

ГУН ИЛИ ЖИГ?

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО СИНТЕЗАТОРА С ФАПЧ

А. Ченакин achenakin@phasematrix.com

Ключевой элемент любого синтезатора частоты с ФАПЧ – ГУН-или ЖИГ-генератор. Схемотехнические решения с ЖИГ обладают хорошими характеристиками, но имеют низкую скорость перестройки, а варианты с ГУН – худшие шумовые характеристики при более низкой по сравнению с ЖИГ стоимости и малых габаритах. Достижение сравнимых с ЖИГ-генераторами уровней фазовых шумов в схемах на базе ГУН – задача нетривиальная и для ее решения требуются новые структуры и современные технологии, а также преодоление различных "вторичных" трудностей.

Исторически в высококачественных синтезаторах с кольцами фазовой подстройки частоты (ФАПЧ) использовались подстраиваемые ЖИГ-генераторы, в которых сочетаются широкая полоса и низкий уровень фазовых шумов [1]. Кроме этого, ЖИГ-генераторы имеют линейные, хорошо воспроизводимые перестроечные характеристики, что упрощает предварительную установку частот в многокольцевых синтезаторах. Благодаря этим уникальным свойствам технические решения, основанные на использовании ЖИГ, широко используются при разработке генераторов сигналов для измерительно-испытательных стендов. Недостатками таких решений являются высокое энергопотребление, большие габариты и относительно высокая цена. Самый же серьезный недостаток, свойственный ЖИГ-технологии, – низкая скорость перестройки (порядка миллисекунд), объясняющаяся большой индуктивностью электромагнитной системы, которая обеспечивает управление частотой. Хотя многие существующие системы все еще успешно работают с такими временами переключения, в новейших системах

допустимые времена переключения измеряются микросекундами, но при таких же прочих характеристиках (уровнях фазовых шумов, побочных дискретных составляющих и т.д.), как в синтезаторах с большими временами переключения [2]. Очевидно, что проектирование такого генератора и поиск компромиссных решений связаны с определенными трудностями.

Альтернатива ЖИГ-генераторам – генераторы, управляемые по частоте напряжением (ГУН). В отличие от ЖИГ-генераторов, они перестраиваются гораздо быстрее – можно без труда достичь скорости переключения порядка микросекунд. Габариты, энергопотребление и стоимость ГУН значительно меньше по сравнению с ЖИГ-генераторами, однако шумовые характеристики у них гораздо хуже, что может ограничить использование ГУН в высококачественных синтезаторах. Поэтому сформировалось общепринятое представление (или, лучше сказать, миф?) о том, что на базе ГУН невозможно создать синтезаторы, обладающие столь же низкими уровнями фазовых шумов, как в аналогичных устройствах с ЖИГ-генераторами.

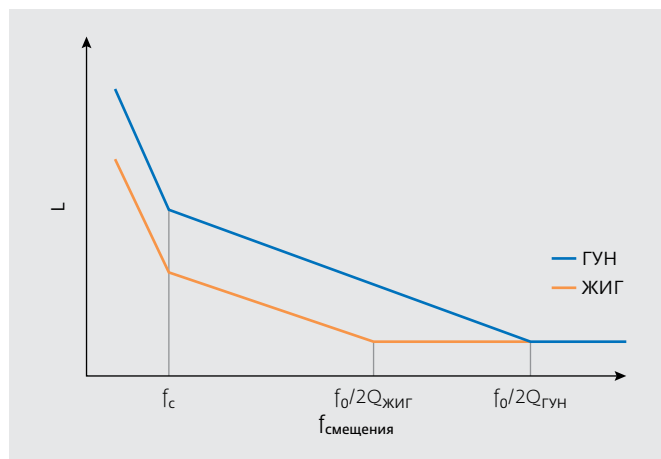


Рис.1. Сравнение собственных фазовых шумов ЖИГ- и ГУН-генераторов

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Существует ли способ уменьшения шумов ГУН до уровня, при котором его можно было бы использовать вместо ЖИГ-генератора? Сравним поведение фазовых шумов двух гипотетических генераторов (ЖИГ и ГУН), в которых используются одинаковые активные приборы. Формулу для фазовых шумов генераторов обычно записывают в виде:

$$L \approx 10 \log \left\{ \frac{GFkT}{2P} \left[\left(\frac{f_0}{2Q} \right)^2 \frac{f_c}{f^3} + \left(\frac{f_0}{2Q} \right)^2 \frac{1}{f^2} + \frac{f_c}{f} + 1 \right] \right\},$$

где G – коэффициент усиления активного прибора; F – коэффициент шума активного прибора; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; P – высокочастотная мощность, передаваемая в резонатор; Q – добротность нагруженного резонатора; f_0 – частота автоколебаний; f_c – граничная частота области преобладания фликер-шума в спектре шума активного прибора; f – отстройка частоты от f_0 .

