блоком FPGA/ANSIS с программируемой логической матрицей.

кументации на него (datasheet), размещенной на сайте компании Texas Instruments [1].

На рис. 11 представлена диаграмма уровней LVDS сигналов синхронизации. Аналогичный

вид имеют диаграммы тактовых и входных сигналов ЦАП. Конкретные уровни сигналов представлены на примере диаграммы, приведенной в правой части рисунка.

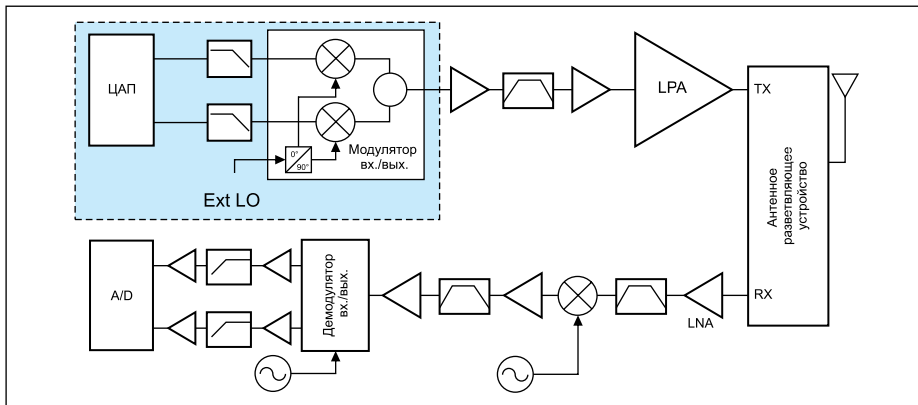


Рис. 13. Пример кодоимпульсной системы связи с общей антенной передатчика и приемника

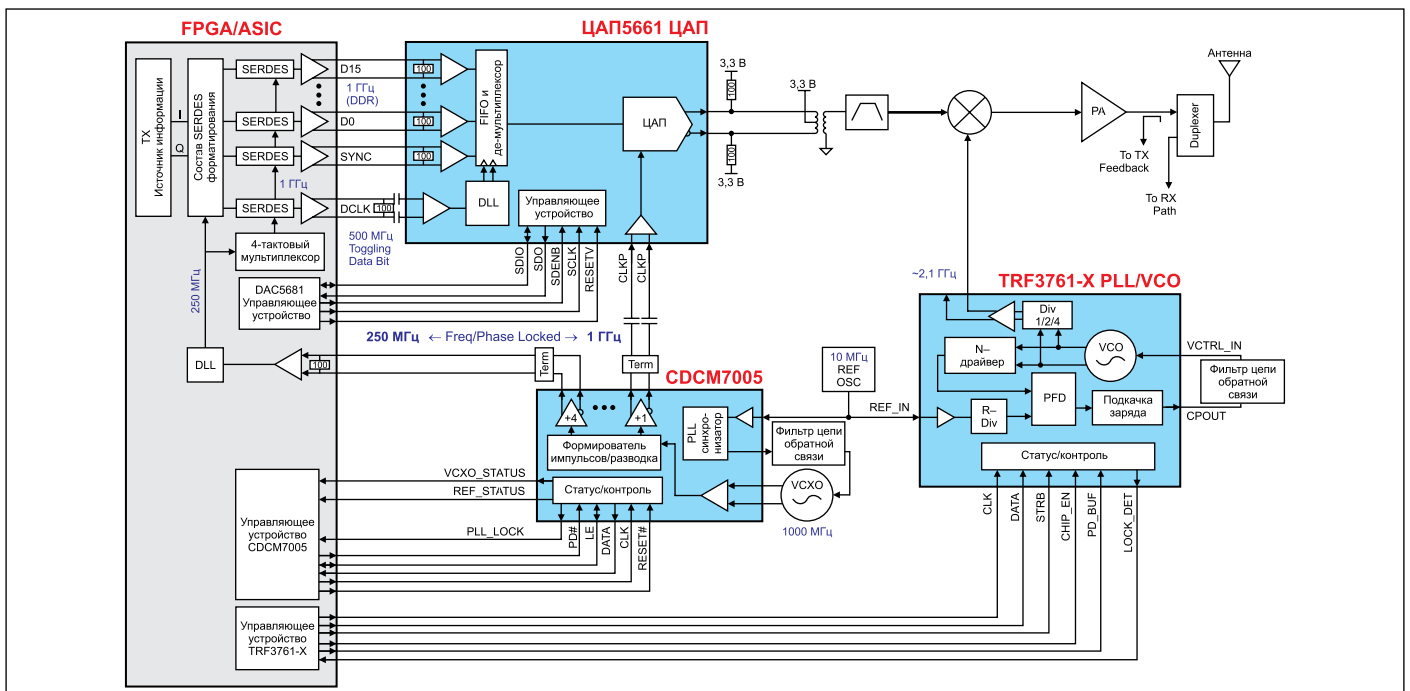


Рис. 14. Пример построения радиопередатчика прямого преобразования

Пример применения ЦАП DAC5681 в двухканальной системе реального RF-радио приведен на рис. 15. Одна из серьезных проблем при построении таких систем — влияние шумов.

