

# Выбор генераторов для построения малозумящих СВЧ-синтезаторов

Андрей ГОРЕВОЙ  
imz@micran.ru

**В статье обосновывается выбор и построение генераторов для синтезаторов СВЧ с позиций системных требований и ограничений в характеристиках их элементов. Рассмотрены методы снижения фазовых шумов генераторов. Приведены примеры конструкций некоторых генераторов, разработанных автором.**

## Введение

Многообразие приложений радиоэлектронных систем, начиная с радиовещания и заканчивая сложными многофункциональными сетями беспроводного доступа и РЛС управления движением воздушного транспорта, привело к созданию обширного направления в радиотехнике — синтезаторов частот, отвечающих за формирование периодических сигналов с заданными характеристиками стабильности частоты и чистоты спектра.

Разработка любого синтезатора частот включает в себя комплекс технических решений, направленных на обеспечение таких характеристик, как диапазон выходных частот, шаг и скорость перестройки по частоте, уровень фазовых шумов (ФШ) и побочных спектральных составляющих (ПСС), уровень выходной мощности, энергопотребление, габариты, вес и т. п. Заметим, что не существует универсального решения, удовлетворяющего любым поставленным требованиям, и даже в рамках конкретной задачи решений может быть несколько.

## Подходы к выбору генераторов для синтезаторов частот

Процесс разработки синтезатора в каждом случае начинается с анализа требований к характеристикам спектральной чистоты и диапазону частот выходного сигнала. Исходя из этого, выбирают метод синтеза и компоненты, позволяющие удовлетворить требования в рамках выбранного метода. В гигагерцовом диапазоне частот часто применяется косвенный синтез с цифровой ФАПЧ. Это связано с рядом преимуществ перед другими методами: прямым аналоговым, прямым цифровым и др.

В состав синтезатора с ФАПЧ входят опорный (ОГ) и управляемый (УГ) генераторы и микросхема с частотно-фазовым детектором (ЧФД), делителями частоты, схемами

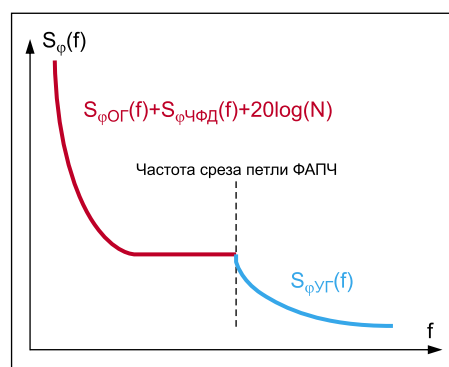


Рис. 1. Типичная характеристика ФШ синтезатора частот с ФАПЧ

управления и индикации. Диапазон выходных частот, очевидно, определяется только УГ. Характеристики спектральной чистоты (ФШ) определяются всеми тремя элементами. В непосредственной близости к несущей, в пределах полосы пропускания петли ФАПЧ, фазовые шумы сигнала равны сумме приведенных фазовых шумов ОГ и микросхемы, а за пределами полосы пропускания петли — фазовым шумам УГ (рис. 1).

## Выбор УГ

В массовых приложениях, таких как цифровая связь, автомобильные радары, радионавигация и соответствующее тестовое оборудование (скалярные и векторные анализаторы цепей, измерители коэффициента шума, малобюджетные анализаторы спектра), область интересов разработчиков систем либо не выходит за отстройки от несущей СВЧ 10–100 кГц, либо требования к ФШ вообще не предъявляются. Здесь будет целесообразнее применить УГ с минимальной стоимостью, габаритами и энергопотреблением. Этим условиям соответствуют генераторы на простых колебательных контурах с перестройкой частоты варикапами, позволяющие выполнять практиче-

ски весь синтезатор в виде МИС, например, микросхемы ADF4350 Analog Devices [1] или HMC833LP6GE [2] Hittite Microwave. Аналогично цена ОГ и микросхемы ФАПЧ должна быть минимальна.

Для приложений, более критичных к ФШ синтезаторов, таких как измерительная техника высокого класса (измерительные генераторы, анализаторы спектра, измерители флуктуаций), РЛС с ЛЧМ (РЛС «Река» фирмы «Микран») и т. п., приходится с большей осторожностью подходить к выбору УГ. Для октавных синтезаторов подходят генераторы с ферромагнитными резонаторами (ЖИГ-генераторы) или наборы переключаемых субоктавных ГУН с микрополосковыми резонаторами. Для синтезаторов с малым диапазоном перестройки или одночастотных — генераторы с резонаторами на отрезках линий передачи (микрополосковые, коаксиальные керамические), ПАВ или с объемными резонаторами.

На рис. 2 показаны характеристики ФШ различных УГ, приведенные к несущей частоте 10 ГГц.

