

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ШИРОКОПОЛОСНЫЙ СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТЫ СО ВСТРОЕННЫМ ГУН



В статье рассматривается новый широкополосный высокочастотный синтезатор частоты на основе системы ФАПЧ со встроенным ГУН, выпускаемый компанией Analog Devices. Синтезатор обеспечивает широкий диапазон перекрытия по частоте и может работать в режимах с целочисленными или дробными коэффициентами деления встроенных счетчиков.

UNIVERSAL BROADBAND SYNTHESIZER OF FREQUENCY WITH BUILT IN VCO

Abstract – In article the new broadband high-frequency synthesizer of frequency on the basis of system PLL with built in VCO, produced by company Analog Devices, main features are given. The synthesizer provides a wide range of overlapping of frequency and can work in modes with integer or fractional factors of division of the built in counters.

В. Макаренко, Б. Паращак

V. Makarenko, B. Paraschak

Бурное развитие систем связи и цифрового телевидения вызывает необходимость увеличения скорости передачи данных, что в большинстве случаев ведет к расширению полосы частот, занимаемой каналом, и необходимости перехода в более высокочастотный диапазон для передачи информации в эфир. Высокая стабильность несущей частоты передатчиков обеспечивается благодаря использованию синтезаторов частоты прямого цифрового синтеза и синтезаторов, построенных на базе системы ФАПЧ. Каждый из этих синтезаторов обладает как достоинствами, так и недостатками. На сегодняшний день верхняя частота синтезаторов прямого цифрового синтеза не превышает 1 ГГц [1], поэтому в более высокочастотных диапазонах используются синтезаторы с ФАПЧ.

Общая структура синтезаторов с ФАПЧ с целочисленными (Integer) и дробными (Fractional) коэффициентами деления частоты хорошо описана в работах О. Старикова [2...4]. На рис. 1 приведена упрощенная функциона-

льная схема однопетлевого синтезатора с ФАПЧ.

Сигнал опорной частоты от кварцевого генератора (на схеме не показан) подается на делитель с фиксированным коэффициентом деления (ДФКД), значение которого задается кодом и равно R . Значение частоты на выходе ДФКД определяет шаг изменения частоты (сетки частот) на выходе синтезатора, равный $\Delta f = f_{оп}/R$. Сигнал с выхода ДФКД подается на первый вход фазового детектора (ФД).

В петле обратной связи между выходом генератора, управляемого напряжением (ГУН), и вторым входом ФД включены соединенные последовательно делитель частоты с переменным коэффициентом деления (ДПКД) и предварительный делитель частоты (ПДЧ), коэффициенты деления которых равны N и $P/(P+n)$ соответственно. Коэффициенты деления ПДЧ, равные 10/11, 20/22, 30/33 и 40/44, формируются с помощью поглощающего счетчика (ПСТ). Выходной сигнал ФД через ФНЧ поступает на вход ГУН и управляет его частотой.

Выходная частота синтезатора определяется соотношением [2]

$$f_{\text{вых}} = \Delta f (P \cdot N + n \cdot K_{\text{ПСТ}}),$$

где $K_{\text{ПСТ}} = [f_{\text{вых}}/(\Delta f \cdot P) - N] / n \Delta f$; $P=10, 20, 30, 40$ и $n=1, 2, 3, 4$, соответственно значениям P (рис. 1).

Значения $P/(P+1)$ могут отличаться от приведенных в [2], например, для синтезатора

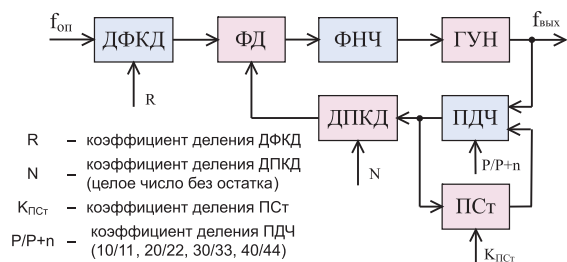


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема синтезатора частоты с ФАПЧ

ADF4007 значения $P/(P+1)$ равны 8/9, 16/17, 32/33 и 64/65.