Сверхскоростные ЦАП широко применяются при создании тестирующего и измерительного оборудования, например при построении цифровых генераторов сигналов произвольной формы. Функциональная схема генератора показана на рис. 16.

Основные области применения сверхскоростных ЦАП:

- Базовые станции сотовых сетей связи.
- Широкополосная беспроводная связь WMA.
- Беспроводная сеть WiMAX 802.16.
- Беспроводная сеть Fixed Wireless Backhaul.
- Кабельные модемы терминальных систем (CMTS).
- Медицинское оборудование.
- Контрольно-измерительные и тестирующие системы.
- Радарные системы.

**ЦАП DAC5681Z с интерполирующим фильтром высокого порядка**

16-битовый ЦАП DAC5681Z с частотой преобразования 1 Гвыб./с имеет интерполирующий фильтр порядка от 2 до 4. Это достигается переключением секций фильтра. Функциональная диаграмма микросхемы ЦАП DAC5681Z представлена на рис. 17. Ее сравнение с функциональной диаграммой ЦАП DAC5681 (рис. 1) показывает, что отличие DAC5681Z заключается только в том, что после блока FIFO расположены два фильтра — FIR0 и FIR1. Выходной сигнал ЦАП — масштабируемый, токовый: максимальный выходной ток — от 2 до 20 мА. ЦАП выполнен в корпусе QFN с 64 выводами. Его размеры — 9×9 мм. Напряжение питания микросхемы — 3,3 В.

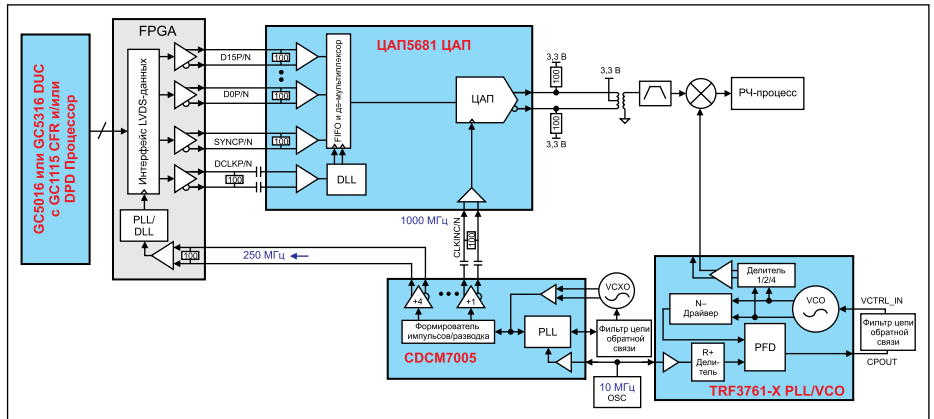


Рис. 15. Системная диаграмма двухканальной системы реального RF-радио

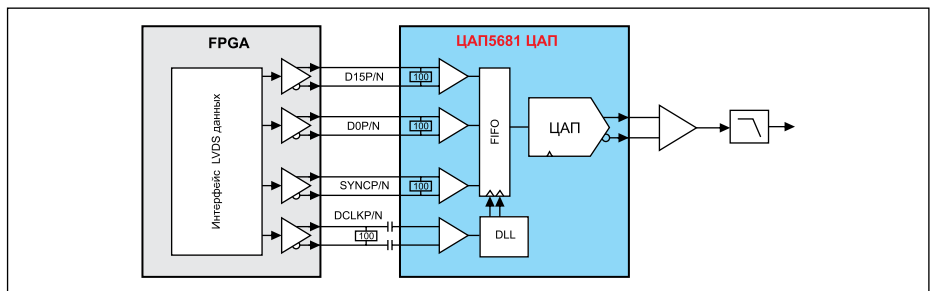


Рис. 16. Функциональная схема цифрового генератора сигналов произвольной формы

Интегральная и дифференциальная нелинейности микросхемы DAC5681Z представлены в виде графиков зависимости (рис. 18). Нетрудно заметить, что наличие более сложного фильтра немного ухудшает интегральную нелинейность.

Спектр сигнала, имеющего четыре канала со средней частотой 184,32 МГц и частотой преобразования 491,52 МГц, приведен на рис. 19. Уровень шумов между каналами и за их пределами очень мал и составляет

