

# Системные тактовые генераторы: синтезатор с фазовой синхронизацией против кварцевого генератора

Пол ШОКМАН (Paul SHOCKMAN)  
paul.shockman@onsemi.com  
Перевод: Иван САМКОВ

**Что следует использовать при разработке или модернизации печатной платы для тактирования системы: кварцевый генератор (ХО) или синтезатор с фазовой синхронизацией (PLL, ФАПЧ)? На главной плате в стойке из нескольких плат (если используется многоплатная конструкция), в одноплатном маршрутизаторе, в подсистеме серверов или хост-системе сайта — везде необходим системный генератор. Может ли использование синтезатора с фазовой синхронизацией сократить занимаемое место на плате и уменьшить ее себестоимость?**

## Системный генератор

Генерация и распределение тактового сигнала в типичной схеме тактирования (тайминга) включает в себе такие функциональные части, как источник тактовых импульсов, приводящий в действие усилитель, секция преоб-

разования к стандартному логическому уровню и распределительная сеть. Эти функции могут быть выполнены с помощью набора микросхем либо в единой микросхеме с высокой интеграцией. На рис. 1 показана универсальная схема дерева тактирования системы, с помощью которой представлены некоторые

возможные схемные решения с применением продуктов ON Semiconductor в системе тактирования.

Для источника системных тактовых импульсов необходим надежный прецизионный опорный источник импульсов, поэтому обычно используется кварцевый генератор. В данной статье проводится сравнение двух источников тактирования — модуля кварцевого генератора и синтезатора с фазовой синхронизацией. Особое внимание уделено таким ключевым характеристикам, как стоимость, занимаемое пространство на печатной плате, точность по частоте, джиттер и фазовый шум.

Современные комплексные системы могут содержать распределение нескольких тактовых сигналов разной частоты на нескольких стандартах логических уровней. В некоторых схемах требуется крутой фронт импульса и синхронизация между устройствами: в этих случаях необходимо использовать буферы с нулевой задержкой и буферы с подстройкой фронта (skew tuning). Если используется множество копий тактового сигнала, то также нужна буферизация (для разветвления сигнала). При использовании нескольких тактовых частот требуется синтезатор с фазовой синхронизацией. Все перечисленные условия можно объединить в дереве системного тактирования.

В статье проанализированы ключевые свойства, достоинства и недостатки двух основных видов источников тактирования системы. Подробно рассмотрены главные особенности таких характеристик, как точность и стабильность частоты, а также произведено сравнение по такому параметру, как джиттер.