## Выбор ОГ

Опорный генератор выбирают исходя из требований к долговременной стабильности частоты, точности ее установки и ФШ синтезатора на ближних отстройках от несущей. Альтернативы кварцевым генераторам (КГ), пожалуй, пока не существует. Остается только определиться с частотой КГ и выбрать конкретную модель, обеспечивающую требуемые ФШ. Заметим, что ФШ синтезатора определяются не только ОГ, но и микросхемой ФАПЧ. При выборе ОГ следует принимать во внимание тот факт, что шумы, наводимые ЧФД современных микросхем, намного превышают собственные шумы ОГ. Например, микросхема ЧФД HMC984LP4 фирмы Hittite Microwave на частоте сравнения 100 МГц дает уровень эквивалентных ФШ –153 дБн/Гц, в то время как относительно дешевые коммерческие термостабилизированные КГ МХО37Н/14 100 МГц MagicXtal

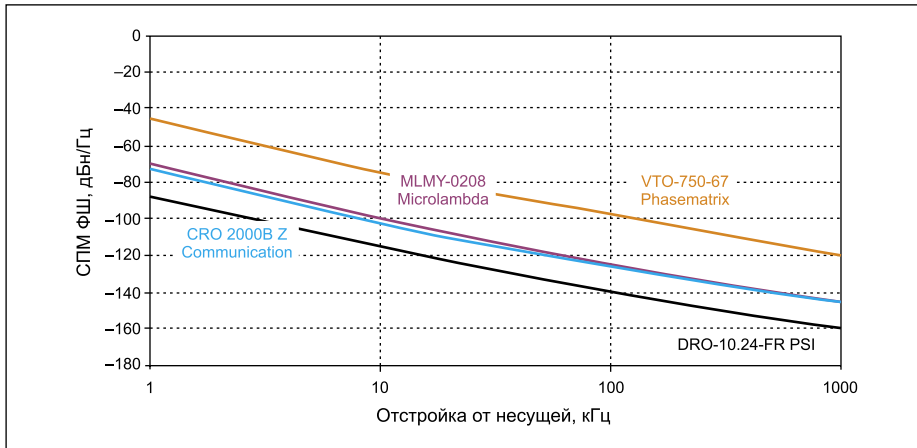


Рис. 2. Типичные характеристики ФШ генераторов различных типов

[3] имеют уровень ФШ до  $-173$  дБн/Гц. Однако из сказанного не следует, что нельзя использовать высокочастотные КГ в простых однопетлевых синтезаторах. Исходя из известной формулы для определения ФШ  $S_{\varphi pfd}$  наводимых импульсным ЧФД в замкнутой петле ФАПЧ, увеличение частоты сравнения в два раза снижает шумы ЧФД на 3 дБ [4]:

$$S_{\varphi pfd} = S_{floor} + 20\log F_{out} - 10\log F_{comp} \quad (1)$$

где  $S_{floor}$  — нормированный к единичной частоте сравнения эквивалентный уровень ФШ ЧФД;  $F_{out}$  — выходная частота синтезатора с ФАПЧ, Гц;  $F_{comp}$  — частота сравнения, Гц.

Превазирование же ФШ от ЧФД позволяет выбрать наиболее дешевый высокочастотный КГ или вообще применить низкочастотный КГ, предварительно умножив его частоту.

Типовое решение для подавления, скажем, на 20–40 дБ, ФШ, наводимых ЧФД в замкнутой петле ФАПЧ, — применение преобразования частоты УГ в цепи обратной связи. Дополнительный сигнал для преобразования получается прямым умножением частоты ОГ. Не вдаваясь в подробности реализации умно-

жителя, отметим, что в результате многократных экспериментов нами был достигнут практический шумовой предел, приведенный ко входу умножителя частоты, на уровне  $(173-170)$  дБн/Гц. Получить уровень ФШ ниже  $(133-130)$  дБн/Гц на частоте 10 ГГц при прямом умножении частоты КГ 100 МГц оказалось практически невозможно. По нашему мнению, целесообразность применения малошумящих КГ типа ОСХОЕ 100 МГц фирмы Pascall [5] выглядит сомнительной. Более выгодным оказывается применение КГ МХО37Н/14 или ГК136 фирмы «Морион», либо аналогичных с частотой 100 МГц.

Преодолеть указанный предел в некотором диапазоне отстроек позволяет фильтрация ФШ КГ при каскадном умножении его частоты [6]. Это решение показано на рис. 3. На выходе каждого каскада умножителя частоты установлена петля ФАПЧ с относительно добротным генератором на ПАВ или ДР. Дальнейшее снижение ФШ синтезатора возможно только заменой умножителя частоты с петлями ФАПЧ на генератор гигагерцового диапазона с резонатором с эквивалентной добротностью 50000 и выше.