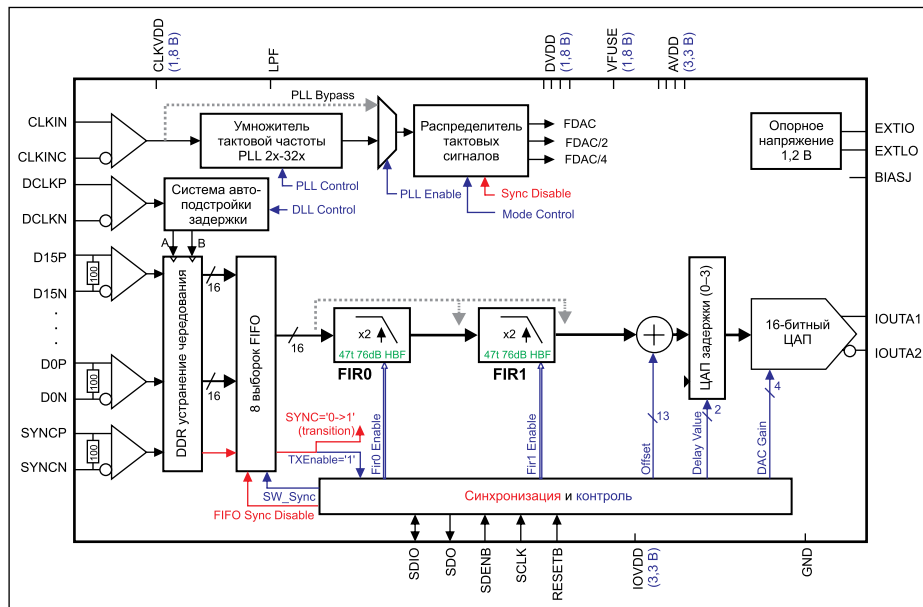


Рис. 17. Функциональная диаграмма ЦАП DAC5681Z

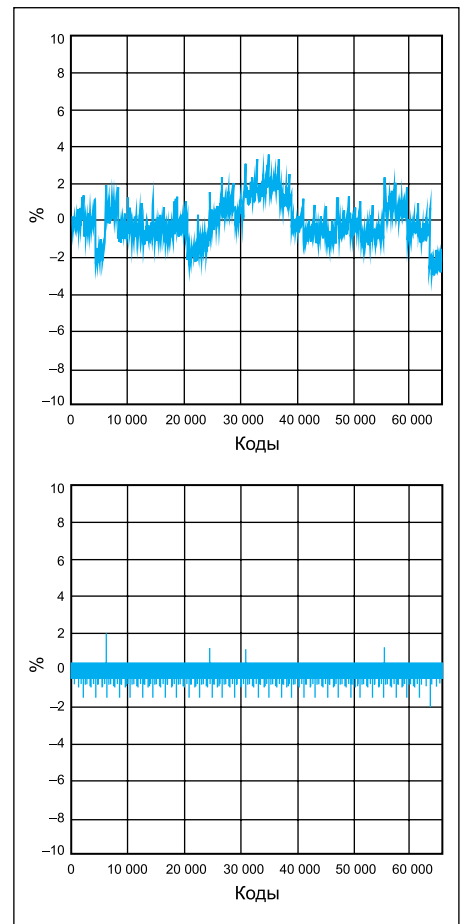


Рис. 18. Интегральная и дифференциальная нелинейности ЦАП DAC5681Z

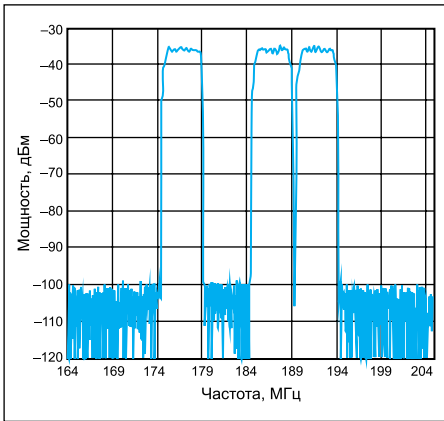


Рис. 19. Спектр четырех каналов DAC5681Z

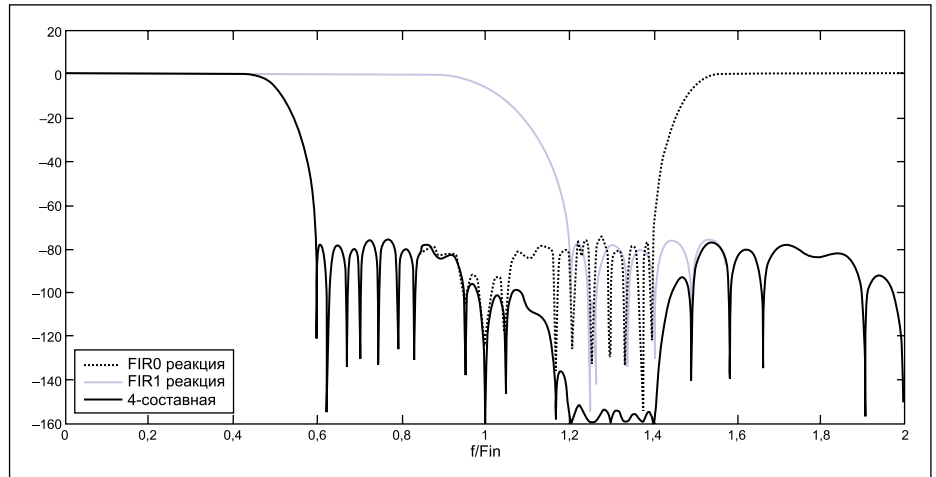


Рис. 20. АЧХ интерполирующего фильтра

около -100 дБм. Это главное достоинство, получаемое при усложнении фильтра.

АЧХ интерполирующего фильтра и его компонентов даны на рис. 20. Заграждающий фильтр создает заметное дополнительное ослабление в области частот от 1,2 до 1,4  $f/Fin$ .