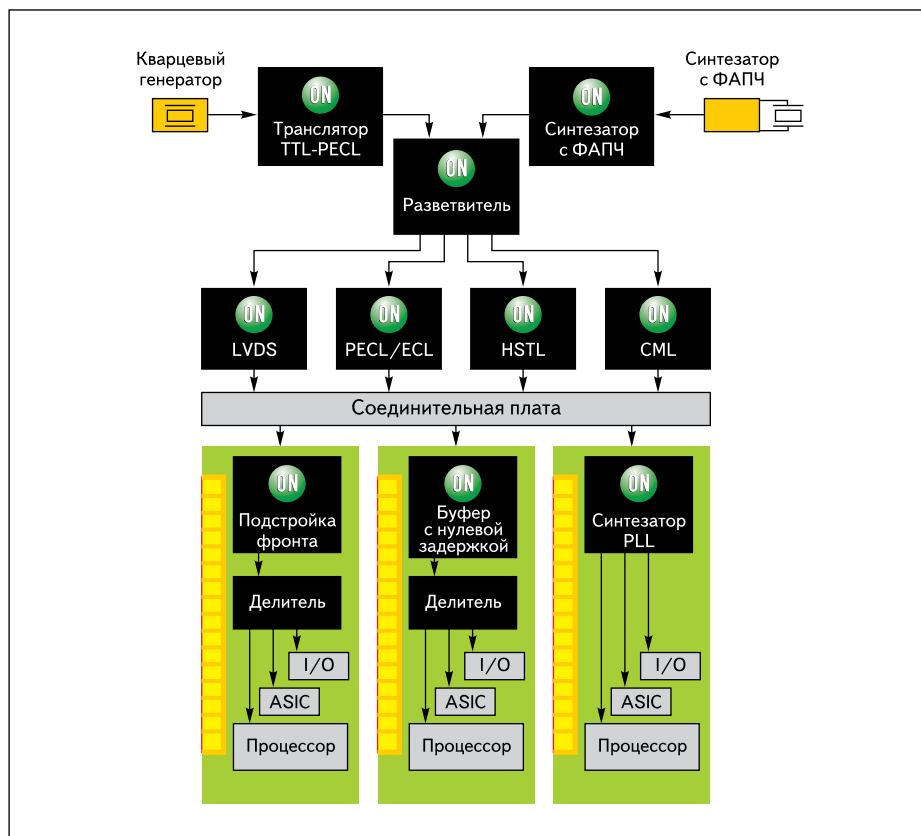


Рис. 1. Универсальная схема дерева системного тайминга

## Кварцевый генератор (ХО)

В классической системе кварцевого генератора обычно применяется встроенный кварцевый резонатор, хотя в качестве альтернативы можно использовать двухкомпонентное решение (отдельно интегральная схема и кварцевый резонатор). Для работы генератора кварцевый резонатор должен находиться в динамической сигнальной связи с инвертированным усилителем для компенсации потерь в резонаторе, корректировать фазовый сдвиг и обеспечивать согласование импеданса. Выходные уровни усилителя транслируются в уровни стандартной логики, необходимые для сети распределения тактового сигнала. На рис. 2 изображена упрощенная схема кварцевого генератора тактовых сигналов.

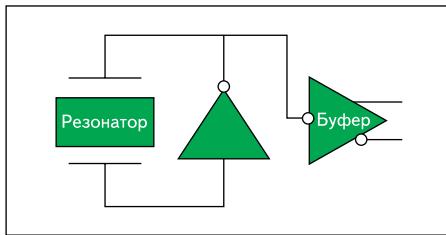


Рис. 2. Упрощенная схема кварцевого генератора

Кварцевые генераторы обычно доступны в виде герметизированного или «законсервированного» модуля с внутренним резонатором и интегральной схемой транслятора и выходного буфера. Технология выпуска таких генераторов сложна, и производственный цикл может быть достаточно длительным, что повышает их конечную стоимость. Индивидуальные требования заказчика, такие как высокие частоты, часто увеличивают стоимость генератора и время на выполнение заказа.

Кварцевые генераторы обычно работают на единственной частоте и имеют один выходной сигнал или выход в виде комплементарной дифференциальной пары. Генерация может происходить либо на основной частоте, либо на частоте гармоник.

Частота полностью определяется количеством колебаний в секунду, но порой она приблизительно равна мгновенной частоте (обратной величине периода волны), измеренной с некоторой погрешностью. Погрешность частоты определяется количеством значащих цифр в результатах измерения. Точность воспроизведения частоты — это краевая ошибка (отклонение от заданных пределов) номинального значения, обычно измеряемая в миллионных долях (ppm). Точность функционирования резонатора, как правило, измеряется при 25 °С, когда эффекты, обусловленные изменением температуры, входного напряжения, износом и вибрацией, достаточно стабильны. Стабильность частоты — это отклонение от опорной частоты за счет таких параметров, как темпе-

ратура, напряжение и время работы (износ и старение). Стабильность также измеряется в ppm. Обычно стабильность по частоте имеет значение 25, 50 или 100 ppm.

Джиттер или фазовый шум кварцевого генератора не зависят от точности и стабильности частоты. Для кварцевых генераторов суммарный джиттер должен составлять единицы пикосекунд, а фазовый шум указывается в некотором диапазоне.

## Синтезаторы с фазовой синхронизацией

Более изощренные современные системные генераторы опорной частоты — это синтезаторы с ФАПЧ, обеспечивающие более высокую гибкость и потенциально меньшую стоимость системы.

За счет использования встроенной ФАПЧ и логической схемы у генератора появляются более сложные функции и особенности, такие как работа на нескольких частотах, выходная фазовая синхронизация, множество копий выходных сигналов и независимость выходных сигналов. Кроме того, есть возможность включения и отключения выходных сигналов.

Синтезаторы с фазовой синхронизацией могут иметь выигрыш в цене по сравнению с использованием нескольких кварцевых генераторов с различными частотами гармоник. Синтезаторы с ФАПЧ производства ON Semiconductor обеспечивают сопоставимые или даже лучшие эксплуатационные характеристики, большую гибкость, меньшую потенциальную общую стоимость и уменьшают время производственного цикла по сравнению с большинством наиболее часто применяемых кварцевых генераторов. На рис. 3 представлена упрощенная модель синтезатора с фазовой синхронизацией.