Синтезаторы с дробными коэффициентами деления обеспечивают более высокую скорость перестройки частоты и уровень шумов меньше на 10...12 дБ, чем синтезаторы с целочисленными коэффициентами [5]. Такой синтезатор благодаря высокой скорости перестройки может в некоторых случаях заменить два синтезатора с целочисленными коэффициентами деления, например, в передатчиках базовых станций, в которых требуется высокая скорость перестройки частоты.

В классическом синтезаторе коэффициенты деления радиочастотного сигнала – только целые числа, что требует относительно низкой опорной частоты, которая, в свою очередь, определяет шаг перестройки (разнесение каналов) и нуждается в достаточно высоком значении коэффициента деления N счетчика в цепи обратной связи. Оба этих фактора весьма существенно влияют на время регулирования и фазовый шум системы в целом. Низкая опорная частота определяет соответствующую ей большую длительность переходного процесса при перестройке частоты синтезатора, а выбор высокого значения коэффициента деления N приводит к повышению фазового шума системы. При использовании счетчиков с дробным коэффициентом деления (Fractional-N) в цепи обратной связи можно уменьшить значение коэффициента деления N . В результате этого можно использовать более высокую опорную частоту и при этом получить требуемый шаг перестройки частоты. Более высокая опорная частота позволяет уменьшить продолжительность процесса регулирования системы (захват частоты будет происходить гораздо быстрее на более высокой частоте), а выбор дробного коэффициента деления счетчика в цепи обратной связи приводит к снижению фазового шума системы [4].

Поэтому на практике приходится использовать синтезаторы с целочисленными коэффициентами деления в том случае, когда требуется малый шаг перестройки частоты. Если определяющим фактором является скорость перестройки частоты, необходимо использовать синтезаторы с дробными коэффициентами деления.

Для удовлетворения таких противоречивых требований к параметрам синтезаторов в од-

ной ИМС компания Analog Devices разработала синтезатор ADF4350 [6], который может работать в одном из двух режимов, задаваемых программно, – с целочисленным или дробным коэффициентом деления счетчика в цепи обратной связи.

Основные отличительные особенности синтезатора ADF4350:

- диапазон выходных частот
137.5...4400 МГц
- работа в режиме Fractional-N или Integer-N
- встроенный ГУН
- низкий фазовый шум ГУН
- программируемый делитель частоты на выходе синтезатора с коэффициентами деления 1, 2, 4, 8, 16
- типовое среднеквадратическое значение дрожания фронта выходного сигнала 0.5 пс
- диапазон напряжения питания 3.0...3.6 В
- совместимость с логическими микросхемами 1.8 В
- программируемый двухмодульный предварительный делитель частоты с коэффициентами деления 4/5 или 8/9
- программируемая выходная мощность
- возможность отключения выхода синтезатора (mute function)
- трехпроводный последовательный интерфейс
- аналоговый и цифровой детекторы захвата частоты
- быстрое переключение частоты.

Компания Analog Devices ранее выпускала синтезатор со встроенным ГУН ADF4360, работающий только в режиме с целочисленными коэффициентами деления. В нем весь диапазон синтезируемых частот разбит на поддиапазоны, для реализации которых используются различные модификации ИМС (табл.). В отличие от ADF4360, в синтезаторе ADF4350 весь диапазон синтезируемых частот перекрывается с использованием одной модификации ИМС, а переключение поддиапазонов осуществляется программно.

Функциональная схема ADF4350 приведена на рис. 2.

Синтезатор содержит делители частоты R (ДФКД) и N (ДПКД), которые построены по схемам, отличающимся от схем делителей аналоговых синтезаторов с ФАПЧ. Делитель частоты R кроме 10-разрядного счетчика до-

Параметры синтезаторов с ФАПЧ со встроенным ГУН

Тип ИМС	Диапазон частот на выходе, МГц	Нормированная спектральная плотность мощности фазового шума, дБм/Гц	Максимальная частота опорного генератора, МГц	Ток потребления, мА	Мощность на выходе, дБм
ADF4350	137.5...4400	-213	105	27	-4...+5
ADF4360-0	2400...2725	-217	250	25...50	-13...-3
ADF4360-1	2050...2450				-12...-3
ADF4360-2	1850...2150				-13...-4
ADF4360-3	1600...1950				
ADF4360-4	1450...1750				
ADF4360-5	1200...1400			25...45	
ADF4360-6	1050...1250				
ADF4360-7	350...1800				
ADF4360-8	65...400				
ADF4360-9	1.1...200			-218	7.5