**4-канальные 16-битовые ЦАП DAC34N84/3484 с частотой преобразования 1,25 Гвыб./с**

Функциональная диаграмма 4-канального ЦАП DAC34N84 представлена на рис. 21. Она, естественно, заметно сложнее, чем функциональная диаграмма одноканального ЦАП. Но каждый канал DAC34N84 подобен одноканальному ЦАП и отличается лишь

большим числом коммутируемых фильтров. Этот ЦАП имеет интерполяционные фильтры порядка 2, 4, 8 и 16 и заграждающий фильтр с ослаблением более 90 дБс.

Чтобы увеличить число каналов, нужен был корпус с большим числом выводов. Корпус имеет размеры 12×12 мм и 196 выводов. Их назначение дано на рис. 22.

При частоте преобразования 1,25 Гвыб./с ЦАП DAC34N84 потребляет мощность 1,4 Вт — почти вдвое большую, чем у ЦАП DAC3484.

Данные об интегральной и дифференциальной нелинейности каждого из каналов

ЦАП DAC34N84 представлены на рис. 23. Они примерно вдвое хуже, чем у одноканальных ЦАП DAC3484. Это плата за увеличение числа каналов.

Зависимость SFDR от частоты выходного сигнала и уровня ослабления второй гармоники показана на рис. 24. Графики даны при разных значениях уровня тактового сигнала.

Спектр ЦАП DAC34N84 при частоте входного сигнала 150 и 200 МГц и частоте преобразования 1250 МГц показан на рис. 25. Хотя отдельные паразитные пики (линии) спектра присутствуют, но их уровень мал, и спектры можно признать вполне удовлетворительными.

