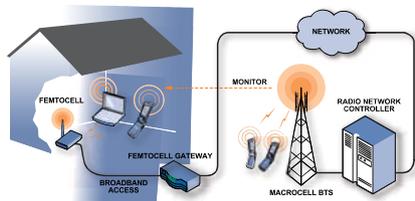


## КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ СВЯЗИ, часть 7. СИНТЕЗАТОРЫ ЧАСТОТЫ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА

Синтезаторы незаменимы в системах телекоммуникаций для формирования сигналов стабильной частоты с возможностью быстрой перестройки по частоте и фазе. В седьмой части статьи приведен обзор синтезаторов частоты прямого цифрового синтеза, которые выпускает компания Analog Devices.



### COMPONENTS FOR CONSTRUCTION OF WIRELESS COMMUNICATION DEVICES, part 7. SYNTHESIZERS OF FREQUENCY OF DIRECT DIGITAL SYNTHESIS

Abstract – Synthesizers are irreplaceable in systems of telecommunications for formation of signals of stable frequency with possibility of sweeping reorganization on frequency and a phase. In the seventh part of article synthesizers of frequency with direct digital synthesis which are released by company Analog Devices are represented.

*В. Макаренко*

*V. Makarenko*

В [1] были рассмотрены основные функциональные схемы приемопередатчиков, характеристики высокочастотных малошумящих усилителей, модуляторов и демодуляторов, смесителей и перемножителей, цифровых повышающих и понижающих преобразователей частоты, логарифмических усилителей, выпускаемых компанией Analog Devices. В седьмой части рассмотрим основные характеристики синтезаторов прямого цифрового синтеза (DDS – Direct Digital Synthesizer). Принципы построения синтезаторов DDS приведены в [2].

Особенностью синтезаторов прямого цифрового синтеза является то, что частота, амплитуда и фаза сигнала, формируемого на их выходе, известны для любого момента времени и могут быть запрограммированы. Параметры таких синтезаторов практически не зависят от температуры и старения элементов. Единственным элементом, который отличается характерной для аналоговых схем нестабильностью, является цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Благодаря отличным техническим характеристикам и высокой скорости перестройки частоты и фазы синтезаторы DDS постепенно вытесняют синтезаторы, построенные на основе системы ФАПЧ.

*Основные преимущества синтезаторов DDS:*

- высокое разрешение по частоте и фазе
- быстрая перестройка частоты (или фазы)
- перестройка по частоте без разрыва фазы и без выбросов напряжения на выходе.

Разрешение по частоте достигает тысячных долей герца для выходной частоты до нескольких десятков мегагерц, что практически недостижимо при других методах синтеза. Другой характерной особенностью синтезаторов DDS является высокая скорость перехода на другую частоту, которая определяется только быстродействием работы цифрового интерфейса и цифровых схем, входящих в состав синтезатора. Третьей особенностью синтезаторов DDS является возможность формирования модулированных сигналов непосредственно в процессе синтеза [2].

В аппаратуре связи синтезаторы частоты, являясь ядром системы настройки, определяют ее основные технические характеристики. Как по техническим, так и экономическим показателям синтезатор DDS удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к синтезатору частоты, обеспечивая высокую степень интеграции,

возможность программного управления и малые габариты.

Современные синтезаторы DDS изготавливают по субмикронной КМОП-технологии с использованием логики с напряжением питания 3 В и миниатюрных корпусов. Цены на них постоянно снижаются. Эти факторы способствуют все более широкому их использованию.

Однако дискретизация и цифро-аналоговое преобразование, которым подвергается сигнал в синтезаторах DDS, накладывают и некоторые ограничения:

- максимальная выходная частота не может быть выше половины тактовой (на практике она еще меньше), но благодаря внедрению новых технологий тактовая частота постоянно возрастает
- отдельные побочные составляющие в спектре сигнала на выходе синтезатора DDS могут быть значительно больше, чем в синтезаторах, построенных на основе системы ФАПЧ, т.к. спектральная чистота выходного сигнала синтезатора DDS зависит от характеристик ЦАП
- потребляемая синтезатором DDS мощность практически прямо пропорциональна тактовой частоте и может достигать единиц ватт для высокочастотных синтезаторов, поэтому при высоких тактовых частотах такие синтезаторы могут оказаться непригодными для устройств с батарейным питанием.

Само название синтезатора DDS подразумевает цифровые методы формирования выходного гармонического сигнала, при этом для формирования аналогового выходного сигнала необходим ЦАП.

Упрощенная структурная схема синтезатора DDS приведена на рис. 1. Выходной квази-гармонический сигнал синтезатора формиру-

ется с помощью ЦАП, на вход которого поступает цифровой код, считываемый из постоянного запоминающего устройства (ПЗУ). В ячейках ПЗУ записаны значения коэффициентов синусоидального сигнала (впрочем, могут быть записаны и коэффициенты сигнала произвольной формы). Точность представления коэффициентов (разрядность записанных чисел) определяет число ступеней аппроксимирующей синусоиду функции и, следовательно, коэффициент гармоник выходного сигнала. Адреса ячеек, из которых осуществляется считывание, формируются регистром RG2.

На каждом такте работы синтезатора в регистр RG2 записывается сумма кодов: предыдущего, сформированного на его выходе, и кода частоты, подаваемого на вход управления синтезатора (вход RG1). Код на выходе регистра RG2 линейно нарастает во времени. Причем шаг приращения кода зависит от величины постоянной добавки – кода частоты. Когда накапливающий сумматор используется для формирования кода фазы, его еще называют аккумулятором фазы. Выходной код аккумулятора фазы представляет собой код мгновенной фазы выходного сигнала. Постоянная добавка, которая используется при работе аккумулятора фазы, представляет собой приращение фазы за один такт работы устройства. Чем быстрее изменяется фаза во времени, тем больше частота генерируемого сигнала. Поэтому значение приращения фазы фактически является кодом выходной частоты. Если код приращения фазы равен, например, двум, то код на выходе аккумулятора будет изменяться вдвое быстрее, чем при значении кода приращения, равном единице. При этом на входы ЦАП коды поступают с той же частотой, но представляют собой не соседние, а взятые через один отсчеты

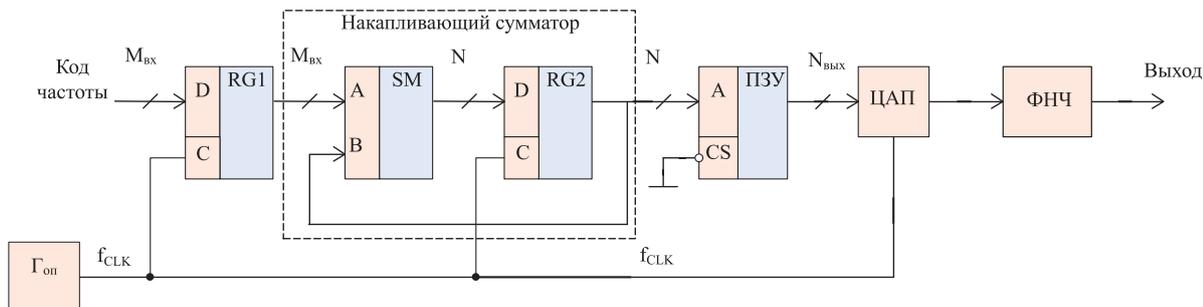
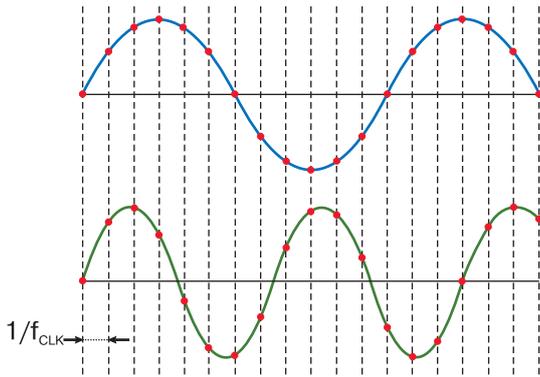


Рис. 1. Упрощенная структурная схема синтезатора прямого цифрового синтеза (DDS)



**Рис. 2. Изменение частоты сигналов при изменении кода приращеня фазы**

функции  $\sin$  (рис. 2). Частота генерируемого сигнала при этом будет вдвое больше, а частота дискретизации останется прежней. На выходе ЦАП формируется квазигармонический сигнал, состоящий из "ступенек". Аналоговый ФНЧ сглаживает "ступеньки" и на его выходе формируется гармонический сигнал.