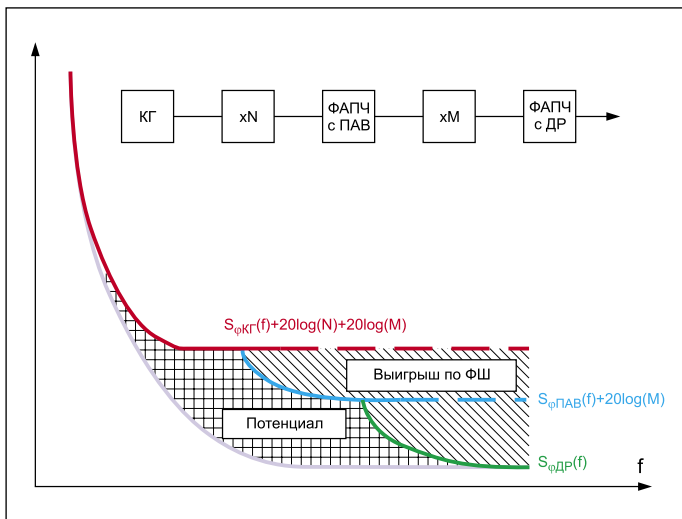


Рис. 3. Способ улучшения ФШ сигнала при умножении частоты КГ

### Подходы к построению генераторов для синтезаторов частот

Основные требования по отношению к генераторам для синтезатора частот касаются диапазона перестройки частоты и характеристик спектральной чистоты, точнее, характеристик ФШ. Как известно, ФШ генератора определяются шумовыми характеристиками активного прибора (усилителя) и добротностью резонатора. В пределах полосы пропускания резонатора характеристика спектральной плотности мощности (СПМ) ФШ генератора на входе усилителя (рис. 4) определяется по формуле (2) [7]:

$$S_{\varphi osc}(f) = S_{\varphi amp}(f) \left( \frac{f_0}{2Q_L f} \right)^2, \quad (2)$$

где  $S_{\varphi amp}(f)$  — СПМ ФШ, вносимых усилителем;  $f_0$  — частота генерации;  $Q_L$  — нагруженная добротность резонатора.

Спектральная плотность мощности вносимых усилителем ФШ описывается формулой [8]:

$$S_{\varphi amp}(f) = b_1/f + b_0, \quad (3)$$

где  $b_0$  — относительный уровень фазовой составляющей широкополосного шума на выходе усилителя;  $b_1$  — постоянный коэффициент (порядка  $10^{-12} \dots 10^{-10}$ ), выражающий уровень ФШ, наведенных фликкер-шумом в каскадах усилителя.

Значения коэффициентов зависят от режима работы усилителя. В режиме насыщения наблюдается их рост. При малосигнальном режиме работы усилителя коэффициент  $b_0$  однозначно описывается величиной коэффициента шума (рис. 4).

Из выражений (2) и (3) следует, что для снижения ФШ генератора нужно:

1. Увеличивать нагруженную добротность резонатора.

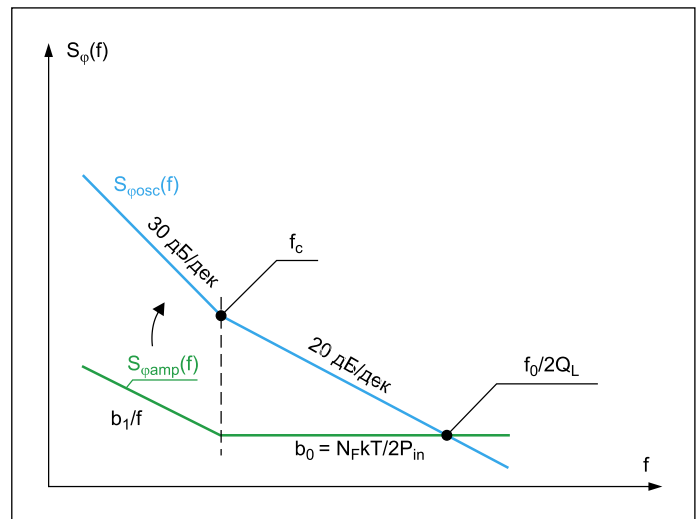


Рис. 4. Аппроксимация ФШ генератора с использованием параметров элементов

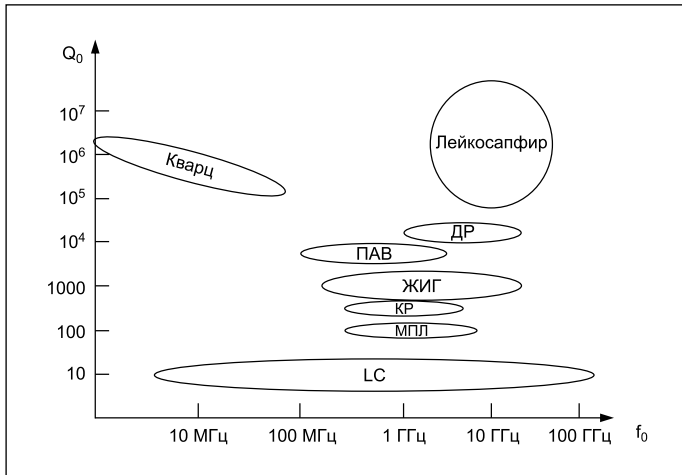


Рис. 5. Области применения резонаторов различных типов

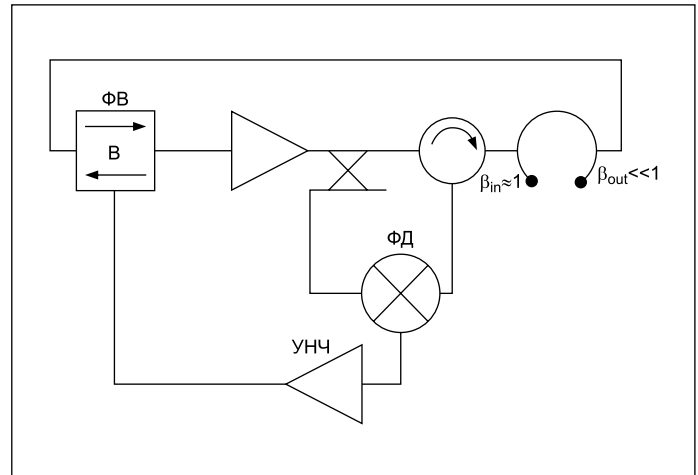


Рис. 6. Типовая схема генератора с КСС

2. Снижать фликкер-шум и коэффициент шума усилителя.