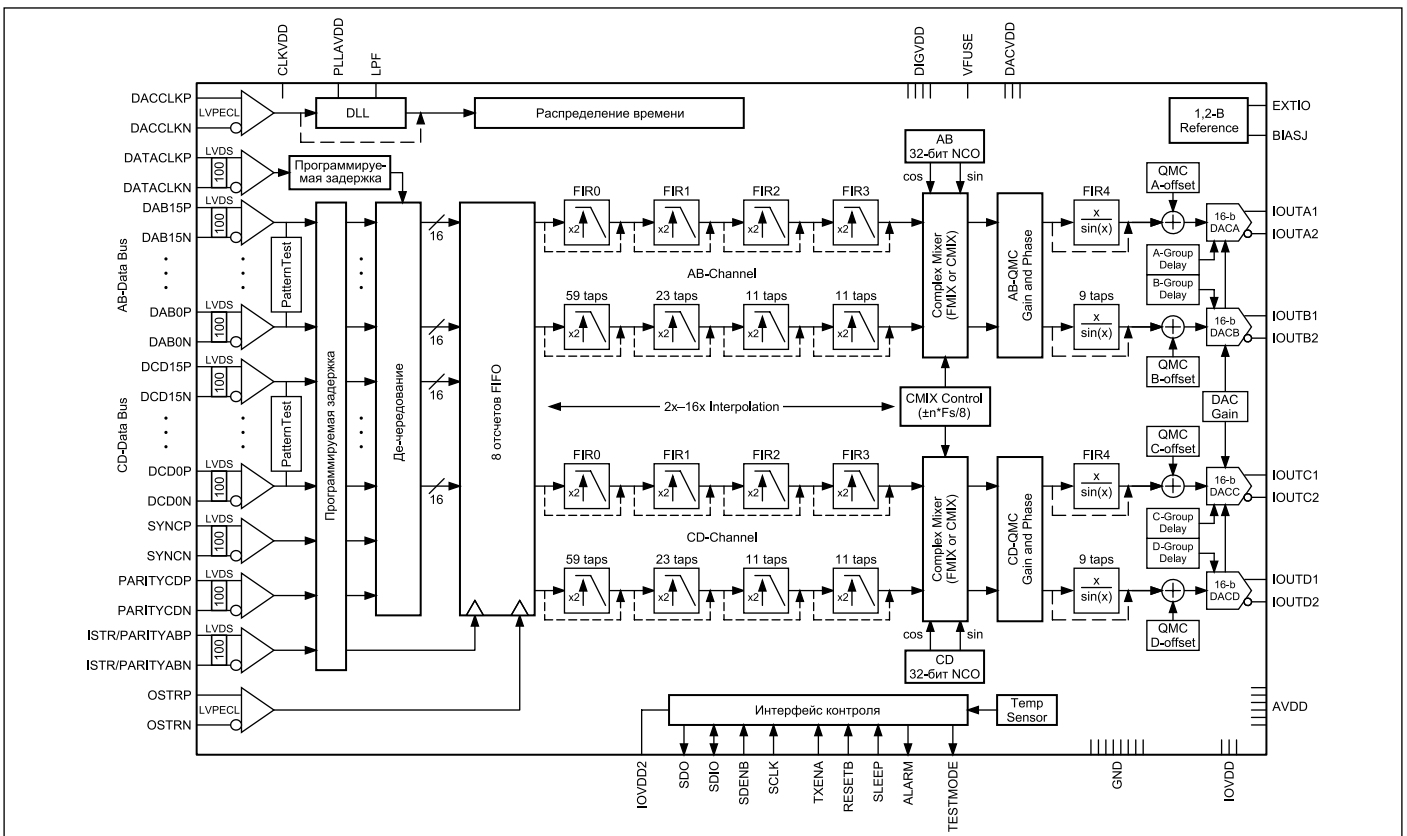


Рис. 21. Функциональная диаграмма 4-канального ЦАП DAC34N84

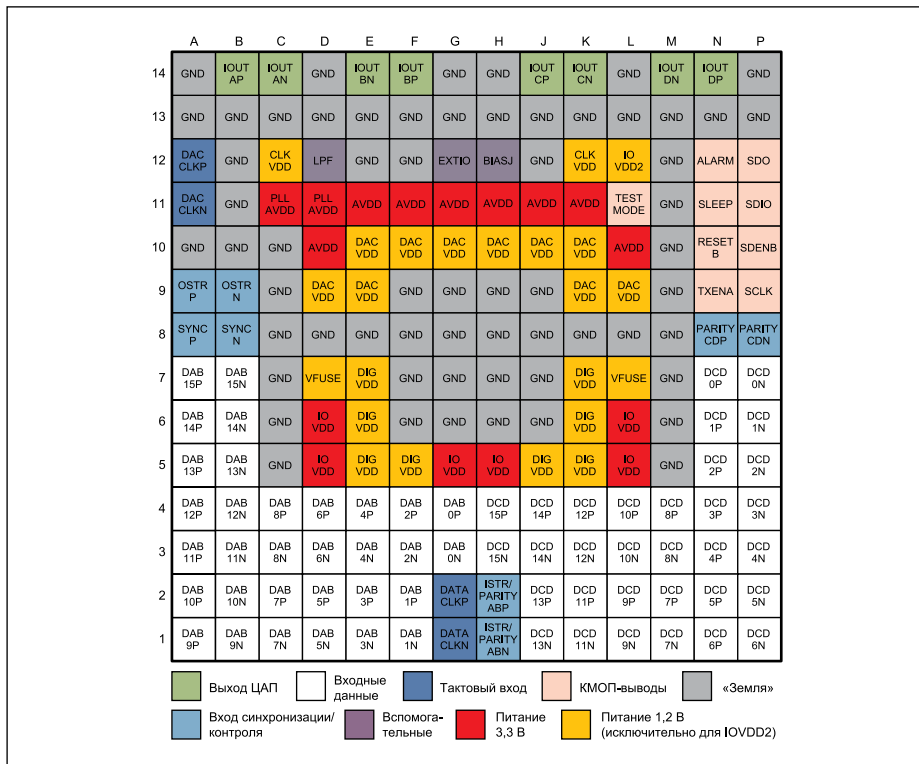


Рис. 22. Назначение выводов корпуса ЦАП DAC34N84

Спектр четырех каналов с частотным разделением показывает, что все четыре канала четко выделяются, и провалы АЧХ между ними доходят до уровня шумовой дорожки. На рис. 26 показана АЧХ фильтров интерполяции ЦАП DAC34N84 при включении всех фильтров. Результирующая характеристика фильтра является компромиссом между хо-

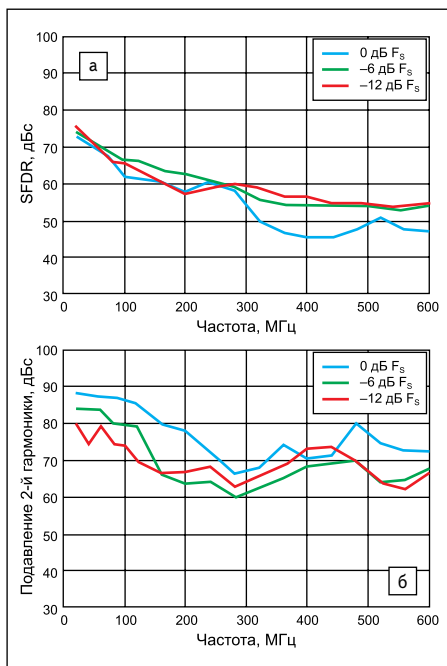


Рис. 24. Зависимость SFDR от частоты выходного сигнала (а) и уровня ослабления второй гармоники (б)

рошими интерполирующими свойствами и малым уровнем собственных шумов ЦАП.

Еще один ЦАП этой группы — DAC34N84 — имеет корпус уменьшенного размера (9×9 мм) при числе выводов 88 (рис. 27). Параметры этого ЦАП подобны параметрам ранее описанного ЦАП DAC34N84 за исключением немного меньшей потребляемой мощности — 1,27 Вт.