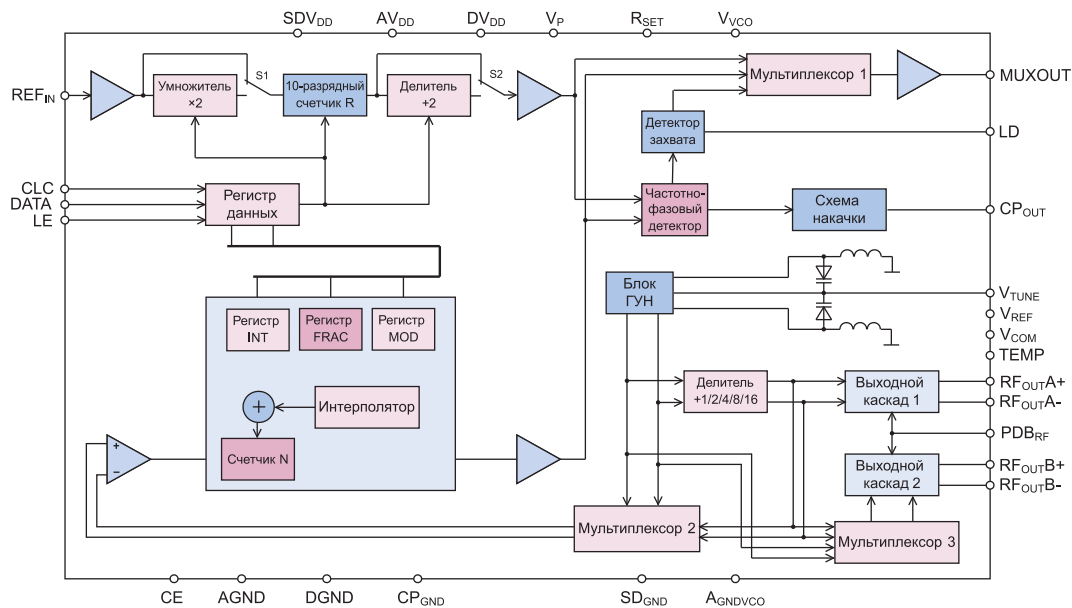


Рис. 2. Функциональная схема синтезатора ADF4350

полнительно содержит умножитель и делитель частоты на два, которые могут отключаться с помощью переключателей S1 и S2. Такая структура позволяет повысить разрешающую способность синтезатора по частоте. Результирующий коэффициент деления входного делителя определяется по формуле

$$R_{IN} = \frac{R(1+T)}{1+D},$$

где D равно 0 или 1, R лежит в диапазоне от 1 до 1023, T равно 0 или 1.

Значения D и T зависят от положения переключателей S1 и S2. В верхнем положении S1 D=0, в нижнем – D=1. Значение T зависит

от положения переключателя S2. Как следует из выражения, включение дополнительного делителя на два позволяет увеличить частоту опорного генератора в 2 раза.

Сигнал внешнего опорного генератора, максимальная частота которого не должна превышать 105 МГц, подается на вывод REF_IN.

Делитель частоты N реализует один из двух режимов работы: Integer-N или Fractional-N. Коэффициент деления определяется значениями переменных INT, FRAC и MOD и вычисляется по формуле

$$N = INT + \frac{FRAC}{MOD},$$

где $INT = 23..65535$ (или $75..65\ 535$), $FRAC = 0..MOD-1$, $MOD = 2..4095$.

При значении $FRAC = 0$ синтезатор работает в режиме Integer-N, а в остальных случаях – в режиме Fractional-N.

Контроль работы счетчиков R , N и детектора захвата можно осуществлять на выходе MUXOUT с помощью первого мультиплексора (Мультиплексор 1).

Частотно-фазовый детектор содержит схему накачки с выходом по току. Такая схема по сравнению с классическим детектором с выходом по напряжению обладает большей линейностью [7].