Это выражение является модификацией хорошо известной формулы Лисона [3, 4], описывающей поведение фазовых шумов генератора при изменении отстройки от f_0 . Хотя формула определяет четыре основные области отстроек, в СВЧ-генераторах составляющая типа $1/f$ может быть исключена, поскольку ее вклад мал по сравнению с вкладом составляющей типа $1/f^2$. Это приводит к "классической" зависимости уровня фазовых шумов СВЧ-генератора от отстройки, представленной на рис.1. При очень больших отстройках оба

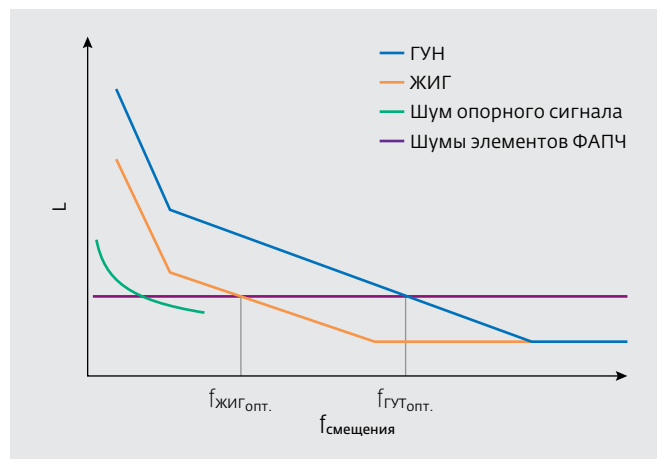


Рис.2. Характеристики фазовых шумов ГУН-, ЖИГ-генераторов, опорного генератора и компонентов кольца ФАПЧ, используемого для синхронизации

генератора должны иметь одинаковые минимальные уровни шума, определяемые отношением спектральной плотности мощности (СПМ) теплового шума активного прибора к мощности высокочастотного колебания. С понижением частоты отстройки СПМ шумы в обоих генераторах начинают расти со скоростью 20 дБ/декада. Точка перехода к области такого роста в каждом генераторе определяется добротностью используемого резонатора. В области самых малых отстроек доминируют шумы типа $1/f$, и СПМ фазовых шумов с уменьшением отстроек возрастает со скоростью 30 дБ/декада. Из рис.1 видно, что уровень фазовых шумов в ГУН значительно выше, чем в ЖИГ-генераторе, из-за разницы добротностей используемых резонаторов.

Построим теперь синтезаторы с использованием этих генераторов, т.е. обеспечим их синхронизацию колебанием малошумящего опорного генератора. Какого изменения фазовых шумов можно при этом ожидать? Ответ зависит,

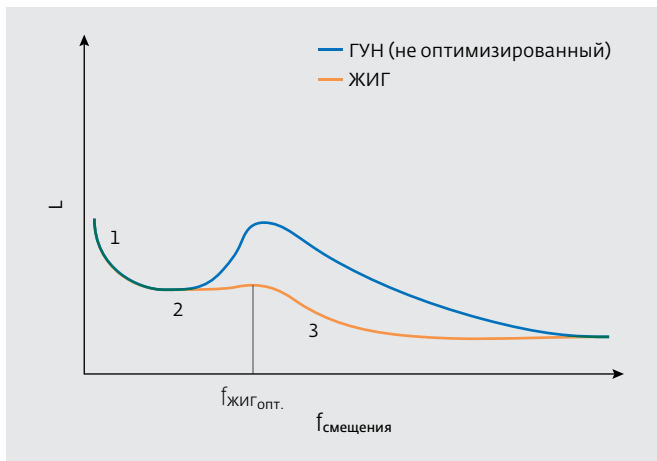


Рис.3. Характеристики фазовых шумов ЖИГ- и ГУН-генераторов, синхронизированных кольцом ФАПЧ с полосой фильтра, оптимальной для ЖИГ-генератора

разумеется, от шумовых характеристик источника опорного колебания, собственных шумов схемы ФАПЧ и полосы фильтра, включенного в кольцо ФАПЧ, как показано на рис.2 (вклады всех шумов пересчитаны на выходную частоту синтезатора).