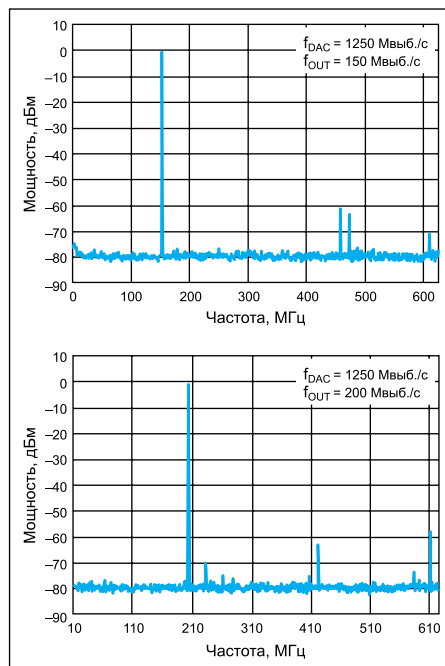


Рис. 25. Спектр при частоте сигнала 150 и 200 МГц и частоте квантования 1250 МГц

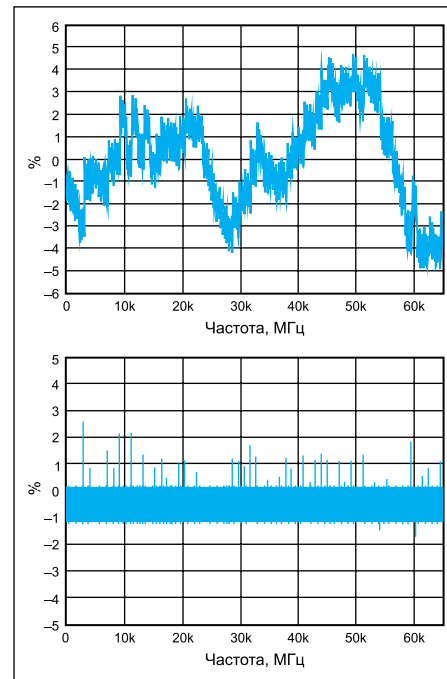


Рис. 23. Интегральная и дифференциальная нелинейности ЦАП DAC34N84

**14-битовый ЦАП DAC5670-S с частотой преобразования 2,4 Гвыб./с**

Микросхема 14-битового ЦАП DAC5670-S является самой высокочастотной и обеспечивает частоту преобразования до 2,4 Гвыб./с. Она имеет дополнительный бит разрядности — Reference Bit. Ее функциональная диаграмма показана на рис. 28. ЦАП имеет два дифференциальных входа. При совместном использовании обоих входов достигается максимальная частота преобразования в 2,4 Гвыб./с. При использовании одного входа она вдвое ниже.

Максимальное значение масштабируемого выходного тока — от 5 до 30 мА.

Каждый входной порт ЦАП DAC5670-SP поддерживает стандарты входных сигналов LVDS и HyperTransport, отличающиеся уровнями сигналов (1 и 1,4 В, 0,3 и 0,9 В) (рис. 29).

Корпус микросхемы показан на рис. 30. Он имеет 192 вывода и обеспечивает работу ЦАП в диапазоне температур от -55 до +125 °С. Рассеиваемая микросхемой мощность — около 2 Вт при напряжении питания 3,3 В.