3. Увеличивать мощность на входе усилителя. Если учесть, что минимум ФШ достигается при единичной суммарной связи с резонатором [6], то дальнейшая их минимизация возможна только заменой резонатора на более добротный.

На рис. 5 показаны диапазоны рабочих частот и величины добротности различных резонаторов.

Шумы усилителя можно снизить выводом его из насыщения установкой ограничителя, а также выбором усилителя по типу технологии. Известно, что минимальным уровнем шума обладают усилители, выполненные по биполярной или гетеробиполярной технологии [6]. Третий способ достаточно эффективен, но следует учесть, что побочным эффектом увеличения мощности на входе усилителя может стать рост его фликкер-шумов, например из-за увеличения степени насыщения. То есть снижение ФШ на одних отстройках может компенсироваться его увеличением на других и наоборот. В целом можно сделать вывод, что для минимизации ФШ генератора нужно применять биполярный или гетеробиполярный усилитель с максимальной мощностью насыщения, приведенной к его входу, и поддерживать единичную суммарную связь с резонатором.

Отметим, что необходимые для оценки ФШ генератора коэффициенты невозможно получить из документации на микросхемы, так как производители не характеризуют свои изделия соответствующим образом. Поэтому оценить ФШ будущего генератора можно лишь приблизительно на основе величины коэффициента шума и предположения, что частотная граница фликкер-шума ( $f_c$ ) составляет порядка 10 кГц, что в случае биполярных или гетеробиполярных усилителей часто оказывается верным.

Электронная перестройка частоты УГ выполняется либо напряжением (ГУН), либо током (ГУТ). В первом случае применяются

управляемые реактивности — варикапы, во втором — собственная резонансная частота резонатора пропорциональна напряженности внешнего магнитного поля, создаваемого постоянным током, протекающим через катушку электромагнита. Применение относительно низкодобротных варикапов влечет за собой естественное снижение добротности резонатора. Избежать этого позволяет частичное включение варикапов. Возможности перестройки частоты становятся тем меньше, чем выше собственная добротность резонатора. Например, низкодобротные колебательные контуры позволяют октавную перестройку частоты, более добротные микрополосковые — до 20–30%, коаксиальные керамические резонаторы (КР) — 0,5%, ДР — на  $10^{-4}$ , а кварцевые и лейкосапфировые — всего на 10–50 ppm. ЖИГ-генераторы — единственные ГУТ, их добротность остается неизменно высокой при перестройке частоты до декады. В широкополосных синтезаторах применяются УГ с колебательными контурами, микрополосковыми и ЖИГ-резонаторами, а узкополосных и/или одночастотных — КР, ДР, ПАВ и т. п.

Еще один способ снижения ФШ генератора, на который следует обратить внимание, когда вы хотите достичь высокого уровня добротности в гигагерцовом диапазоне частот, — комбинированная стабилизация частоты (КСС) [9]. В этом методе резонатор генератора используется не только как узкополосный фильтр в петле ОС, но и как дисперсионный элемент в системе стабилизации частоты, преобразующий с высокой чувствительностью частотные флуктуации падающей волны в фазовые отраженной (рис. 6). При этом эквивалентная добротность колебательной системы может быть увеличена более чем на порядок. При использовании лейкосапфировых резонаторов с собственной добротностью 150–200 тысяч на частоте 10 ГГц при комнатной температуре достигается величина эквивалентной добротности в генераторе, превышающая миллион [10].

## Примеры конструкций генераторов

### Октавные генераторы, управляемые напряжением (ГУН), на колебательных контурах

ГУН на колебательных контурах, пожалуй, обладают самой низкой стоимостью среди всех генераторов. Достоинства таких ГУН — это высокая повторяемость параметров, практически исключая настройку, а также высокая стойкость к механическим воздействиям и малые габариты. Фактически габаритные размеры ГУН ограничиваются технологическими возможностями изготовления элементов и могут быть существенно уменьшены с помощью технологии МИС, вдобавок позволяющей достигать частот генерации выше 100 ГГц [11].

Еще одно достоинство ГУН — широкая полоса пропускания канала управления частотой: до 10 МГц и выше, что позволяет строить высокоскоростные сканирующие по частоте системы. Уровень ФШ таких ГУН умеренно низкий и составляет  $-120$  дБн/Гц на отстройке 100 кГц от несущей 1–2 ГГц.

