

## УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНОГО PLL/DDS СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Тармола С.А.

Титович Н.А. – к.т.н., доцент

В докладе рассматривается уменьшение флуктуации частоты на выходе гибридного PLL/DDS синтезатора частот (СЧ) за счет повышения стабильности тактового генератора DDS с помощью высокостабильного кварцевого генератора и петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Для любой аппаратуры связи важнейшим блоком, определяющим основные параметры всей системы, является СЧ. В [1] достаточно подробно рассмотрены особенности построения аналоговых и цифровых систем синтеза сетки частот, отмечены их достоинства и недостатки. Аналоговый СЧ на основе ФАПЧ (PLL) относится к следящим системам и работает с точностью до фазы, что обеспечило ей широкое распространение в системах радиосвязи [2]. В современных условиях развития, при появлении новых методов формирования, передачи и маскирования радиосигналов (ППРЧ, шумоподобные сигналы и т.д.) данный СЧ может утратить свои позиции из-за того, что не позволяет достичь высокой скорости перестройки частоты (из-за инерционности ФНЧ в цепи обратной связи). Кроме того, для получения малого шага перестройки по частоте, иногда необходимо объединение в одном синтезаторе нескольких петель ФАПЧ, что превращает его в весьма дорогое и громоздкое устройство. Поэтому аналоговые СЧ с ФАПЧ начинают вытесняться набирающими популярность цифровыми СЧ на основе DDS. Их основные достоинства - высокая скорость перестройки частоты без разрыва фазы, высокая разрешающая способность и широкая синтезируемая полоса частот. Тем не менее, улучшить шумовые характеристики в стационарном режиме, в сравнении с СЧ с ФАПЧ, не удастся. Кроме того, данный СЧ обладает такими недостатками, как высокая потребляемая мощность (практически прямо пропорциональна тактовой частоте) и ограниченное значение выходной частоты  $f_{\text{вых.макс.}} = 0,5 \cdot f_{\text{такт.}}$ .

В итоге оптимальным решением при проектировании СЧ, является построение гибридного PLL/DDS синтезатора [1], который позволяет получить наилучшие параметры по разрешению, скорости перестройки и чистоте выходного спектра. Схема построения такого СЧ приведена на рис. 1. Благодаря использованию DDS, СЧ получает возможность быстро и очень малого шага перестройки частоты. В свою очередь, в синтезаторе с ФАПЧ опорная частота, полученная от DDS, умножается на  $K = M/N$ , где  $M$  – коэффициент деления выходной частоты генератора управляемого напряжением (ГУН),  $N$  – коэффициент деления опорной частоты. Т.к. в роли опорной частоты для ФАПЧ синтезатора используется выходная частота DDS синтезатора, то в синтезаторе ФАПЧ будет умножено как значение самой частоты, так и шага ее перестройки. Соответственно, комбинируя перестройку DDS и синтезаторов ФАПЧ, можно перекрыть очень широкий диапазон частот. В то же время, частота на выходе DDS будет меняться в очень малом диапазоне, что позволит использовать для фильтрации выходного сигнала DDS монолитные полосовые фильтры. Данное решение позволяет получить очень хорошее подавление побочных компонентов [1].

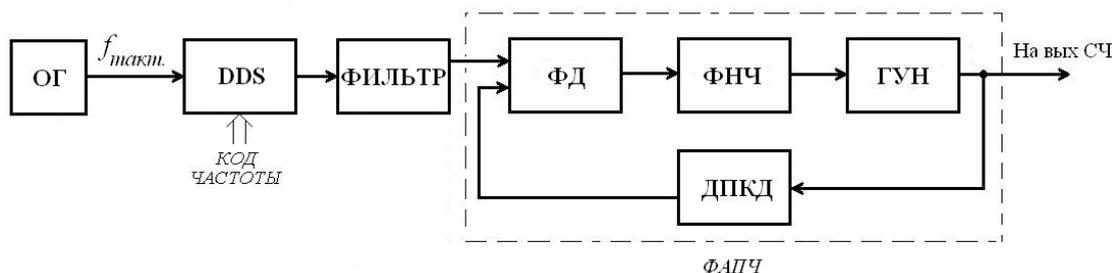


Рисунок 1 – Схема гибридного PLL/DDS синтезатора частот

Хотя СЧ DDS практически не подвержены температурному дрейфу и старению, а показатели флуктуации генерируемых частот очень низкие (1-3 ppm и ниже), его фазовые шумы находятся на уровне опорного генератора тактовых сигналов. Соответственно, несмотря на то, что в СЧ DDS присутствует эффект уменьшения фазовых шумов в процессе деления частоты, ОГ является их главным источником. Поэтому повышение стабильности частоты ОГ улучшит параметры не только DDS, но и PLL/DDS СЧ в целом.