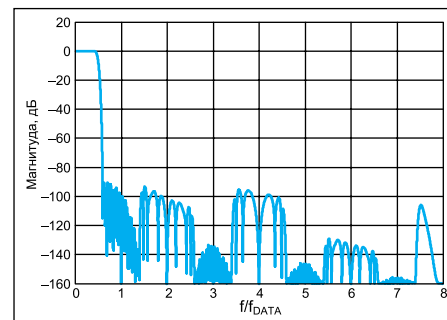


Рис. 26. АЧХ всех фильтров DAC34N84

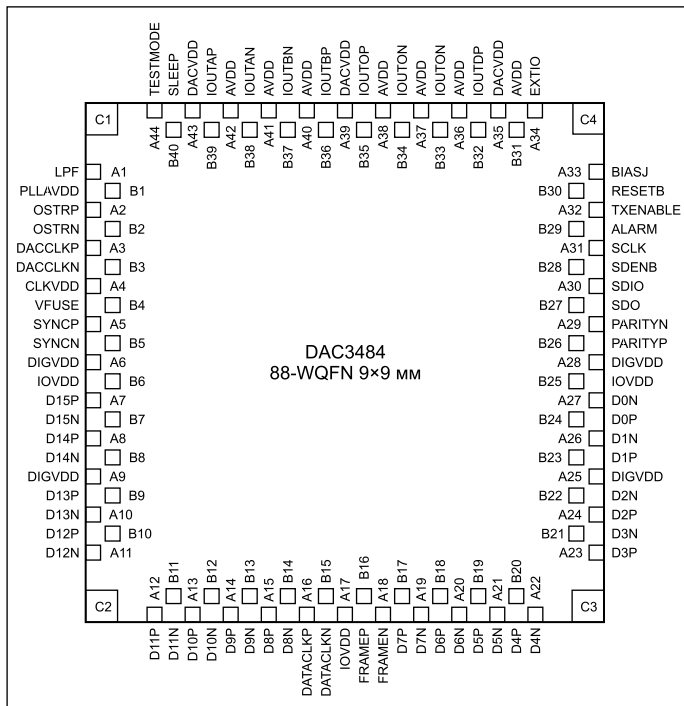


Рис. 27. Назначение выводов корпуса ЦАП DAC34H84

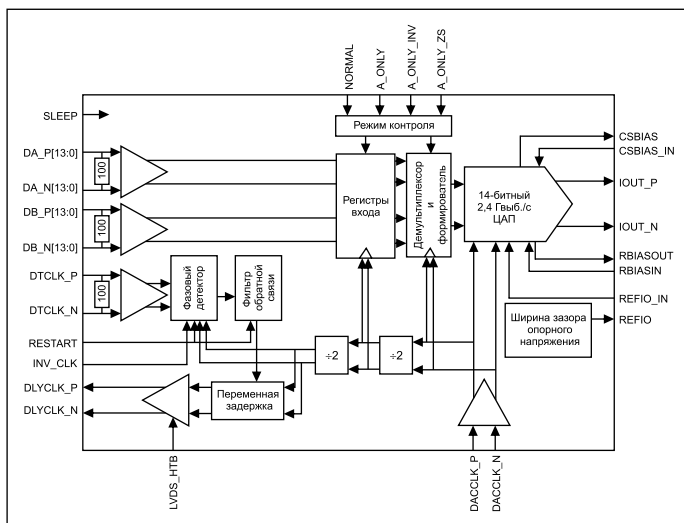


Рис. 28. Функциональная диаграмма ЦАП DAC5670-SP

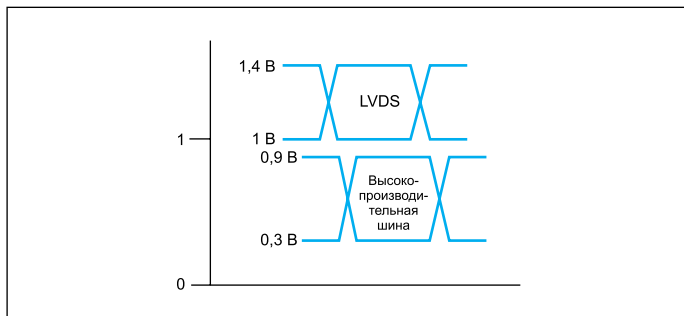


Рис. 29. Временные диаграммы дифференциальных сигналов LVDS и HyperTransport

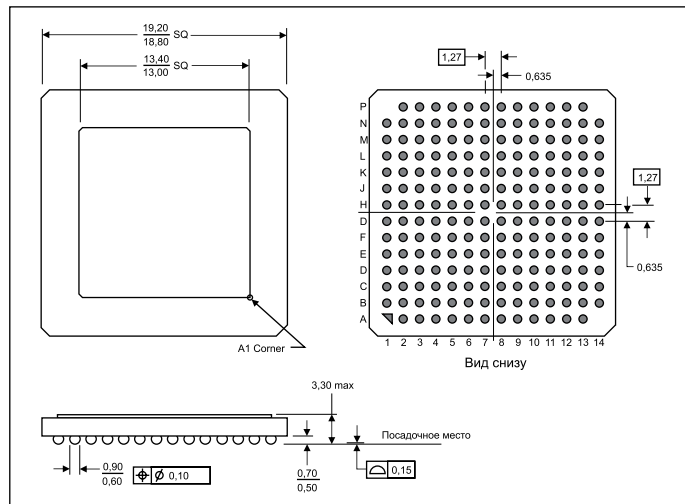


Рис. 30. Корпус микросхемы ЦАП DAC5670-SP

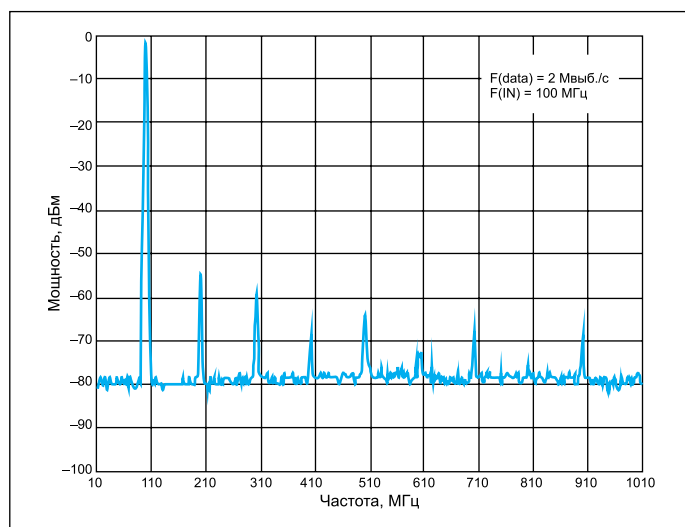


Рис. 31. Спектр при частоте входа 100 МГц и частоте квантования 2 Гвыб./с

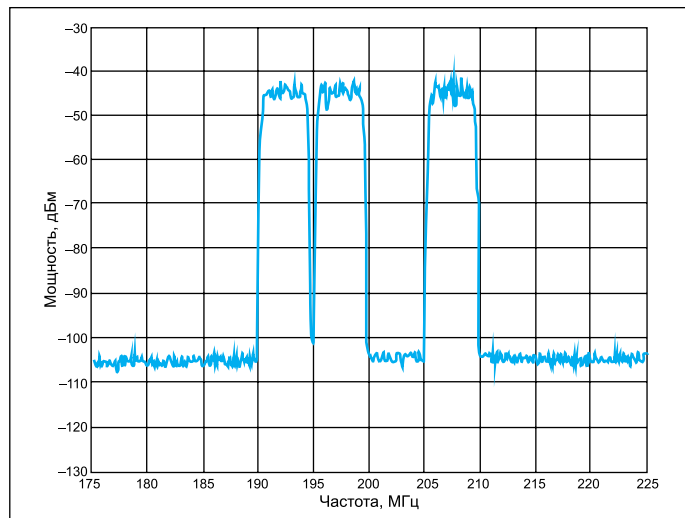


Рис. 32. Спектр выходного сигнала при четырех каналах

Типичный спектр выходного сигнала при частоте входного сигнала 100 МГц и частоте преобразования 2 Гвыб./с показан на рис. 31.

В спектре отчетливо видны высшие гармоники, причем все гармоники с номерами от 2 до 9 заметно выше уровня шума этого ЦАП.

Спектр 4-канального сигнала, показанного на рис. 32, демонстрирует достаточно четкое разделение каналов и малый уровень



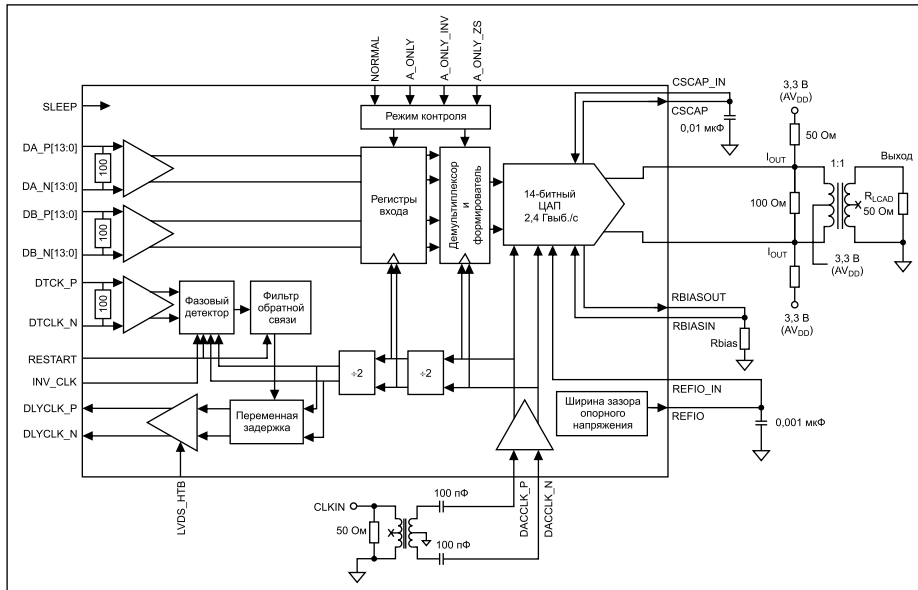


Рис. 33. Пример организации выходов и подключения источника тактовых импульсов

на то, что применение широкополосных согласующих трансформаторов исключает передачу постоянных составляющих сигналов и не позволяет сделать нулевой нижней граничную частоту. Она определяется нижней граничной частотой трансформатора.