На рис. 7 показано фото платы ГУН на 1–2 ГГц с габаритами 7,5×7,5 мм, которую

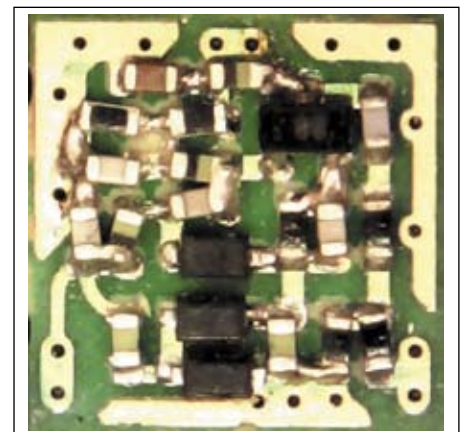


Рис. 7. ГУН на 1–2 ГГц

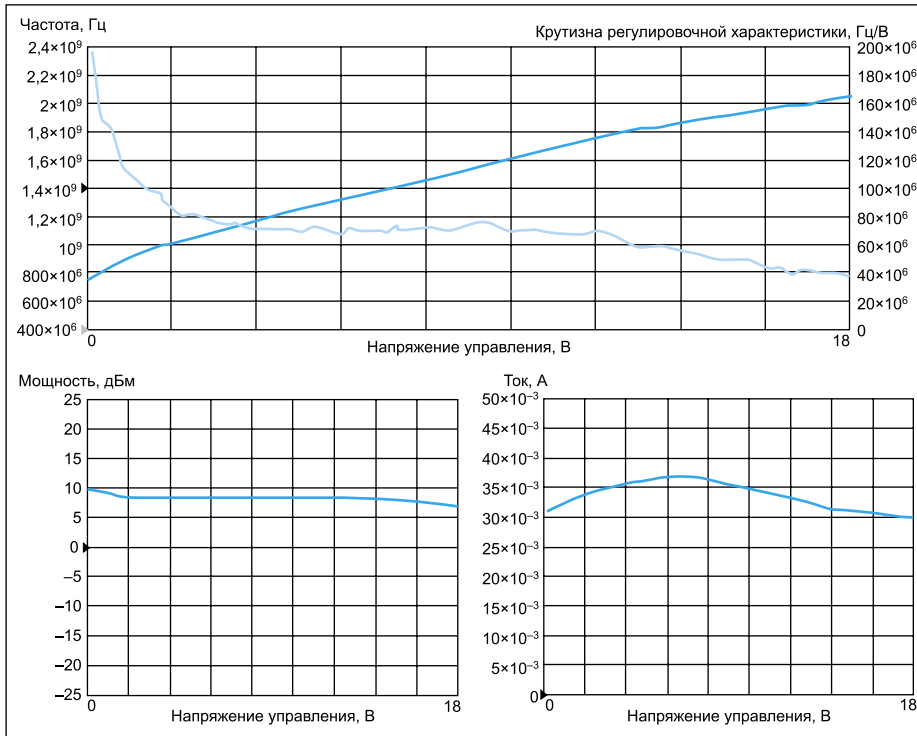


Рис. 8. Характеристики ГУН на 1–2 ГГц

разработал автор. Регулировочные характеристики ГУН представлены на рис. 8.

**Генераторы с ЖИГ-резонаторами**

Достоинством генераторов этого типа является низкий уровень ФШ выходного сигнала, который практически не зависит от выходной частоты при ее перестройке до декады. Основной недостаток таких генераторов — способ управления частотой сильным магнитным полем, предполагающий наличие электромагнита с большим протекающим током и большой индуктивностью катушек, ограничивающей скоростные свойства сканирующих по частоте систем с ЖИГ-генераторами. Частично этот недостаток преодолевается дополнительной катушкой с малой индуктивностью, с помощью которой частота перестраивается в небольших пределах. Генераторы с ЖИГ находят применение в широкополосных маломощных синтезаторах частот: первых гетеродинах анализаторов спектра и измерительных СВЧ-генераторах.

Особенность ЖИГ-генератора — в его резонаторе: в принципе работы и соответствующем способе крепления и возбуждения [12]. Для сохранения высокой добротности шарик необходимо закрепить на керамическом стержне на достаточном удалении от элементов с высокими потерями (стенок, проводников и т. п.). Возбуждение резонатора производится петлей, лежащей в плоскости линий внешнего подмагничивающего поля (рис. 9).

Степень связи с резонатором определяется радиусом витка, отнесенным к радиусу



Рис. 9. ЖИГ-резонатор в генераторе

шара. Также радиус витка (индуктивность связи) определяет верхнюю рабочую частоту генератора. Поэтому для повышения частоты генерации необходимо уменьшать радиус витка, а значит, и шара, чтобы в противном случае не проиграть в добротности резонатора. Потенциально ЖИГ-резонатор обладает добротностью в несколько тысяч, но близко расположенная петля связи и полюсы элек-



Рис. 10. ЖИГ-генератор на 3–8 ГГц

тромагнита снижают добротность на порядок, уравнивая в данном отношении его с КР.

На рис. 10 показано фото ЖИГ-генератора на 3–8 ГГц, разработанного автором для широкополосных синтезаторов частот фирмы «Микран». Этот генератор обладает характерно высокой линейностью регулировочной характеристики и низким ФШ: –130 дБн/Гц на отстройке 100 кГц от несущей во всем диапазоне рабочих частот.