Полосу пропускания фильтра ФАПЧ лучше всего установить равной ее оптимальной величине, которая соответствует точке пересечения кривых, пересчитанных к выходу собственных шумов ФАПЧ и собственных шумов подстраиваемого генератора, и которая обеспечивает минимальный суммарный уровень фазовых шумов. Типовая характеристика фазового шума синтезатора с ЖИГ-генератором показана на рис.3. Шумы источника опорного колебания обычно доминируют при очень малых отстройках (область 1), в то время как в почти горизонтальной части этой кривой (область 2) преобладает вклад собственных шумов ФАПЧ. За пределами полосы пропускания фильтра в кольце ФАПЧ характеристика шума синтезатора совпадает с соответствующей характеристикой фазового шума самого ЖИГ-генератора (область 3).

При синхронизации ГУН кольцом ФАПЧ с фильтром, оптимальным для схемы с ЖИГ-генератором, получается очень плохая характеристика фазового шума выходного колебания, поскольку за пределами полосы такого кольца шумы ГУН не подавляются и их уровень очень высок (см. рис.3). Более приемлемую зависимость фазового шума от отстройки можно получить при выборе полосы фильтра

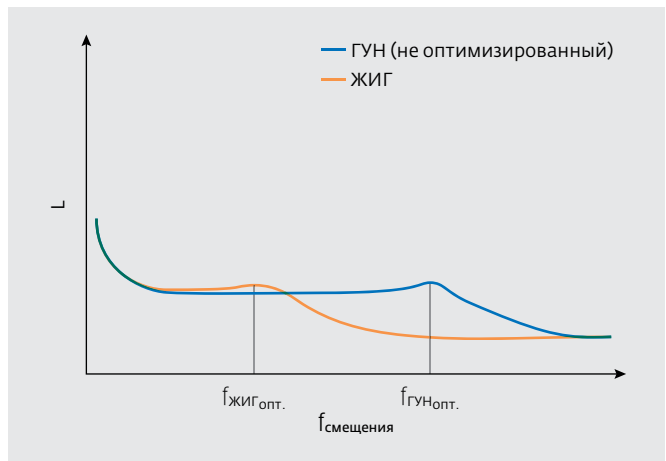


Рис.4. Синхронизация ЖИГ- и ГУН-генераторов при использовании оптимальных для каждого из них фильтров в кольцах ФАПЧ

ФАПЧ, оптимальной для схемы с ГУН (рис.4). Поскольку здесь ГУН синхронизирован гораздо более широкополосным кольцом ФАПЧ, установление синхронного режима происходит значительно быстрее, чем в схеме с ЖИГ-генератором. Однако в значительной области отстроек кривая фазовых шумов в схеме с ГУН много выше, чем в схеме с ЖИГ-генератором. Разница в фазовых шумах между синтезатором на ЖИГ-генераторе и синтезатором на ГУН определяется вкладом собственных шумов ФАПЧ и собственного шума ГУН (см. заштрихованную область на рис.5). Очевидно, что уменьшение собственных шумов ФАПЧ с одновременным расширением полосы

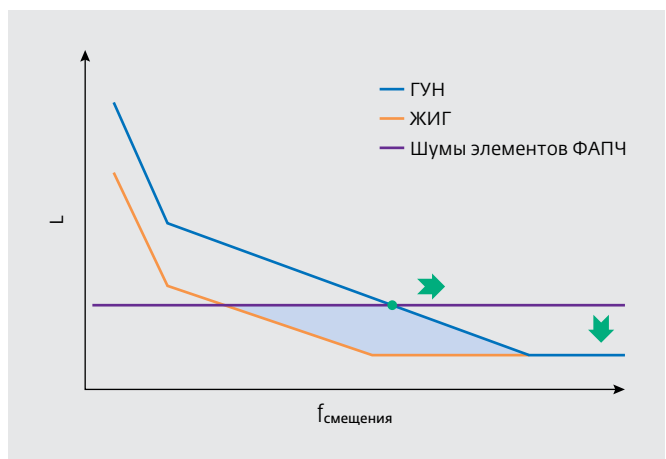


Рис.5. Уменьшение собственных шумов ФАПЧ и расширение полосы кольцевого фильтра позволяет уменьшить разницу в уровнях фазовых шумов синтезаторов с ГУН- и ЖИГ-генераторами

пропускания кольцевого фильтра позволит уменьшить эту разницу, сделав синтезатор с ГУН эквивалентным по шумовым характеристикам синтезатору с ЖИГ-генератором.