Аккумулятор фазы работает с периодическими переполнениями, соответствующими периоду синусоидальной функции. Частота выходного сигнала рассчитывается по формуле

$$f_{\text{вых}} = M_{\text{вх}} f_{\text{CLK}} / 2^N,$$

где  $f_{\text{вых}}$  – частота выходного сигнала;  $f_{\text{CLK}}$  – тактовая частота;  $M_{\text{вх}}$  – код частоты;  $N$  – разрядность аккумулятора фазы.

Шаг перестройки частоты равен

$$\Delta f_{\text{вых}} = f_{\text{CLK}} / 2^N.$$

Например, если тактовая частота равна 25 МГц, а разрядность  $N=28$ , то шаг перестройки частоты составит 0.0931 Гц. Увеличивая разрядность накапливающего сумматора, можно уменьшить шаг перестройки частоты.

Рассмотренная выше структурная схема применяется во всех современных синтезаторах DDS. Кроме встроенного ЦАП в состав синтезатора DDS могут входить дополнительные цифровые блоки:

- умножитель опорной частоты
- дополнительный цифровой сумматор для программирования фазы
- инверсный sinc-фильтр для компенсации неравномерности АЧХ

- дополнительный цифровой умножитель для формирования амплитудно-модулированного сигнала
- дополнительный ЦАП для получения квадратурных сигналов I и Q
- дополнительный компаратор с малым дрожанием фронта ("джиттером") для формирования цифрового тактового сигнала
- дополнительные регистры частоты и фазы, которые могут быть заранее запрограммированы для частотной или фазовой манипуляции.

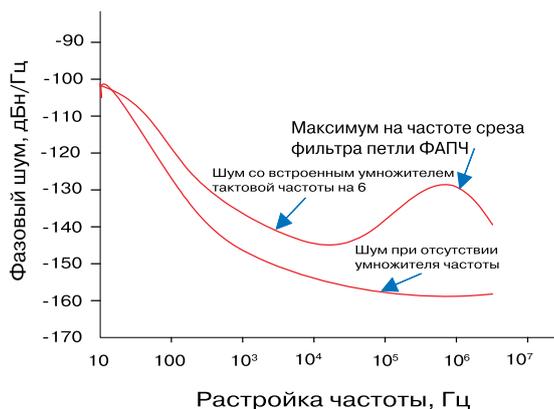
Для того чтобы правильно применять синтезатор DDS, необходимо иметь четкое представление о том, как различные факторы влияют на его выходные характеристики.

Важнейшими характеристиками синтезатора являются: нестабильность частоты (выражается в ppm – промилях), дрожание фронта выходного сигнала (выражается в пико- или наносекундах) и фазовый шум (выражается в дБн/Гц).

Главным источником фазовых шумов является генератор тактового сигнала. Фазовый шум выходного сигнала синтезатора теоретически меньше фазового шума сигнала тактового генератора на  $20\lg(f_{\text{CLK}}/f_{\text{вых}})$  дБ. На практике это улучшение ограничено свойствами схем, входящих в состав синтезатора (типовое значение составляет -130 дБн/Гц при расстройке на 1 кГц от выходной частоты) [2]. Эта величина фазового шума является минимально возможной и носит название "остаточный фазовый шум".

Некоторые типы высокочастотных синтезаторов DDS содержат встроенный умножитель частоты на основе системы ФАПЧ (в синтезаторах фирмы Analog Devices AD9852 и AD9854 коэффициент умножения тактовой частоты может быть установлен от 4 до 20, в AD9851 он составляет 6, а в AD9912 равен 2). Однако умножение частоты вызывает увеличение фазового шума [3], что иллюстрирует рис. 3 [3].

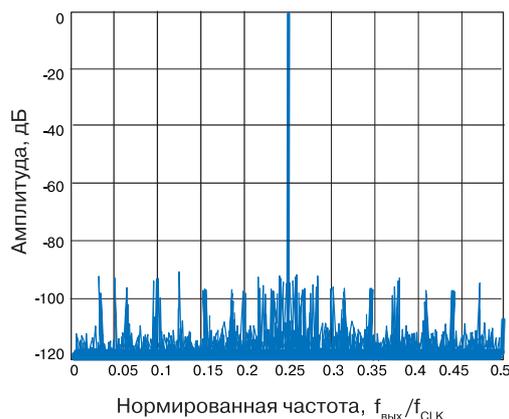
Аккумуляторы фазы выпускаемых синтезаторов DDS имеют разрядность 28, 32 или 48 бит. Но только часть разрядов используется для адресации ПЗУ, в которое записаны коэффициенты синуса. Это вынужденная мера, связанная с необходимостью уменьшения объема ПЗУ. Если использовать, например, 32 бита



**Рис. 3. Зависимость фазового шума синтезатора DDS от способа формирования тактового сигнала**

адреса ПЗУ и десятиразрядное представление каждого отсчета, то понадобилось бы ПЗУ емкостью  $2^{32} \cdot 10 = 42\,949\,672\,960 \approx 43$  Гбит. Поэтому для адресации ПЗУ используется только несколько старших разрядов кода, формируемого на выходе аккумулятора фазы. Усечение кода фазы выполняется по алгоритму, заложенному при проектировании синтезатора, и внешними сигналами изменить этот алгоритм невозможно. Отбрасывание младших разрядов кода адреса приводит к возникновению ошибки в представлении фазы. Как следствие, при преобразовании фазы в амплитуду выходного сигнала появляется погрешность. Эта погрешность является периодической, так как в зависимости от кода частоты одно и то же состояние аккумулятора фазы повторяется чаще или реже. В результате в спектре выходного сигнала синтезатора появляются дискретные составляющие, вызванные усечением кода фазы. Значения амплитуды и фазы этих составляющих зависят от разрядности аккумулятора фазы ( $N$ ), разрядности слова фазы после усечения ( $N_{yc}$ ) и значения кода частоты ( $M_{вх}$ ).

Максимальный уровень этих составляющих приблизительно можно рассчитать по формуле  $U_{дс} = -6.02 \times N_{yc}$  дБ [2, 3]. Например, при  $N_{yc} = 15$  максимальный уровень этих составляющих приблизительно равен -90 дБ. Причем наихудшим является случай, когда в отбрасываемой части кода фазы старший бит равен 1, а все остальные биты – 0. Дополнительные составляющие в спектре будут отсутствовать при условии, что в отбрасываемой части кода все составляющие равны нулю.