**Кварцевые генераторы**

Благодаря высокой добротности резонатора и стабильности частоты генерации, КГ находят широкое применение в качестве опорных и тактовых генераторов в системах формирования и обработки сигналов. Доступность и низкая стоимость кварцевых резонаторов позволяет строить относительно дешевые генераторы. Например, коммерческие резонаторы GSX-751 Colledge с АТ-срезом на третьей механической гармонике 100 МГц [13] вполне способны обеспечить приемлемый в большинстве приложений уровень ФШ: до –150 дБн/Гц на отстройке 1 кГц от несущей, что сравнимо с термостатированными генераторами, применяющими резонаторы с SC-срезом и пятой механической гармоникой. Вместе с тем диапазон перестройки частоты может достигать 50 ppm, что во много раз превосходит возможности термостатированных КГ. Применение элементов стандартной логики типа NC7WZU04 фирмы Fairchild Semiconductor [14] позволяет минимизировать габариты генератора и достичь anomalously низких для логических элементов ФШ (рис. 11, 12).

Здесь возникает необходимость повышения долговременной стабильности частоты путем привязки генератора петлей ФАПЧ к дешевому термокомпенсированному низкочастотному генератору, например на 10 МГц. Цена такого технического решения все же оказывается ниже полноценного термостатированного КГ.

Если предъявляются особые требования к ФШ КГ на отстройках от 1 Гц, то оптимальным вариантом будет транзисторный термостатированный генератор. При построении такого генератора можно добиться минимальных ФШ комбинированием опти-

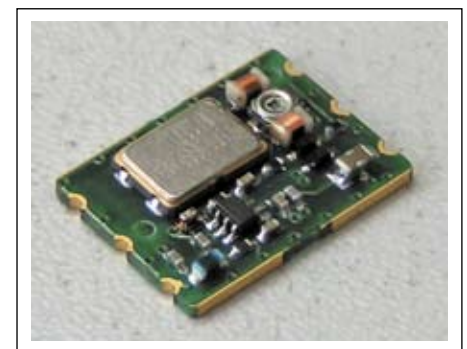


Рис. 11. КГ на 100 МГц

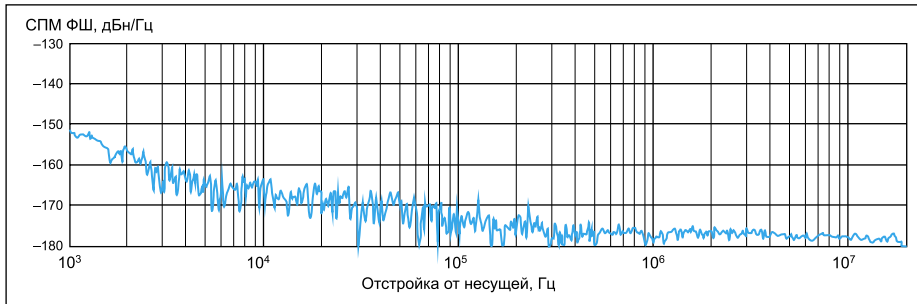


Рис. 12. Характеристика ФШ КГ 100 МГц

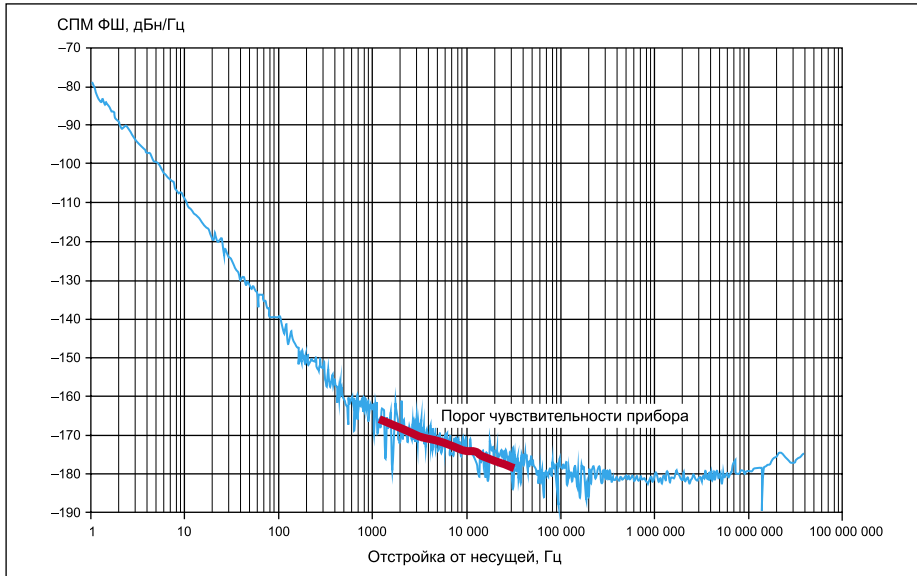


Рис. 13. Характеристика ФШ малошумящего КГ с комбинированным подавлением шумов

мизации режима транзистора и узкополосной фильтрации выходного сигнала.

На рис. 13 показана характеристика ФШ КГ, построенного автором, в котором применен комбинированный метод подавления шумов, ранее использованный в генераторах ЧЗ-66. В самом автогенераторе минимизируются ФШ в области относительно близких «фликкерных» отстройок от несущей путем вывода усилителя из глубокого насыщения и оптимизации его режима по постоянному току. На дальних отстройках ФШ подавляются на 15–20 дБ кварцевым фильтром с полосой пропускания около 2 кГц.