Блок ГУН состоит из трех генераторов, каждый из которых работает в 16 перекрывающихся диапазонах. Это позволяет обеспечить широкую полосу частот без существенного увеличения коэффициента передачи генератора, управляемого напряжением. Зависимость выходной частоты ГУН от напряжения управления на его входе и от выбранного диапазона работы показана на рис. 3.

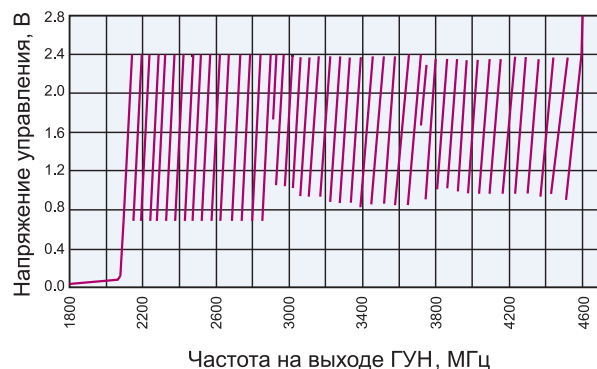


Рис. 3. Зависимость выходной частоты ГУН от напряжения управления

С выхода ГУН два противофазных сигнала через программируемый делитель частоты с коэффициентами деления 1, 2, 4, 8, 16 подаются на выходной каскад 1, а через мультиплексор 3 – на вход второго выходного каскада. Выходные каскады выполнены в виде дифференциальных усилителей с открытыми коллекторами.

На выходах $RF_{OUT}A+$ и $RF_{OUT}A-$ можно сформировать сигнал с частотой, равной частоте ГУН или поделенной на 2/4/8 или 16, что значительно расширяет функциональные возможности синтезатора.

Выходная мощность на этих выходах задается программно и может быть установлена рав-

ной -4, -1, +2 и +5 дБм на нагрузке 50 Ом [6].

На дополнительных выходах $RF_{OUT}B+$ и $RF_{OUT}B-$ можно получить сигналы с частотой ГУН или частотой, сформированной на выходе "делителя 1/2/4/8/16". При необходимости сигналы на выходах $RF_{OUT}B+$ и $RF_{OUT}B-$ могут быть отключены программно. Выходная мощность может регулироваться дискретно так же, как и на выходах $RF_{OUT}A+$ и $RF_{OUT}A-$.

Такое построение схемы позволяет формировать на разных выходах синтезатора синхронные и синфазные сигналы различной частоты.

Выходная частота ГУН RF_{OUT} может быть рассчитана по формуле

$$RF_{OUT} = f_{PFD} [INT + (FRAC/MOD)],$$

где f_{PFD} – частота на входе частотно-фазового детектора, которая рассчитывается по формуле

$$f_{PFD} = REF_{IN} [(1 + D)/(R(1 + T))].$$

Рассмотрим характеристики фазового шума отдельных узлов микросхемы, приведенные на рис. 4 и 5. На рис. 4, а показаны графики зависимости шума ГУН (верхняя черная кривая) и всего синтезатора для различных коэффициентов деления выходного делителя частоты при $f_{ГУН} = 2.2$ ГГц, частоте сигнала на входе фазового детектора 25 МГц и полосе захвата петли ФАПЧ, равной 40 кГц, от частоты. Рис. 4, б иллюстрирует те же зависимости при частоте ГУН, равной 4.4 ГГц. Как следует из графиков, фазовый шум уменьшается с понижением частоты ГУН и увеличением коэффициента деления счетчика. На рис. 5 приведены зависимости фазового шума ГУН от частоты при разомкнутой петле ФАПЧ синтезатора (для различных значений частоты генератора, управляемого напряжением), из которых следует, что с увеличением частоты фазовый шум разомкнутой петли ФАПЧ возрастает.

В синтезаторе ADF4350 принят ряд мер для уменьшения уровня фазового шума. Однако в приложениях, в которых требуется быстрая перестройка частоты, необходимо обеспечить максимально возможную ширину полосы пропускания фильтра в петле ФАПЧ, что приводит к увеличению уровня фазового шума.