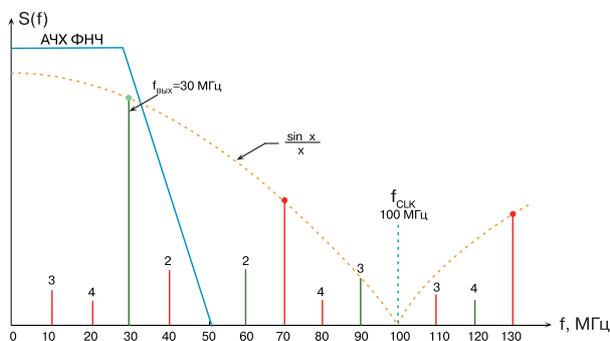
**Рис. 4. Спектр выходного сигнала при усечении длины кода аккумулятора фазы до 15 бит**

В [4] приведен спектр выходного сигнала синтезатора DDS при  $N_{yc} = 15$  (рис. 4).

Максимальная выходная частота не может быть выше половины тактовой частоты  $f_{CLK}$ . Это объясняется эффектами наложения (aliasing) спектральных составляющих формируемого сигнала (основной частоты и ее гармоник) и комбинационных составляющих, возникающих из-за дискретизации сигнала. Это положение иллюстрирует рис. 5. На выходе ЦАП формируется сигнал частотой 30 МГц (тактовая частота синтезатора равна 100 МГц). Огибающая спектра сигнала на выходе ЦАП изменяется по закону  $(\sin x)/x$  и амплитуду сигнала можно определить по формуле

$$A(f_{\text{ВЫХ}}) = \left( \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot f_{\text{ВЫХ}}}{f_{\text{CLK}}}\right)}{\frac{\pi \cdot f_{\text{ВЫХ}}}{f_{\text{CLK}}}} \right),$$

где  $A(f_{\text{ВЫХ}})$  – амплитуда сигнала на выходе ЦАП на заданной частоте. На частоте Найквиста, равной половине частоты дискретизации, спад амплитуды сигнала составляет 3.92 дБ.



**Рис. 5. Распределение частот в спектре выходного сигнала синтезатора DDS**

Таблица 1. Основные характеристики синтезаторов DDS

Тип	Макс. такт. частота, МГц	Длина управл. слова, бит	Число разрядов ЦАП	SFDR в узкой полосе, дБ/центр. частота, МГц /полоса частот, МГц *	Макс. потребл. мощность, мВт	Интерфейс	Напряжение питания, В	Корпус
AD5930	50	24	10	76/1/0.4	37	послед.	2.3...5.5	20-TSSOP
AD5932	50	24	10	74/1/0.4	37	послед.	2.3...5.5	16-TSSOP
AD9830	50	32	10	72/2/0.5	300	парал.	5	48-TQFP
AD9831	25	32	10	72/1/0.5	40	парал.	3...5	48-TQFP
AD9832	25	32	10	72/1/0.5	45	послед.	3...5	16-TSSOP
AD9833	25	28	10	78/1/0.2	20	послед.	2.3...5.5	10-MSOP
AD9834	50	28	10	78/1/0.2	25	послед.	2.3...5.5	20-TSSOP
AD9835	50	32	10	72/1/0.5	200	послед.	5	16-TSSOP
AD9850	125	32	10	80/40.1/0.5	480	пар./послед.	3.3...5	28-SSOP
AD9851	180	32	10	85/40.1/0.5	650	пар./послед.	3.3...5	28-SSOP
AD9852	300	48	12	83/10/1	2200	пар./послед.	3.3	80-LQFP
AD9854	300	48	12	83/10/1	2200	пар./послед.	3.3	80-LQFP
AD9858	1000	32	10	80/40/1	1900	пар./послед.	3.3	100-EPAD
AD9859	400	32	10	80/160/0.1	200	послед.	1.8	48-TQFP
AD9910	1000	32	14	87/201.1/0.5	730	пар./послед.	1.8, 3.3	100-TQFP_EP
AD9911	500	32	10	83/200.3/0.25	350	послед.	1.8	56-LFCSP
AD9912	1000	48	14	86/398.7/0.25	897	послед.	1.8, 3.3	64-LFCSP
AD9913	250	32	10	80/100/0.1	100	пар./послед.	1.8	32-LFCSP
AD9951	400	32	14	80/160/0.1	200	послед.	1.8	48-TQFP
AD9952	400	32	14	80/160/0.1	200	послед.	1.8	48-TQFP
AD9953	400	32	14	80/160/0.1	200	послед.	1.8	48-TQFP
AD9954	400	32	14	80/160/0.1	200	послед.	1.8	48-TQFP
AD9956	400	48	14	85/120/0.25	400	послед.	1.8, 3.3	48-LFCSP
AD9958	500	32	10	83/200.3/0.25	420	послед.	1.8, 3.3	56-LFCSP
AD9959	500	32	10	83/200.3/0.25	680	послед.	1.8, 3.3	56-LFCSP

\* Динамический диапазон, измеренный в узкой полосе, симметричной относительно центральной частоты.

Так как разрядность ЦАП ограничена и его амплитудная характеристика нелинейна, то сигнал на его выходе искажен и в спектре кроме первой присутствуют вторая и более высокие гармоники сигнала (на рис. 5 показаны зеленым цветом) и комбинационные составляющие (на рис. 5 показаны красным цветом) тактовой частоты  $f_{CLK}$  и гармоник сигнала  $f_i = f_{CLK} \pm n f_{вых}$ , где  $n$  – номер гармоники выходного сигнала [4]. Так как спектры сигнала и комбинационных искажений перекрываются, то разделить их с помощью ФНЧ невозможно. Поэтому желательно ограничить выходную частоту синтезатора величиной  $f_{CLK}/3$ , чтобы комбинационная составляющая с частотой  $(f_{CLK} - f_{вых})$ , имеющая самый большой уровень, лежала выше частоты Найквиста и ее можно было подавить с помощью ФНЧ.

На рис. 6 показана зависимость динамического диапазона неискаженного сигнала (в англоязычной литературе SFDR) от частоты дискретизации для синтезатора DDS с 10-разряд-

ным ЦАП на выходе. Частота среза ФНЧ поддерживается равной половине тактовой частоты.

Тактовая частота и число разрядов выходного ЦАП определяют максимально достижимые частоту и коэффициент гармоник синтезированного сигнала. В табл. 1 приведены ос-