Рис. 14. Генератор с КР

### Генераторы на коаксиальных резонаторах

Добротность КР на уровне 500 позволяет получить уровень ФШ до  $-153$  дБн/Гц на отстройке 100 кГц от несущей 2,5 ГГц при типовой перестройке частоты не более 0,5% (рис. 14, 15). При этом генераторы с КР обладают достаточной технологичностью, так как монтаж резонатора и элементов связи (конденсаторов)

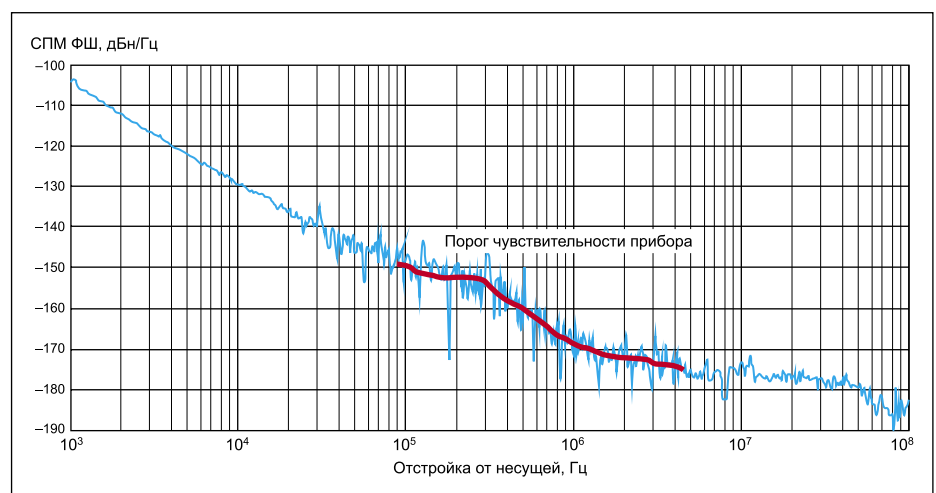


Рис. 15. Характеристика ФШ ГУН 2,2 ГГц с КР

выполняется на печатную плату. Основное применение таких ГУН — в качестве малошумящих источников сигналов фиксированной частоты: в фиксированных гетеродинах приемных трактов с многократным преобразованием частоты или в системах связи и радиолокации со сложными сигналами, например РЛС «Река» фирмы «Микран».

Уровень фазовых шумов генератора зависит от качества элементов связи. Было установлено, что керамические конденсаторы общего применения серии GRM Murata [15] ограничивают ФШ на уровне  $-140$  дБн/Гц, а при замене на специальные конденсаторы для СВЧ серии GQM Murata ФШ снижаются на 10 дБ.

### Генераторы на ДР

Диэлектрические резонаторы (ДР), пожалуй, самые добротные из дешевых и доступных резонаторов гигагерцового диапазона. Имея на частоте 4 ГГц собственную добротность выше 10000, эти резонаторы позволяют получить уровень ФШ до  $-160$  дБн/Гц на отстройке 100 кГц. Однако такие генераторы имеют скромные возможности по электронному управлению частотой — не более  $10^{-4}$ , что частично может компенсировать механическая перестройка — до 0,5%. Также ДР нужно устанавливать в корпус на достаточном удалении от его стенок [16]. Часто встречающееся решение в спутниковых конвертерах с приклеиванием ДР на металлизированную печатную плату нельзя считать оптимальным с точки зрения добротности. Эти особенности делают генератор на ДР устройством с относительно низкой технологичностью, поэтому массового применения, кроме спутниковых конвертеров, они не находят.

ДР привлекли наше внимание возможностью реализации комбинированной стабилизации частоты (КСС) для построения СВЧ ОГ, активно применяемой в генераторах с лейкосапфировыми резонаторами. КСС позволяет увеличить добротность резонатора минимум на порядок. Поэтому добротность выше  $10^5$  на частоте 10 ГГц вполне достижи-

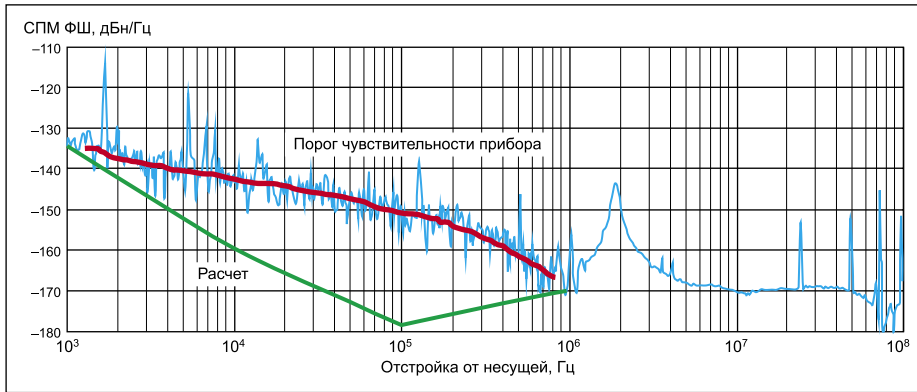


Рис. 16. Характеристика ФШ генератора 3,55 ГГц, стабилизированного ДР

ма с применением дешевых ДР, что делает их конкурентными по отношению к более дорогим, габаритным и менее доступным лейкокапфирным резонаторам.