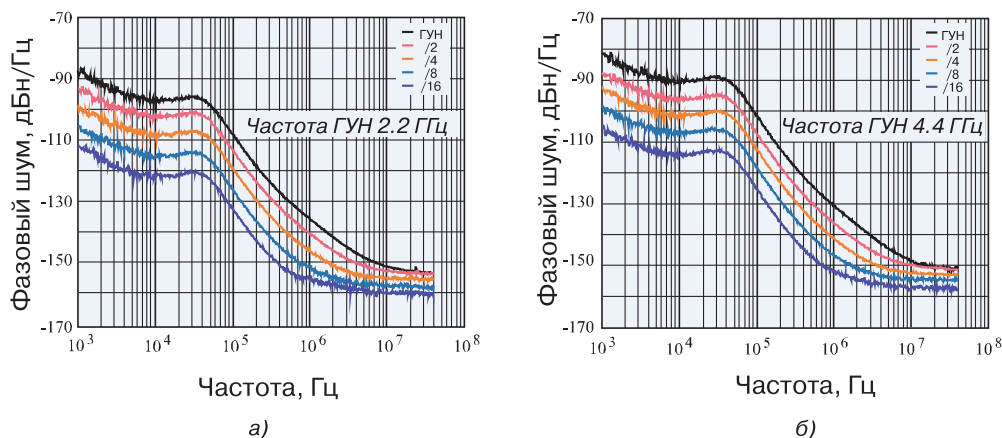


Рис. 4. Шумовые характеристики синтезатора ADF4350 при частоте ГУН 2.2 ГГц (а) и 4.4 ГГц (б)

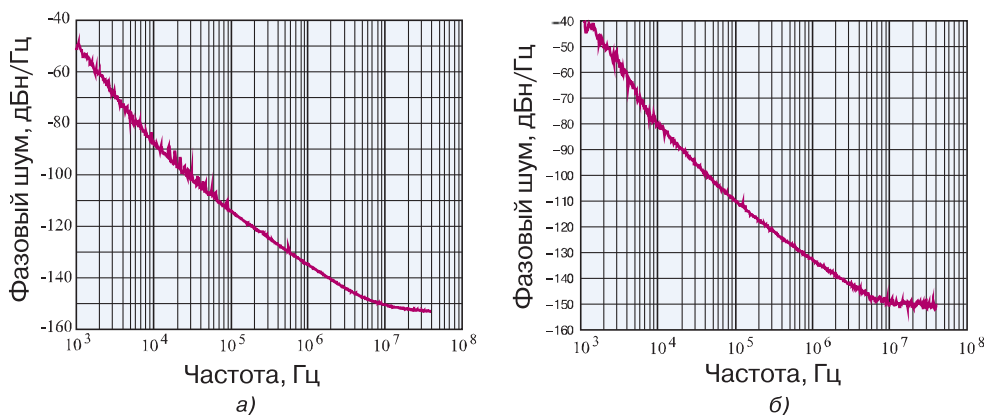


Рис. 5. Шумовые характеристики разомкнутой петли ФАПЧ синтезатора ADF4350 при частоте ГУН 2.2 ГГц (а) и 4.4 ГГц (б)

В ADF4350 исключена необходимость изменения параметров фильтра. Для ускорения процесса перестройки достаточно включить режим CSR (Cycle Slip Reduction – уменьшения циклических повторений), при котором процесс перестройки частоты ускоряется, а длительность переходного процесса уменьшается.

Циклические повторения попыток синхронизации работы ГУН со входным сигналом возникают в случае, если величина, обратная полосе захвата, становится меньше, чем период колебаний на входе частотно-фазового детектора (ЧФД). На входах ЧФД фазовая ошибка накапливается так быстро, что петля ФАПЧ не успевает ее отслеживать и исправлять. В этом случае схема накачки может формировать импульсы зарядного тока, направление протекания которого противоположно требуемому для заряда конденсатора, что приводит к увеличению времени захвата. Для уст-

ранения этого эффекта в ИМС ADF4350 реализована схема расширения линейного диапазона работы ЧФД, позволяющая уменьшить время перестройки на другую частоту без изменения параметров фильтра в петле ФАПЧ. Как только начинаются циклические повторения, схема накачки формирует ток постоянной величины для ускорения заряда конденсатора фильтра, если частоту ГУН нужно увеличить. Если частоту необходимо понизить, ток заряда конденсатора уменьшается до нуля, чем ускоряется процесс его разряда. Таким образом расширяется диапазон линейной части характеристики ЧФД и обеспечивается стабильность работы петли ФАПЧ, поскольку заряд конденсатора производится постоянным, а не пульсирующим током [6].