Обычно синтезаторы с фазовой синхронизацией требуют наличия внешнего резонатора и содержат встроенную схему фазовой автоподстройки частоты для мультиплексирования и деления частоты резонатора. Использование внешнего резонатора обусловлено гибкостью изменения опорной частоты, но может потребовать применения дополнительных стабилизирующих конденсаторов на каждой стороне резонатора.

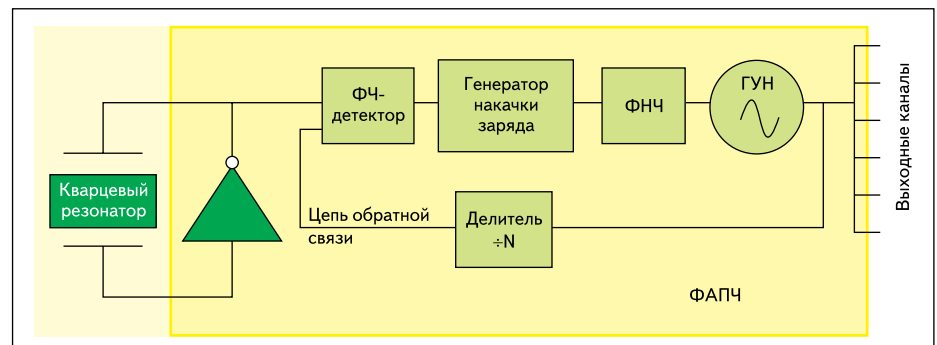


Рис. 3. Типичная структура синтезатора с фазовой синхронизацией

Как и в случае кварцевого генератора, резонатор должен быть включен в цепь обратной связи инвертирующего усилителя. Выходной сигнал этого усилителя поступает на вход фазо-частотного детектора (ФЧД), затем на генератор накачки заряда, после чего происходит фильтрация нижних частот. Выходной сигнал фильтра нижних частот (ФНЧ) является практически постоянным уровнем и контролирует генератор, управляемый напряжением (ГУН), который выдает нужную частоту. Выход генератора может быть выведен наружу (с делением частоты или без него), но он может также быть пропущен через делитель ( $\div N$ ) на вход фазо-частотного детектора в качестве обратной связи. Так как эта связь динамическая, ФЧД сравнивает сигнал обратной связи с опорным и выдает модулированный по длительности импульс сигнала. Генератор накачки заряда обеспечивает минимальное расхождение между высоким и низким уровнем модулированного сигнала. Делитель « $\div N$ » в цепи обратной связи увеличивает частоту опорного резонатора. Разность фаз между выходными сигналами ГУН и опорным сигналом приближается к нулю (буферизация с нулевой задержкой). В случае, когда цепь обратной связи ( $\div N$ ) выведена наружу микросхемы, появляется возможность регулирования фазовой задержки. Более сложные синтезаторы с фазовой синхронизацией могут содержать в себе несколько ФАПЧ, дополнительные входные или выходные делители, наборы преобразователей логических уровней и дополнительные банки управления устройствами разветвления выхода. Сигнал с ГУН должен быть преобразован к требуемому логическому уровню для использования в сети распределения системного тактирования.

Современные интегральные схемы синтезаторов с ФАПЧ имеют достаточно хорошую нагрузочную способность. Например, синтезатор с ФАПЧ может иметь 20 выходов в виде комплементарных дифференциальных пар или тактировать 40 устройств по несимметричным линиям. В одном устройстве возможность управления включением/выключением выходов может быть совмещена с возможностью управления умножением и делением частоты, что обеспечивает очень высокую гибкость.

Подобно модулям кварцевых генераторов, джиттер и фазовый шум синтезатора с ФАПЧ не зависят от точности и стабильности частоты. Синтезатор с фазовой синхронизацией добавляет на выход добавочный джиттер. Входной фазовый шум системы ФАПЧ с частотой меньше полосы частот обратной связи ФАПЧ (по уровню  $-3$  дБ) проходит в систему ФАПЧ с небольшим ослаблением, тогда как входной фазовый шум с частотой, большей полосы частот обратной связи, обычно ослабляется на  $-20$  дБ на декаду или сильнее. Это позволяет синтезатору с ФАПЧ отфильтровывать часть входного джиттера, снижая тем самым общий джиттер сигнала и фазовый шум. Фазовый шум может значительно изменять полосу частот обратной связи, и чтобы скорректировать ее, можно использовать внешний фильтр нижних частот.