В настоящее время автор ведет разработку макетного генератора 4 ГГц на ДР с КСС. Ожидается получение уровня фазовых шумов — (140–135) дБн/Гц на отстройке 1 кГц от несущей, что соответствует эквивалентной добротности около 100 000. При стабилизации внешнего ГУН относительно ДР на частоте 3,55 ГГц получен уникально низкий уровень ФШ: не выше –130 дБн/Гц на отстройке 1 кГц от несущей (рис. 16).

При работе резонатора в составе макетного автогенератора на 4 ГГц уровень ФШ оказался выше –125 дБн/Гц на отстройке 1 кГц. Этот эффект исследуется, и предпринимаются попытки улучшить ФШ.

### Генераторы на лейкокапфирных резонаторах

Лейкокапфирные резонаторы (рис. 17), работающие в режиме «шепчущей галереи», обладают уникально высокой собственной добротностью: до 150–200 тысяч на частоте 10 ГГц, при применении КСС — выше миллиона, а при охлаждении до криогенных температур — до миллиарда, что позволяет строить генераторы СВЧ с уникально высокой стабильностью частоты [10]. К недостаткам этих резонаторов следует отнести большие габариты, высокую зависимость частоты от температуры в области комнатных температур и высокую стоимость. Пока такие резонаторы не нашли широкого применения в технике и используются, скорее, в исследовательских целях или в единичных разработках типа стандартов частоты на цезиевых пучках [17].

Автор предпринимал попытки создания лейкокапфирных генераторов с КСС и без нее. Были собраны два макетных образца без КСС с близкими частотами около 9,5 ГГц и измерены их ФШ: –140 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от несущей. Затем была предпринята попытка создания генератора с КСС на направленном фильтре с бегущей волной (TWDF) [18] с расчетным уровнем ФШ –160 дБн/Гц на отстройке 1 кГц от несущей.

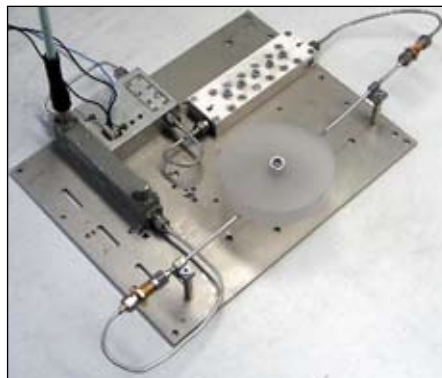


Рис. 17. Генератор на лейкокапфирном резонаторе

### Заключение

Осведомленность современного разработчика о современном уровне развития компонентов для синтезаторов частот является одним из факторов, определяющих эффективность будущего синтезатора. Часто выбор метода синтеза и соответствующих генераторов оказываются тесно связанными. Ограничения в некоторых характеристиках генераторов могут определить выбор методов синтеза и их комбинирование, исходя уже из ограничений, соответствующих методам компонентов, и наоборот. Улучшить собственные характеристики микросхемы ЧФД разработчик синтезатора не в силах, а характери-

стики доступных коммерческих генераторов не всегда оптимальны. Владение специальным навыками построения необходимых генераторов может существенно улучшить эффективность разрабатываемых им изделий. ■

### Литература

1. [www.analog.com](http://www.analog.com)
2. [www.hittite.com](http://www.hittite.com)
3. [www.mxtal.com](http://www.mxtal.com)
4. Banerjee D. PLL performance, simulation and design. 2001.
5. [www.pascall.co.uk](http://www.pascall.co.uk)
6. Ченакин А. Фазовые шумы в СВЧ-генераторах. Методы решения проблемы // Электроника: НТБ. 2011. № 4.
7. Robins W. P. Phase noise in signal sources. Stevenage, U.K.: Peter Peregrinus Ltd., 1984.
8. Boudot R., Rubiola E. Phase noise in RF and microwave amplifiers. FEMTO-ST Institute. Jan. 13, 2010.
9. Царапкин Д. П. Применения диэлектрических резонаторов с волнами типа «шепчущей галереи» для стабилизации частоты автогенераторов сверхвысоких частот // Радиотехника. 2002. № 2.
10. McNeilage C. et al. A review of sapphire whispering gallery-mode oscillators including technical progress and future potential of technology. [www.psi.com.au](http://www.psi.com.au)
11. Nicolson S. T. et. al. Design and scaling of SiGe BiCMOS VCOs above 100 GHz. Bipolar / BiCMOS Circuits and Technology Meeting. 2006.
12. Маттей Д. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 2. М.: Связь, 1972.
13. [www.golledge.co.uk](http://www.golledge.co.uk)
14. [www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com)
15. [www.murata.com](http://www.murata.com)
16. Tanski W. J. Development of a low-noise L-band dielectric resonator oscillator // IEEE International frequency control symposium. 1994.
17. Lopez M. R. Time and frequency activities at CENAM. [http://tf.nist.gov/sim/2010\\_Seminar/2010\\_CENAM\\_Report.pdf](http://tf.nist.gov/sim/2010_Seminar/2010_CENAM_Report.pdf)
18. Tsarapkin D. P., Shtin N. A. Performance limits of microwave oscillators with combined stabilization // XVI EFTF. St. Petersburg. March 12–14, 2002.