Можно ли в синтезаторе с ГУН достичь таких же характеристик, как в синтезаторе с ЖИГ-генератором? Есть ли какие-то функциональные ограничения, препятствующие этому? Подойдем к решению этой задачи с другой стороны. Предположив, что имеется идеальная, не вносящая собственных шумов, схема ФАПЧ, можно получить на ее выходе шум опорного генератора, увеличенный на $20\log N$ дБн/Гц, где N – коэффициент умножения ФАПЧ. Таким образом, фазовый шум на выходе ограничен только шумом используемого источника опорного колебания, вклад которого становится доминирующим. Коммерчески доступные сегодня кварцевые генераторы с частотой 100 МГц имеют уровни фазовых шумов от -160 до -180 дБн/Гц при отстройке 10 кГц. После идеального умножения частоты до выходной величины 10 ГГц получаются уровни фазовых шумов от -120 до -140 дБн/Гц, которые близки или даже ниже, чем у лучших ЖИГ-генераторов при тех же значениях частот.

Следует отметить, что в рассмотренном примере шумовые характеристики ЖИГ-генератора могут быть лучше при больших отстройках (от нескольких сотен килогерц до нескольких мегагерц). Для снижения уровня шума опорного генератора при больших отстройках можно строить его по более сложной схеме, пример которой представлен на рис.6. Эта схема состоит из низкочастотного (например, термостатированного кварцевого) генератора (ОСХО) и высокочастотного генератора (на керамическом (CRO) или диэлектрическом резонаторе), синхронизированного низкочастотным. Полоса кольца синхронизации выбирается таким образом, чтобы фазовые шумы при небольших отстройках определялись кварцевым генератором, а при больших (от сотен килогерц и выше) – собственными шумами генератора на керамическом резонаторе. Таким образом, цепочка из двух (или более) генераторов позволяет обеспечить настолько низкий уровень фазовых шумов при любых значениях отстройки, что ее можно использовать при разработке высококачественных синтезаторов частот. В общем, можно сказать, что генератор опорного колебания с фиксированной частотой и высокочастотными

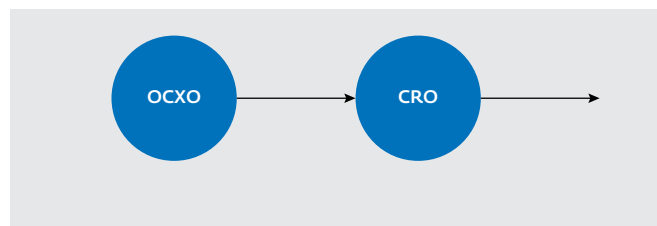


Рис.6. Комбинированные источники опорных колебаний позволяют обеспечить приемлемые уровни фазовых шумов синтезаторов при любых значениях отстройки от несущей

резонаторами позволяет сформировать выходное колебание синтезатора с уровнем фазовых шумов, сравнимым с уровнем на выходе ЖИГ-генератора, или более низким, при любых отстройках.

Таким образом, на практике ограничения по уровню шумов определяются главным образом собственными шумовыми характеристиками ФАПЧ или, другими словами, конкретной архитектурой синтезатора частоты. Ключевые принципы, которыми следует руководствоваться при разработке маломощных и имеющих малое время переключения синтезаторов с ФАПЧ, в которых используются ГУН, можно сформулировать следующим образом:

- использовать источники опорной частоты с предельно низкими фазовыми шумами;
- уменьшать собственные шумы ФАПЧ;
- расширять полосу пропускания фильтра в кольце ФАПЧ.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Этот подход был использован на практике при проектировании синтезаторов частот QuickSyn, производимых компанией Phase Matrix, Inc.