### Точность системы с ФАПЧ

Синтезатор с фазовой синхронизацией привязан по частоте и фазе к сигналу резонатора и, следовательно, имеет такую же стабильность и точность. В синтезаторе с ФАПЧ значение выходной частоты кратно частоте опорного резонатора. Девиация точности воспроизведения частоты выходного сигнала остается эквивалентной точности частоты опорного резонатора (рис. 4).

Если входной сигнал имеет разброс  $\pm 20$  ppm от значения входной частоты, выходной сигнал будет отклоняться на  $\pm 20$  ppm от значения выходной частоты, независимо от множителя ( $\neq N$ ) обратной связи ФАПЧ.

#### Пример

Чип NB4N507 с множителем 8 имеет в качестве опорного резонатора кварц с частотой 16 МГц и точностью  $\pm 20$  ppm. Какова будет выходная частота и точность? Частота выходного сигнала ( $F_{OUT}$ ) будет в 8 раз больше входной частоты  $F_{IN}$ , то есть 128 МГц:

$$F_{OUT} = N \times F_{IN} = 8 \times 16 \times 10^6 = 128.$$

Если входной сигнал обладает точностью  $F_A$ , равной  $\pm 20$  ppm, то, соответственно, девиация входной частоты составляет  $\pm 320$  Гц:

$$F_{INA} = F_A \times F_{IN} = 20 \times 10^6 \times 16 \times 10^6 = 320.$$

То есть частота резонатора меняется в пределах от 16,00032 до 15,99968 МГц. Выходная частота синтезатора обладает такой же точностью ( $\pm 20$  ppm), что соответствует девиации  $\pm 2560$  Гц:

$$F_{OUTA} = F_A \times F_{OUT} = 20 \times 10^6 \times 128 \times 10^6 = 2560.$$

Получаем, что частота выходного сигнала меняется от 128,00256 до 127,997440 МГц. Отметим, что погрешность в данном примере не рассматривается.

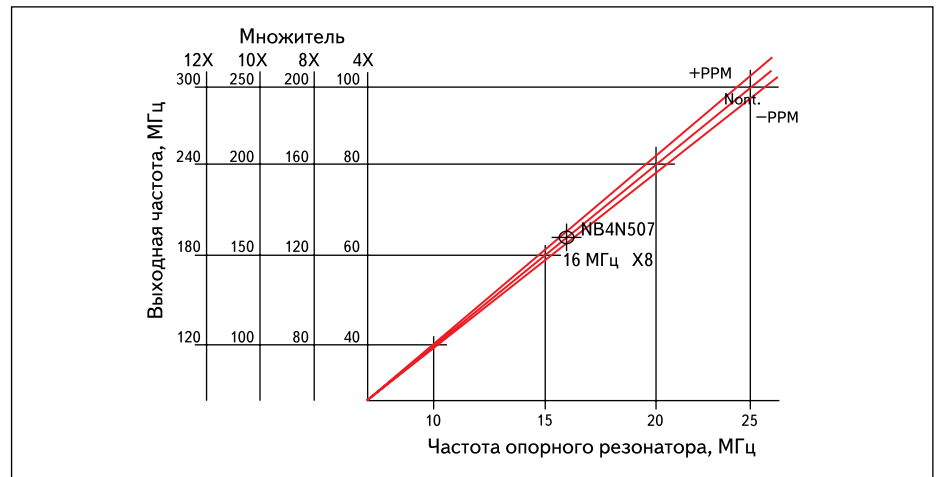


Рис. 4. Передаточная функция точности воспроизведения частоты

### Джиттер системы с ФАПЧ

Стабильный синтезатор с фазовой синхронизацией показывает точность воспроизведения частоты, в основном определяемую свойствами резонатора, в то же время он вносит дополнительный случайный джиттер  $R_j$  с величиной большей, чем имеет резонатор. Величина выходного джиттера в технической документации может быть указана как среднеквадратическое значение  $R_j$ , Cycle-to-Cycle, период или размах общего джиттера, в единицах времени (обычно это пикосекунды).