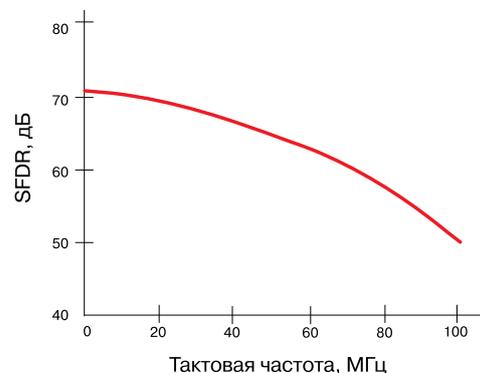


Рис. 6. Зависимость SFDR выходного сигнала синтезатора DDS от тактовой частоты

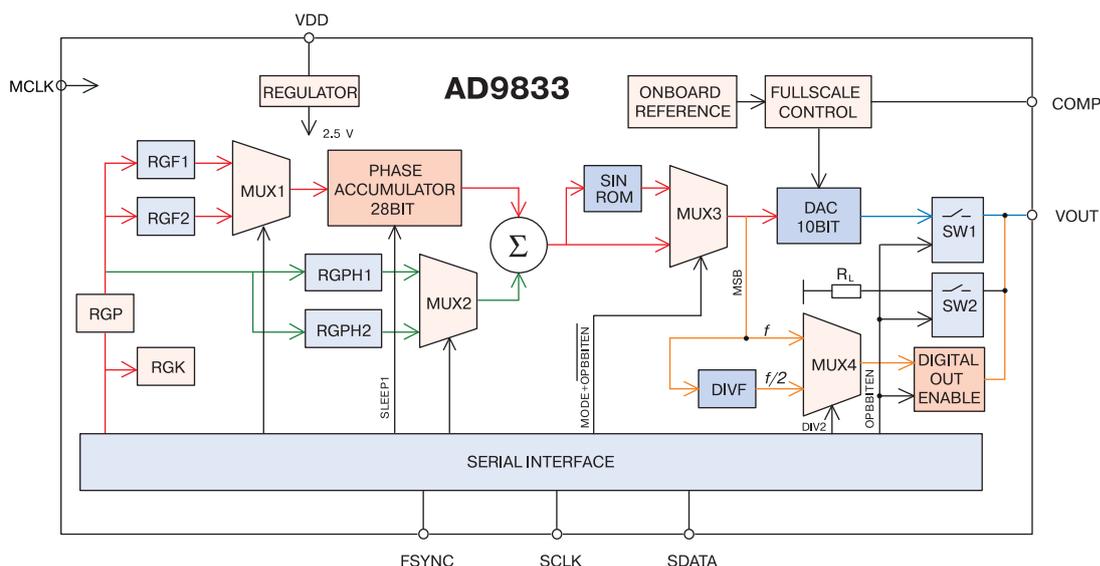


Рис. 7. Функциональная схема синтезатора прямого цифрового синтеза AD9833

новные характеристики синтезаторов DDS, выпускаемых фирмой Analog Devices. Приведенные в таблице синтезаторы, характеристики которых совпадают, различаются функциональными возможностями.

Рассмотрим более подробно характеристики некоторых синтезаторов. Синтезаторы AD9833/AD9834 характеризуются очень низким потреблением мощности – 20 и 25 мВт соответственно, что позволяет использовать эти ИМС в переносной малогабаритной аппаратуре.

Функциональная схема AD9833 приведена на рис. 7 [5]. Последовательный код приращения частоты и фазы вводится в синтезатор через последовательный интерфейс (SERIAL INTERFACE) и переписывается во внутренний параллельный 14-разрядный регистр (RGP) и регистр управления (CONTROL REGISTER). Из регистра RGP информация поочередно записывается в два регистра хранения кода частоты (RGF1 и RGF2) и два регистра хранения кода фазы (RGPH1 и RGPH2). Благодаря такой организации синтезатор может формировать на выходе следующие сигналы: гармонический, частотно- или фазо-манипулированный. Для формирования гармонического сигнала информация в аккумулятор фазы (PHASE ACCUMULATOR) записывается только из одного регистра частоты через первый мультиплексор (MUX1).

Выходной код аккумулятора фазы в сумматоре  $\Sigma$  складывается с кодом начальной фазы,

считываемым из первого регистра фазы (RGPH1). Сформированный таким образом код поступает на адресные входы ПЗУ (SIN ROM), в котором записаны коэффициенты синуса, и параллельно подается на входы третьего мультиплексора MUX3. Выходной сигнал мультиплексора подается на вход цифро-аналогового преобразователя (DAC). Если к выходу MUX3 подключен выход SIN ROM, то на выходе DAC формируется гармонический сигнал, а если к выходу MUX3 подключен выход сумматора – треугольный (рис. 8).

Синтезатор позволяет формировать на выходе прямоугольные импульсы, частота следования которых равна частоте гармонического сигнала либо в два раза ниже ее. Для формирования прямоугольных импульсов используется сигнал MSB старшего разряда кода, формируемого на выходе третьего мультиплексора, делитель частоты на два (DIVF) и четвертый мультиплексор (MUX4). Выбор частоты следования прямоугольных импульсов осуществляется сигналом DIV2. Если значение сигнала DIV2 равно единице, на выход MUX4 поступает сигнал с выхода делителя частоты. Управление выходными каскадами синтезатора осуществляется сигналом OPBITEN. Если его значение равно нулю, аналоговые ключи SW1 и SW2 разомкнуты, а выход VOUT соединяется с выходом MUX4 через схему подключения цифрового сигнала (DIGITAL OUT ENABLE), которая имеет три состояния выхода. Если значение сигнала OPBITEN равно единице,

схема DIGITAL OUT ENABLE переходит в третье состояние, а ключи SW1 и SW2 замыкаются. При этом выход VOUT соединяется с выходом ЦАП и резистором нагрузки  $R_L$ .

В табл. 2 приведены значения управляющих сигналов при различных формах выходного сигнала синтезатора.

Для формирования частотно-манипулированного сигнала на вход управления первого мультиплексора MUX1 подаются сигнал управления, частота изменения которого задает частоту манипуляции. Значения верхней и нижней частот заносятся в регистры RGF1 и RGF2, соответственно.

Формирование фазо-манипулированного сигнала осуществляется аналогично. Значения начальной и конечной фаз записываются в регистры RGPН1 и RGPН2, соответственно. Частота переключения смесителя MUX2 определяет скорость манипуляции фазы.

Синтезатор позволяет сформировать частотно- или фазо-манипулированный сигнал для любой формы выходного колебания.

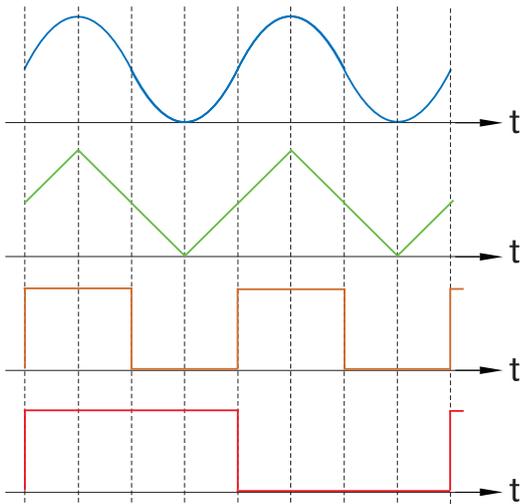


Рис. 8. Сигналы различной формы, формируемые на выходе AD9833

Таблица 2. Выходные сигналы синтезатора AD9833

Значение управляющих сигналов			Форма выходного сигнала
OPBITEN	MODE	DIV2	
0	0	X	синус
0	1	X	треугольник
1	0	0	прямоугольник с частотой $f/2$
1	0	1	прямоугольник
1	1	X	зарезервировано

Кроме перечисленных узлов синтезатор AD9833 содержит встроенный стабилизатор напряжения 2.5 В (REGULATOR) и источник опорного напряжения (ON BOARD REFERENCE), обеспечивающие стабильную работу при изменении напряжения питания.