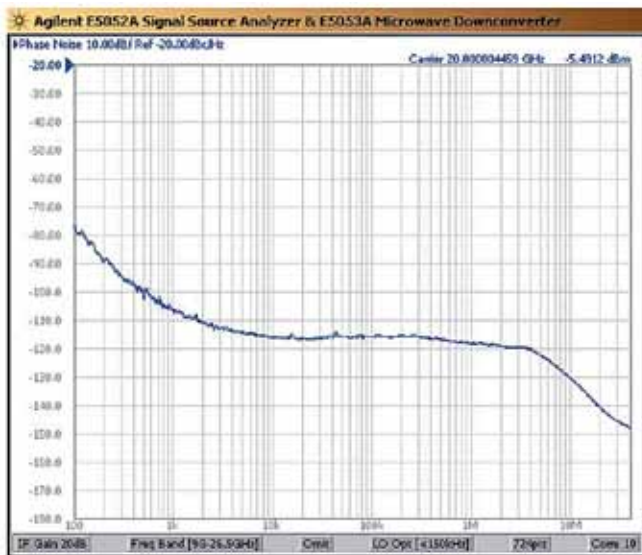


Рис.7. Характеристика фазовых шумов синтезатора при выходной частоте 20 ГГц

Линейка продукции включает модели FSW-0010 и FSW-0020 с диапазонами выходных частот 0,1-10 ГГц и 0,2-20 ГГц, соответственно. В обеих моделях используются широкополосные ГУН, синхронизированные с применением технических решений, которые обеспечивают почти свободное от шумов преобразование частоты используемого опорного источника (с увеличением фазового шума, практически по "идеальному" закону $20\log N$). Это достигается исключением или заменой делителя частоты (обычно применяющегося в схемах ФАПЧ) умножителем частоты, который уменьшает влияние шума фазового детектора и других компонентов ФАПЧ [5]. В схеме используется относительно недорогой 100-МГц термостатированный опорный кварцевый генератор с постоянным уровнем собственного шума – 163 дБн/Гц, начиная с отстройки 10 кГц. Таким образом, при идеальном умножении частоты можно было бы ожидать на выходной частоте 10 ГГц уровня -123 дБн/Гц (увеличение на 40 дБ), а на частоте 20 ГГц – уровня -117 дБн/Гц (увеличение еще на 6 дБ). Характеристика фазового шума при выходной частоте 20 ГГц показана на рис.7. Видно, что измеренный уровень шума близок к расчетному. На более низких выходных частотах фазовые шумы дополнительно снижаются по закону 6 дБ/октава. Например, при выходной частоте 5 ГГц и отстройке 10 кГц шумы снижаются до -128 дБн/Гц. Такой уровень фазовых шумов позволяет применять синтезаторы

в тех приложениях, для которых обычно требовались синтезаторы с ЖИГ-генераторами.

Из рис.7 также видно, что полоса ФАПЧ здесь близка к 4 МГц, что должно обеспечивать чрезвычайно быстрое установление частоты. В реальности скорость переключения ограничена не только динамикой главного кольца, но и свойствами других модулей синтезатора и цепей цифрового управления его работой. Для этого параметра указывается величина 100 мкс, и она гарантируется при переключении с любой исходной частоты на любую заданную в пределах всего рабочего диапазона. Заметим, что такая скорость переключения намного превосходит скорость переключения, достижимую в обычно используемых синтезаторах с ЖИГ-генераторами.

Еще одно преимущество применения ГУН вместо ЖИГ-генераторов заключается в пониженной чувствительности к вибрациям ("микрофонный эффект"), что является результатом малой массы используемого ГУН и очень широкой полосы фильтра в кольце ФАПЧ. Ядро синтезатора занимает мало места, что позволяет получить устройства небольших габаритов. Кроме того, обеспечиваются дополнительные функции: установка заданного уровня мощности и управление им, блокировка выходного сигнала, свипирование по частоте и по мощности, возможность работы в режиме списка и многочисленные виды модуляции. Итак, синтезатор QuickSyn обеспечивает рабочие характеристики полноценного измерительного прибора и широкий набор функциональных возможностей при модульном исполнении и сниженных по сравнению с аналогами габаритах и стоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Helszajn J.** YIG resonators and filters. – New York: Wiley, 1985.
2. **Chenakin A.** Frequency Synthesis: Current Solutions and New Trends. – Microwave Journal, May 2007, p.256-266.
3. **Leeson D.B.** A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum. – IEEE Proc. Letters, February 1966, v.54, p.329-330.
4. **Nallatamby J. et al.** Extension of the Leeson Formula to Phase Noise Calculation in Transistor Oscillators with Complex Tanks. – IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, March 2003, v.51, p.690-696.
5. **Chenakin A.** Frequency Synthesizers: Concept to Product. – Norwood, MA: Artech House, 2010.