## Заключение

Компания Texas Instruments разработала и освоила серийное производство около десятка типов сверхскоростных цифро-аналоговых преобразователей со скоростью преобразования от 1 до 2,4 Гвыб./с и разрядностью в 14 и 16 бит. Преобразователи имеют интерполирующие фильтры различного порядка и основаны на сверхскоростных схемах сложения токов. Входы и выходы ЦАП — дифференциальные, типа LVDS и HyperTransport. Преобразователи работают в диапазонах температур как гражданского (индустриального), так и военного стандартов и находят широкое применение в современной СВЧ и сверхскоростной аппаратуре связи и радиолокации, а также в измерительных системах и приборах различного назначения.

## Литература

1. <http://www.ti.com>
2. Афонский В. П., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике. М.: ДМК-Пресс, 2011.
3. Афонский В. П., Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. М.: ДМК-Пресс, 2011.

шума за пределами каналов. Однако спад АЧХ между каналами немного не дотягивает до уровня шума. Таким образом, сверхвысокая частота преобразования достигнута за счет некоторого ухудшения спектра выходного сигнала.

При использовании скоростных ЦАП рядом с симметричными дифференциальными линиями часто применяются несимметричные широкополосные коаксиальные кабели. При этом возникает необходимость перехода от несимметричного включения к симметричному, и наоборот. Пример

организации несимметричного выхода на 50-омную нагрузку и подключения несимметричного источника тактовых импульсов к симметричным входам тактовых импульсов ЦАП приведен на рис. 33. Это типовая схема включения ЦАП DAC5670-SP, рекомендуемая компанией Texas Instruments.

Внизу на рис. 33 показано подключение несимметричного источника тактовых импульсов к симметричному входу их в ЦАП, а с правой стороны — схема подключения симметричного выхода ЦАП к несимметричной 50-омной нагрузке. Обратите внимание