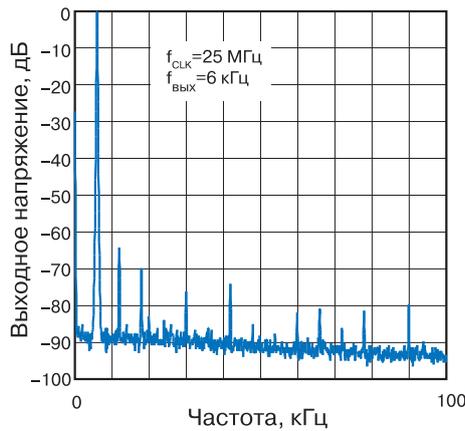
Управление всеми режимами работы AD9833 осуществляется сигналами, формируемыми на выходе регистра управления, а синхронизация всех регистров – сигналом MCLK (Master Clock), формируемым внешним генератором. Максимальная частота сигнала MCLK составляет 25 МГц.

При инициализации синтезатора в управляющий регистр записывается кодовое слово, содержащее все необходимые атрибуты. Хотя регистр 16-разрядный, для управления используются только младшие четырнадцать разрядов. Старшие разряды DB14 и DB15 зарезервированы для разрешения записи в первый или второй регистры кода частоты. Если код, хранимый в разрядах DB15, DB14 регистра, равен 01, запись ведется в регистр RGF1, а если 10 – то в RGF2. Если код в DB15, DB14 равен 11, то производится запись кода в регистры фазы RGPН1 (DB13=0) или RGPН2 (DB13=1). Значения OPBITEN, DIV2 и MODE записываются в разряды DB5, DB3 и DB1 регистра управления. Подробную информацию о значении кода управляющего слова можно найти в [5].

Частота сигнала, формируемого на выходе VOUT, рассчитывается по формуле  $f_{OUT} = (f_{MCLK} / 2^{28} \cdot N_{RGF})$ , где  $f_{MCLK}$  – частота сигнала MCLK,  $N_{RGF}$  – значение кода, записанного в регистр частоты.

Фазовый сдвиг выходного сигнала можно найти из соотношения  $\phi_{OUT} = (2\pi / 4096) \cdot N_{RGPН}$ , где  $\phi_{OUT}$  – фазовый сдвиг выходного сигнала,  $N_{RGPН}$  – значение кода, записанного в регистр хранения кода фазы.

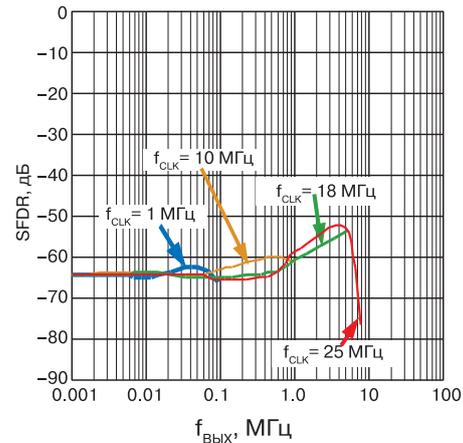
Спектр на выходе AD9833 в режиме формирования гармонического сигнала показан на



**Рис. 9. Спектр сигнала на выходе AD9833 при формировании гармонического сигнала**

рис. 9. Как следует из приведенного спектра, уровень второй и более высоких гармоник (при частоте тактового сигнала 25 МГц и частоте выходного сигнала 6 кГц) не превышает значения -60 дБ. Для других значений выходной и тактовой частоты это соотношение тоже справедливо [5].

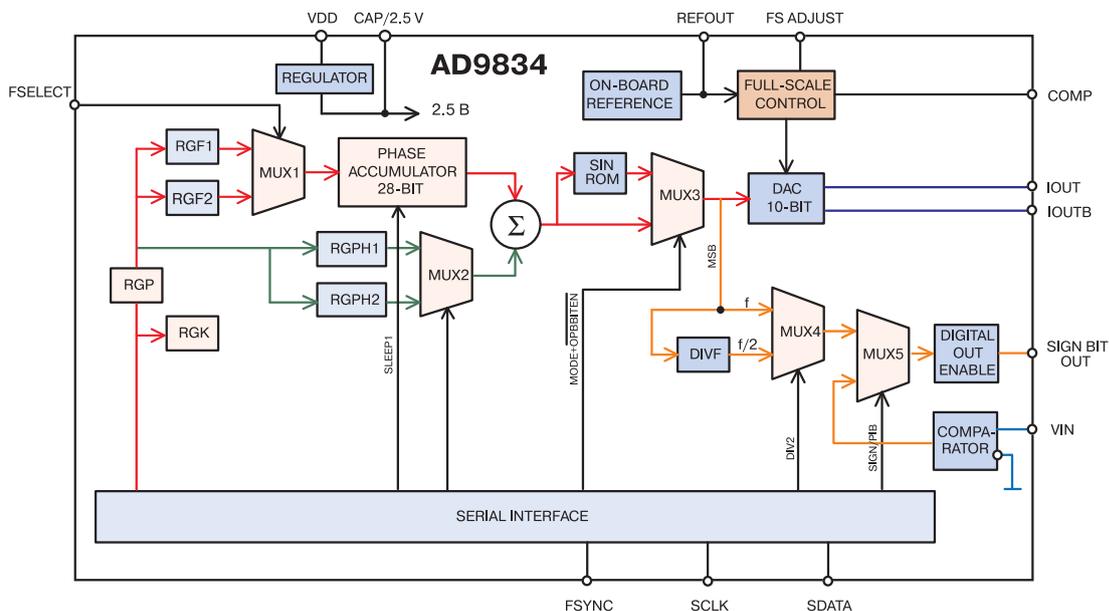
Зависимости величины динамического диапазона неискаженного сигнала AD9833 от частоты выходного сигнала, измеренные в широкой полосе при различных тактовых частотах, приведены на рис. 10. Из графиков следует, что при выходных частотах, превышающих 1 МГц, наблюдается рост искажений до величины -52 дБ.



**Рис. 10. Зависимости динамического диапазона неискаженного сигнала AD9833 от частоты выходного сигнала**

Управление синтезатором осуществляется через последовательный интерфейс, совместимый с большинством сигнальных процессоров и микроконтроллеров. Примеры схем подключения AD9833 к микроконтроллерам и сигнальным процессорам приведены в [5].

Характеристики другого маломощного синтезатора AD9834 во многом совпадают с характеристиками AD9833. Отличается AD9834 максимальной тактовой частотой, которая равна 50 МГц, и дополнительными функциональными возможностями. Функциональная схема AD9834 приведена на рис. 11. Она во



**Рис. 11. Функциональная схема синтезатора прямого цифрового синтеза AD9834**

многим совпадает со схемой AD9833. Схема AD9834 имеет четыре основных отличия:

- токовый выход аналогового (гармонического и треугольного) сигнала выполнен парафазным (выходы IOUT и IOUTB) и отделен от выхода цифрового сигнала SIGN BIT OUT
- на выходе цифрового сигнала в AD9834 могут формироваться такие же сигналы, как в AD9833, и, кроме того, импульсный сигнал с частотой, задаваемой сигналом, подаваемым на вход VIN
- вход управления первого мультиплексора доступен для управления внешним сигналом
- в схему дополнительно введена регулировка максимального выходного тока ЦАП (Full-Scale Adjust Control).

Дополнительный вход управления первым мультиплексором FSELECT позволяет осуществлять частотную манипуляцию выходного колебания синтезатора внешним сигналом.

Наличие входа VIN дает возможность использовать внутренний компаратор синтезатора для преобразования внешнего сигнала произвольной формы в последовательность прямоугольных импульсов, которая через пятый мультиплексор (MUX5) и схему DIGITAL OUT ENABLE поступает на выход SIGN BIT OUT. Пятый мультиплексор позволяет подключать

к выходу либо внутренний импульсный сигнал, сформированный на выходе MUX4, либо внешний, сформированный на выходе компаратора. Отключение цифрового выхода осуществляется подачей сигнала OPBBITEN на вход управления схемы DIGITAL OUT ENABLE.