Следует отметить, что включение режима CSR возможно только в случае, если на входы ЧФД подаются сигналы со скважностью 2

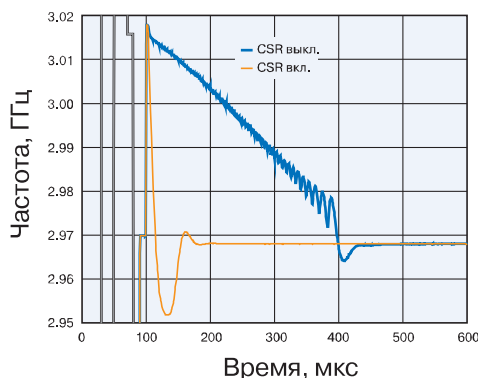


Рис. 6. Зависимость времени перестройки синтезатора ADF4350 от режима работы

(длительность импульса в два раза меньше длительности периода). Для формирования таких сигналов в синтезаторе предусмотрен делитель частоты на 2, включенный после счетчика R (рис. 2). Этот делитель можно не использовать, если скважность сигнала на выходе счетчика R будет находиться в пределах 1.82...2.22. Для ускорения процессов перестройки ток накачки в режиме CSR устанавливается минимально возможным.

Если погрешность фазы на выходе ЧФД увеличивается в процессе перестройки, то для увеличения тока заряда конденсатора фильтра автоматически подключается еще одна ячейка, формирующая выходной ток схемы накачки. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока погрешность фазы не начнет уменьшаться. Максимальное число подключаемых ячеек равно 7. Как только синтезатор перестроится на требуемую частоту, все дополнительно подключенные ячейки отключаются и петля ФАПЧ переходит в режим удержания частоты.

На рис. 6 приведены зависимости времени перестройки синтезатора от режима работы: с включенным и выключенным CSR. Как следует из приведенных зависимостей, режим CSR позволяет существенно уменьшить время перестройки синтезатора. Графики построены при изменении частоты на выходе синтезатора от 3070 до 2970 МГц, опорной частоте на входе

ЧФД 25 МГц, токе накачки 313 мкА и ширине полосы пропускания ФНЧ 20 кГц.

Подробную информацию о схемах включения, режимах программирования, технических характеристиках можно найти в [6] и на web-сайте компании Analog Devices www.analog.com.

ЛИТЕРАТУРА

- <http://www.analog.com/en/rfif-components/direct-digital-synthesis-dds/products/index.html>.
- Стариков О. ФАПЧ-синтезаторы. Часть 2. Базовая схема, конструктивные блоки и шумовые характеристики ФАПЧ-синтезаторов частоты // Chip News, 2001, № 7.
- Стариков О. ФАПЧ-синтезаторы. Часть 3. ФАПЧ-синтезаторы частоты типа Integer-N // Chip News, 2001, № 8.
- Стариков О. ФАПЧ-синтезаторы. Часть 4. Fractional-N и двойные Fractional-N/Integer-N синтезаторы частоты // Chip News, 2001, № 10.
- http://www.analog.com/static/imported-5/files/application_notes/494973545190600605APP_NOTE_FOX.pdf/.
- http://www.analog.com/static/imported-5/files/data_sheets/ADF4350.pdf.
- Михалев П. Микросхемы ФАПЧ и синтезаторы на их основе производства компании Analog Devices // Компоненты и технологии, 2006, № 4.

VD MAIS

Измерительные приборы

- Осциллографы
- Генераторы
- Логические анализаторы
- Анализаторы спектра
- Измерители параметров видеосигналов
- Источники питания
- Частотомеры
- Мультиметры

Дистрибьютор

TEKTRONIX, HAMEG, PROTEK

Украина, 03061 Киев, ул. М. Донца, 6
 тел.: (044) 220-0101, 492-8852, 220-2022
 факс: (044) 220-0202
 e-mail: info@vdmairs.kiev.ua, www.vdmairs.kiev.ua