Случайный джиттер ( $R_j$ ) — это вероятностная величина, описывающая максимальное отклонение от идеального источника. Его измерение чаще всего производят во временной области на большом числе колебаний (обычно 10 000). Для определения периода джиттера производится накопление мгновенных отклонений периода колебаний (берется около 10 000 отсчетов) от идеальных значений.

Величину джиттера можно также получить из частотной области как совокупность фазового шума в измеренном отклонении частотного диапазона от несущей частоты. Время между последовательными отсчетами на несущей частоте становится сравнительно большим (что непрактично), что ограничивает нижнюю частоту полосы измерений. Верхняя граничная частота полосы измерений обусловлена приближением к уровню собственных шумов. Любое сотрясение кристалла резонатора может вызвать большую девиацию фазы. Шумы по питанию, перекрестные наводки и электромагнитные помехи — все это влияет на величину джиттера.

### Выводы

При одинаковых условиях синтезатор с фазовой подстройкой может обеспечить более дешевую систему тактирования по сравнению с кварцевыми генераторами. Чаще всего кварцевые генераторы высокой частоты

значительно дороже и требуют больше времени на изготовление. Замена кварцевых генераторов на синтезаторы с ФАПЧ может уменьшить время выхода изделия на рынок и снизить общие затраты.

При использовании в схеме нескольких кварцевых генераторов их рабочие частоты необходимо проанализировать на наличие одной общей высшей гармоники. Если эту высшую частоту гармоники получить с помощью синтезатора с ФАПЧ и затем поделить, можно получить все требуемые тактовые сигналы, исключив из схемы несколько кварцевых генераторов. Это, в свою очередь, снизит стоимость изделия и освободит дополнительное место на плате.

Также можно сократить занимаемое на плате место за счет избавления от внешних буферов для разветвления сигнала, выбрав микросхему синтезатора со встроенными буферами.

Микросхема синтезатора с ФАПЧ также может содержать дополнительную схемотехнику для подавления электромагнитных помех и тем самым обеспечивать множество гармоник низкочастотных сигналов с уменьшенными электромагнитными помехами для установки на главной плате системы. На дочерних платах можно использовать свой синтезатор с ФАПЧ для генерации и распределения чистых тактовых сигналов высоких частот.

### Новая линейка модулей формирования синхросигналов с ФАПЧ

Компания ON Semiconductor расширила свой портфель высокоэффективных систем управления тактированием, внедрив девять модулей синтезаторов с ФАПЧ (под маркой PureEdge) для замены кварцевых генераторов. Серия NBXxxxx создана для использования в оборудовании высокоскоростных сетей, телекоммуникаций и в высокопроизводительных вычислительных системах, что обеспечивает компании выход на рынок систем управления частотой.

Кремниевые микросхемы синтезаторов частоты (NBXSBA010, NBXDVA012, NBXDVA014, NBXDVA015, NBXDDA016, NBXDVA017, NBXDVA018, NBXSBA020 и NBXSBA021) имеют встроенный высокодобротный резонатор и аналоговый умножитель с ФАПЧ (для обеспечения одно- и двухчастотного режима), обладают ультранизким значением джиттера и фазового шума, обеспечивают дифференциальный выход стандарта LVPECL/CML.

Серии NBXSxxx (одночастотный режим) и NBXDxxx (двухчастотный режим) имеют лучшие в отрасли значения джиттера во временной области и отличные показания по шуму:  $-163$  дБ/Гц относительно несущей при сдвиге 10 МГц со среднеквадратическим значением фазового джиттера 0,4 пс (в полосе от 12 Гц до 20 МГц).

Данные синтезаторы имеют одночастотный и/или двухчастотный режим генерации сигнала следующих частот: 100; 106,25; 125; 155,52; 156,25; 200; 212,5; 250; 311,04 и 312,5 МГц, что отлично подходит для стандартов 1x/2x FibreChannel, SATA, iSCSI, PCIe, SONET/SDH и Ethernet. Микросхемы доступны в корпусе размером 5×7 мм для поверхностного монтажа (тип CLCC-6). ■

### Литература

1. Shockman P. System Clock Generators: A Comparison of PLL Synthesizer vs. Crystal Oscillator Clock. <http://www.networksystemsdesignline.com/howto/enterprise/199400002>