Максимальный выходной ток ЦАП AD9834 определяется по формуле

$$I_{OUT\ FULLSCALE} = 18U_{REFOUT} / R_{SET},$$

где  $U_{REFOUT} = 1.2\ В$  – напряжение внутреннего источника опорного напряжения,  $R_{SET}$  – сопротивление резистора, включенного между выводом FS ADJUST и общим проводом аналоговой части схемы, рекомендуемое значение которого равно 6.8 кОм.

Рассмотрим характеристики высокочастотных синтезаторов AD9958 и AD9959, максимальная тактовая частота которых (табл. 1) составляет 500 МГц. Функциональная схема ИМС AD9958 приведена на рис. 12 [6].

В синтезатор AD9958 встроен умножитель частоты (REF CLOCK MULTIPLIER), построенный на основе системы ФАПЧ, с коэффициентом умножения тактовой частоты от 4 до 20. Сигнал опорной частоты (REF CLK) через буферный усилитель (BUFFER/XTAL OSCILLATOR) подается на первый вход мультиплексора (MUX) и на вход умножителя частоты.

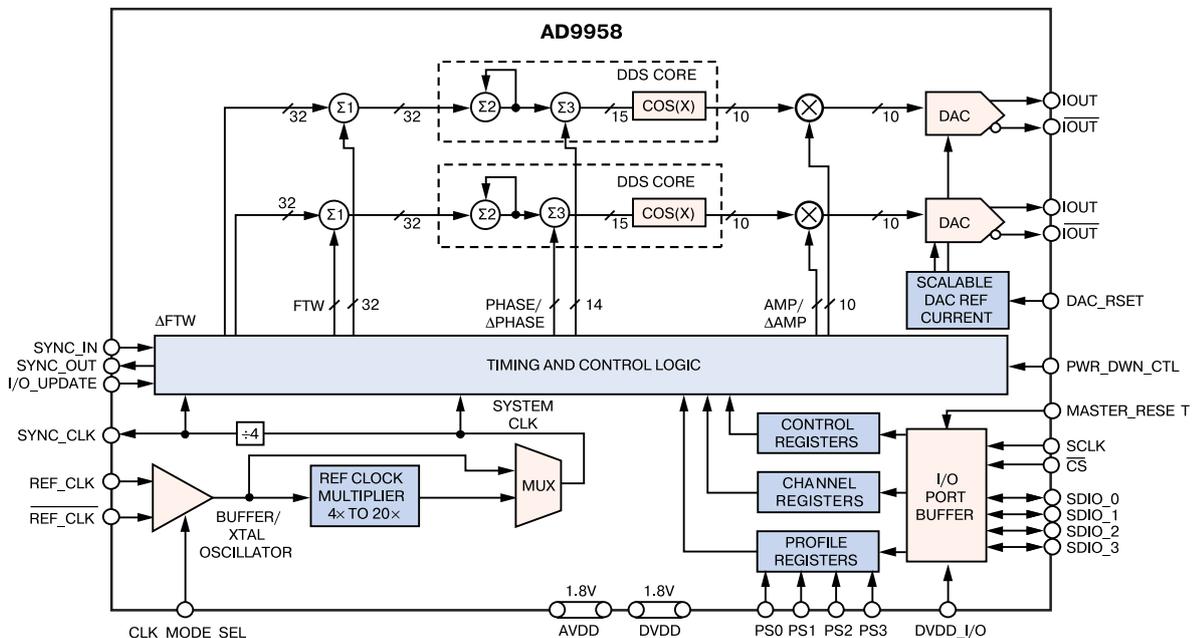


Рис. 12. Функциональная схема синтезатора AD9958

Выход умножителя частоты соединен со вторым входом мультиплексора. Такое построение схемы дает возможность сформировать на выходе мультиплексора системную тактовую частоту (SYSTEM CLK), равную опорной частоте или превышающую ее в 4...20 раз. Для синхронизации работы внешних устройств на выходе SYNC\_CLK с помощью делителя частоты на 4 ( $\div 4$ ) формируется сигнал с частотой, в 4 раза меньшей системной тактовой частоты.

Основной особенностью синтезатора AD9958 является наличие двух синхронных каналов цифрового синтеза, в каждом из которых можно автономно задать частоту, фазу и амплитуду выходного сигнала. Переходное затухание между каналами во всем диапазоне частот составляет не менее 75 дБ. В синтезаторе предусмотрен режим линейной перестройки частоты, фазы и амплитуды сигнала, что позволяет сформировать частотно-, фазо- или амплитудно-манипулированные сигналы. Для любого из режимов манипуляции предусмотрено 16 дискретных значений. Программирование максимального тока выходных 10-разрядных ЦАП осуществляется независимо. Разрешение по частоте определяется 32-разрядным кодом, а по фазе – 16-разрядным. Пропускная способность входного порта (I/O Port) с интерфейсом SPI составляет 800 Мбит/с. Переход синтезатора в режим энергосбережения может осуществляться как программно, так и подачей управляющего сигнала на вход PWR\_DWN\_CTL.

Выходная частота синтезатора может быть рассчитана по формуле  $f_0 = N_{FTW} \cdot f_s / 2^{32}$ , где  $N_{FTW}$  – значение кода настройки выходной частоты (FTW – Frequency Tuning Word), для которого выполняется условие  $0 \leq N_{FTW} \leq 2^{32}$ ,  $f_s$  – системная тактовая частота,  $2^{32}$  – емкость фазового аккумулятора.

На входы первых сумматоров ( $\Sigma 1$ ) в каждом канале подаются коды FTW и  $\Delta FTW$ . Код  $\Delta FTW$  определяет значение приращения частоты относительно заданного значения  $N_{FTW}$ . Выходной код первого сумматора подается на вход аккумулятора фазы, который на рис. 12 обозначен  $\Sigma 2$ . Подробная функциональная схема аккумулятора фазы приведена в [6]. Формирование фазового сдвига выходного сигнала осуществляется с помощью третьего сумматора, на один вход которого подается код частоты

с выхода фазового аккумулятора, а на второй – значение кода фазы (PHASE/ $\Delta$ PHASE), задаваемых в каждом канале автономно. На выходе третьего сумматора 32-разрядный код усекается до 15 разрядов и подается на адресные входы постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), в котором хранится форма выходного сигнала. На рис. 12 ПЗУ обозначено как cos(x).

Регулировка амплитуды выходного сигнала осуществляется с помощью цифровых 10-разрядных перемножителей (на рис. 12 обозначен знаком  $\otimes$ ), выходной код которых подается на входы данных ЦАП. Код управления амплитудой выходного сигнала (AMP/ $\Delta$ AMP) формируется устройством управления (TIMING AND CONTROL LOGIC). В результате на парафазных выходах ЦАП формируются токи гармонической формы.

Наличие двух независимых синхронных каналов формирования сигналов дает возможность синтезировать с помощью AD9958 квадратурные сигналы, сигналы для акустических и радиолокаторов, сигналы несущей частоты для однопольных амплитудных модуляторов и др.

Спектр сигнала, измеренный на выходе AD9958 при тактовой частоте 500 МГц и частоте выходного сигнала 75 МГц, приведен на рис. 13. Как следует из рисунка, уровень второй гармоники не превышает -60 дБ, а уровень комбинационных искажений – -70 дБ. В [6] можно найти графики спектров для различных значений выходной частоты. Анализ приведенных в [6] спектров показывает, что с понижением частоты выходного сигнала уровень гармонических искажений снижается, хотя и

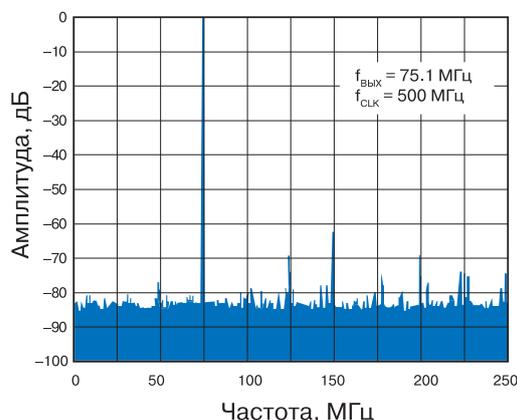
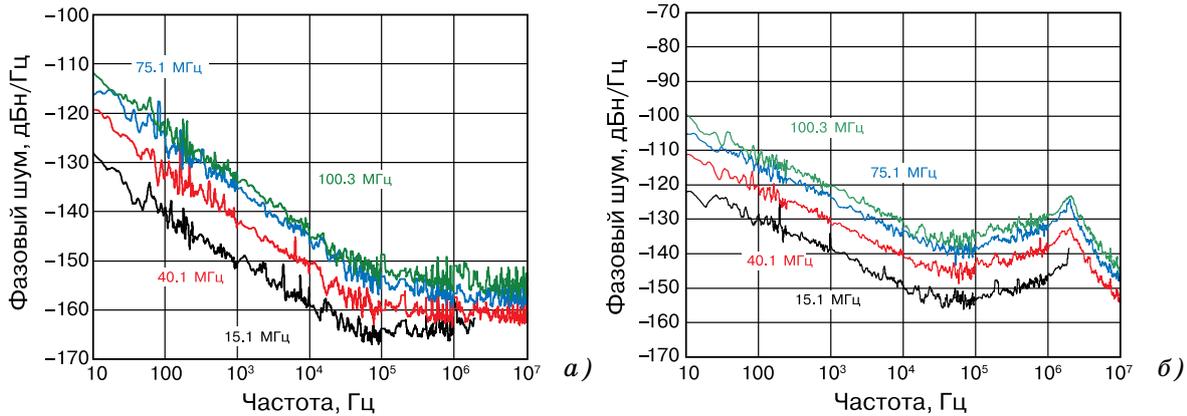


Рис. 13. Спектр сигнала на выходе AD9958



**Рис. 14. Графики зависимости уровня фазового шума от частоты выходного сигнала без умножения тактовой частоты (а) и при ее умножении на 5 (б)**

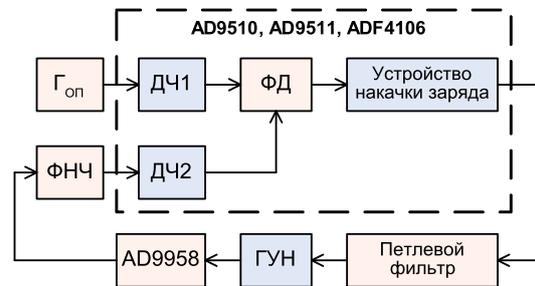
незначительно. Например, уровень второй гармоники сигнала частотой 15.1 МГц при тактовой частоте 500 МГц не превышает -70 дБ при анализе в полосе частот 250 МГц. При анализе в узкой полосе частот ( $\pm 0.5$  МГц относительно выходной частоты) уровень побочных составляющих лежит ниже значения -90 дБ.

Как уже отмечалось, уровень фазового шума зависит от коэффициента умножения встроенного умножителя частоты, построенного с использованием системы ФАПЧ. Графики рис. 14 иллюстрируют это положение [6]. На рисунке приведены спектры фазового шума для различных значений частоты выходного сигнала при выключенном умножителе частоты (рис. 14, а) и коэффициенте умножения частоты, равном 5 (рис. 14, б). Как следует из графиков, увеличение уровня фазового шума составляет 10...12 дБ при использовании умножителя частоты на 5. При коэффициенте умножения частоты, равном 20, уровень фазового шума возрастает еще на 10 дБ.

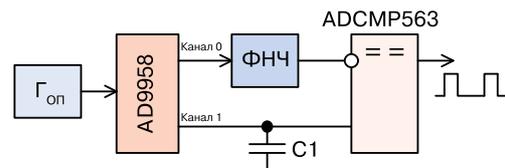
В [6] приведены вызывающие интерес примеры использования двухканального синтезатора AD9958. В одном из примеров предлагается использовать синтезатор прямого цифрового синтеза в петле обратной связи синтезатора с ФАПЧ для точной подстройки частоты и фазы выходного колебания генератора, управляемого напряжением (ГУН). На рис. 15 приведена функциональная схема синтезатора, построенного на основе системы ФАПЧ, с DDS-синтезатором в петле обратной связи. В качестве базового синтезатора с ФАПЧ можно использовать ИМС AD9510, AD9511 или ADF4106. Синтезатор прямого цифрового синтеза вклю-

чен между выходом ГУН и входом второго делителя частоты. Сигнал ГУН синхронизирует работу AD9958, а частота и фаза выходного сигнала DDS-синтезатора будут, в свою очередь, определять частоту и фазу сигнала на выходе ГУН.

Во втором примере (рис. 16) двухканальный синтезатор используется для построения генератора импульсов с точной подстройкой длительности и частоты импульсов. Выходной сигнал канала 0 через ФНЧ подключен к инвертирующему входу компаратора ADCMP563, ко второму входу которого подводится сигнал с выхода канала 1. Кон-



**Рис. 15. Функциональная схема синтезатора с системой ФАПЧ и прецизионной регулировкой частоты и фазы выходного сигнала**



**Рис. 16. Схема генератора импульсов с прецизионной регулировкой их длительности, построенного на базе 2-канального источника AD9958**

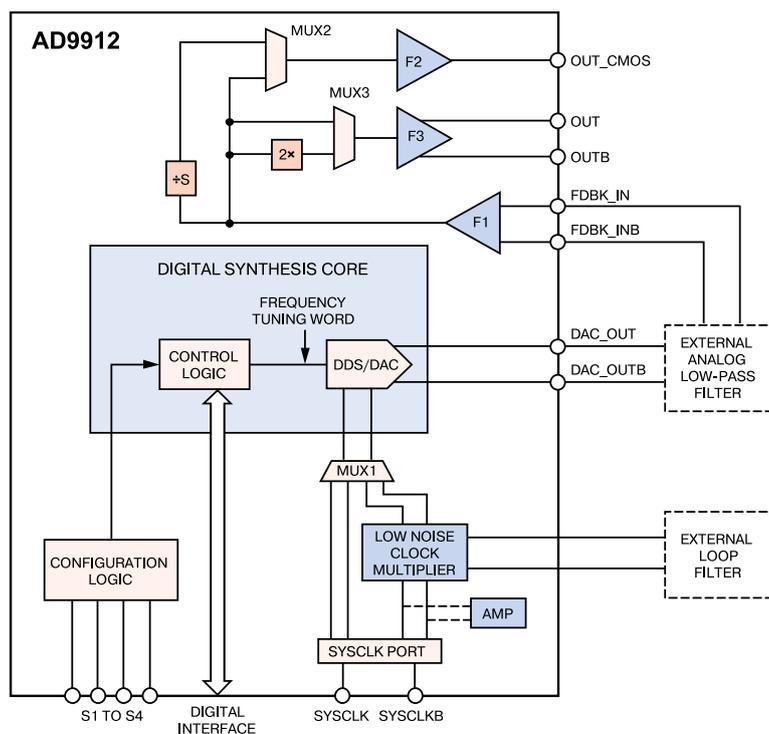


Рис. 17. Упрощенная функциональная схема синтезатора AD9912

денсатор С1 фактически выполняет функцию ФНЧ. Компаратор ADCMP563 позволяет формировать импульсы с минимальной длительностью 700 пс, длительностью фронта и спада около 500 пс. Максимальная частота переключения компаратора 1.5 ГГц. Если задать частоту сигналов на выходах нулевого и первого каналов одинаковой, то, изменяя фазовый сдвиг между этими сигналами, можно регулировать длительность и начальную фазу импульса в широких пределах с высокой точностью.

Синтезатор AD9959 построен по такой же схеме, как и AD9958, но в отличие от него имеет 4 канала независимого синтеза. Все остальные характеристики этих синтезаторов идентичны за исключением энергопотребления, которое выше в четырехканальном синтезаторе (табл. 1).

Рассмотрим ИМС одного из самых высокочастотных синтезаторов AD9912, упрощенная функциональная схема которой приведена на рис. 17 [7]. Максимальная тактовая частота этого синтезатора равна 1 ГГц, что позволяет формировать на его выходе гармонический сиг-

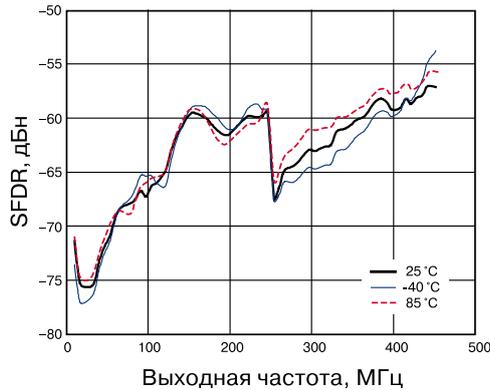
нал частотой до 400 МГц. Выходной 14-разрядный ЦАП позволяет обеспечить низкий уровень искажений на выходе синтезатора, а 48-разрядный код перестройки частоты – точность перестройки частоты 4 мкГц. Гибкая система коммутации и формирования сигналов тактовой частоты дает возможность использовать сигналы как встроенного кварцевого генератора с частотой от 10 до 50 МГц, так и внешнего источника опорной частоты. Малошумящий умножитель частоты (LOW NOISE CLOCK MULTIPLIER), построенный на основе ФАПЧ, с коэффициентом умножения от 4 до 66 позволяет работать с источником опорной частоты от 11 до 200 МГц.

Синтезатор снабжен высококачественным выходным HSTL-драйвером \*, который обеспечивает формирование сигналов в диапазоне частот до 750 МГц.

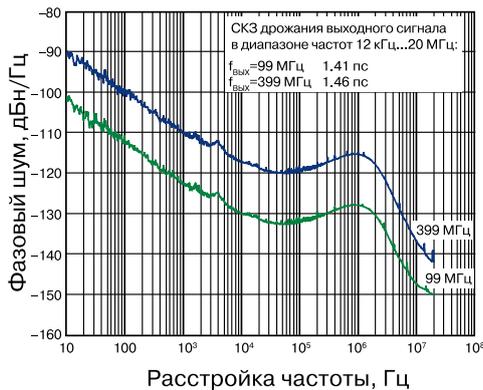
Синтезатор содержит ядро (DIGITAL SYNTHESIS CORE), функциональная схема которого аналогична схемам описанных выше синтезаторов, умножитель частоты на основе ФАПЧ и первый мультиплексор (MUX1), предназначенный для коммутации сигналов тактовой частоты.

Дополнительно ИМС AD9912 содержит второй (MUX2) и третий (MUX3) мультиплексоры, умножитель частоты на 2 (2×), делитель частоты с коэффициентом деления S (÷S) и три высокочастотных формирователя импульсов (F1...F3). Выходной гармонический сигнал с выхода ЦАП через внешний ФНЧ и формирователь F1 подается на входы второго и третьего мультиплексоров. На второй вход третьего мультиплексора сигнал подается через умножитель частоты на два. Такое построение схемы позволяет формировать с помощью HSTL-драйвера F3 на выходах FDBK\_IN и FDBK\_INB сигналы логического уровня в диапазоне частот до 725 МГц, в то время как на выходе ЦАП верхняя частота сигнала ограничена величиной 400 МГц.

\* HSTL (High-Speed Transceiver Logic) – независимый от технологии изготовления ИМС стандарт высокочастотных сигналов связи между микросхемами с уровнями, лежащими в диапазоне напряжений от 0 до 1.5 В.



**Рис. 18. Зависимости динамического диапазона неискаженного сигнала AD9912 от частоты выходного сигнала и температуры окружающей среды**



**Рис. 19. Зависимости фазового шума AD9912 от частоты выходного сигнала**

Для управления логическими схемами КМОП-сигнал формируется с помощью делителя частоты S, второго мультиплексора и формирователя F2. Коэффициент деления S может изменяться в диапазоне от 1 до 65 535 (режим 1) или от 2 до 131 070 (режим 2). Мультиплексор MUX2 дает возможность выбирать либо сигнал с выходной частотой синтезатора, либо сигнал с выхода делителя S. Такая схема обеспечивает возможность одновременного формирования сигналов трех частот: основного – на выходе ЦАП, с удвоенной частотой – на выходах F3 и с частотой  $f_{\text{вых}}/S$  – на выходе OUT\_CMOS. Диапа-

зон частот сигналов, формируемых на выходе OUT\_CMOS, 0.008...150 МГц.

На рис. 18 показаны графики зависимости динамического диапазона неискаженного сигнала от частоты выходного сигнала и от температуры окружающей среды. Из рисунка следует, что динамический диапазон неискаженного сигнала уменьшается с ростом частоты выходного сигнала. На рис. 19 приведены зависимости фазового шума от частоты выходного сигнала при различных расстройках частоты [7]. При расстройке частоты относительно центрального значения на 20 МГц дрожание фронта выходного сигнала синтезатора AD9912 не превышает 1.46 пс.

В каждом из синтезаторов, приведенных в табл. 1, имеются свои особенности. Подробно с характеристиками этих ИМС, примерами их применения, принципами функционирования можно ознакомиться на странице web-сайта Analog Devices [8].

С другими компонентами для построения беспроводных устройств связи мы познакомим читателей в последующих публикациях.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Макаренко В. Компоненты для построения беспроводных устройств связи, части 1...6 // ЭКИС – Киев: VD MAIS, 2009, №№ 3, 4, 5, 6, 9, 11.
2. Макаренко В. Синтезаторы частоты прямого цифрового синтеза, части 1, 2 // ЭКИС – Киев: VD MAIS, 2004, №№ 1, 2.
3. [http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/450968421DDS\\_Tutorial\\_rev12-2-99.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/450968421DDS_Tutorial_rev12-2-99.pdf).
4. <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-085.pdf>.
5. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD9833.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9833.pdf).
6. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD9958.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9958.pdf).
7. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD9912.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9912.pdf).
8. <http://search.analog.com/search/default.aspx?query=DDS&local=en>.