Современные опорные генераторы имеют широкую классификацию [3]. Для определённых задач, подбираются генераторы с необходимыми параметрами. Важнейшими характеристиками ОГ тактового сигнала, является нестабильность частоты (в ppm), джиттер (в пико- или наносекундах) и фазовый шум (в dBc/Гц, т.е., относительно уровня несущей). Из известных генераторов, наибольшей стабильностью частоты обладают квантовые стандарты частоты и СВЧ генераторы, однако их использование ограничено из-за массогабаритных и энергетических характеристик. Также они имеют высокую стоимость.

В системах радиосвязи, в качестве опорного генератора, в подавляющем большинстве случаев, выступают кварцевые резонаторы. Они отличаются хорошими техническими характеристиками и относительно низкой стоимостью. К их недостаткам можно отнести небольшой частотный диапазон ( $f_{\text{резонансная}} < 40$  МГц). Данное ограничение можно обойти путём применения высших гармоник, однако при этом снижается добротность

резонатора, и, как следствие, возрастает частотная нестабильность синтезированных сигналов. Другой проблемой данного типа резонатора является его старение, которое наблюдается в первый год работы резонатора. Также для их характерна сильная зависимость от температуры окружающей среды. Конструктивные ограничения кварцевых генераторов, не дают возможности уменьшить стоимость, повысить технологичность, применить групповые и интегральные методы изготовления резонаторов.

Качественной и инновационной альтернативой для кварцевых резонаторов являются микроэлектромеханические (MEMS) резонаторы, которые только начинает приобретать популярность [4]. Новые генераторы лишены многих недостатков кварцевых устройств. Одно из их достоинств - возможность встройки резонатора в кристалл микросхемы. Генераторы на основе МЭМС-резонаторов могут обеспечить высокую стабильность и добротность (20000 – 30000). Также они имеют низкий уровень шумов, малое энергопотребление и более широкий исходный диапазон частот. Хотя они имеют хорошие показатели термостабильности, в широком диапазоне температур (–40 до +85 °С), но по этому параметру они всё ещё проигрывают кварцевому резонатору. Данный факт обусловлен тем, что в МЭМС-резонаторах используется кремний, размягчающийся с повышением температуры, что приводит к изменению критического параметра – частоты. На данный момент, разнообразие по генерируемым частотам невелико (8...1800МГц). Ещё из недостатков можно отметить достаточно высокое напряжение смещения (20...70В) и высокое эквивалентное сопротивление (30 кОм). Первый из недостатков ограничивает их использование в устройствах с батарейным типом питания, а из-за второго, с увеличением частоты, сигнал практически пропадает.

В связи с тем, что технология MEMS-резонаторов ещё развивается и по параметру стабильности частоты они не сильно опережают кварцевый резонатор, при проектировании высокостабильных тактовых генераторов часто используется последний. Для улучшения стабильности ОГ можно использовать низкочастотный кварцевый резонатор в связке с системой ФАПЧ. Термостабильный кварцевый резонатор выступает ОГ для неперестраиваемой системы ФАПЧ с высокочастотным управляемым напряжением генератором. В замкнутом кольце ФАПЧ, на входе фазового детектора (ФД) частоты ОГ и ГУН будут равны (за счёт использования делителя с фиксированным коэффициентом деления (ДФКД) частоты ГУН в цепи ОС). Тем не менее, фаза между двумя генераторами не может быть постоянно одинакова, поэтому в системе постоянно будет наблюдаться небольшой фазовый сдвиг (остаточное рассогласование по фазе). За счёт этого, на выходе ФД образуется напряжение, которое будет постоянно воздействовать на высокочастотный ГУН, тем самым удерживая его частоту постоянной. В итоге, практически полностью будет устраняться частотная ошибка, а на DDS будет поступать стабильный высокочастотный тактовый сигнал.

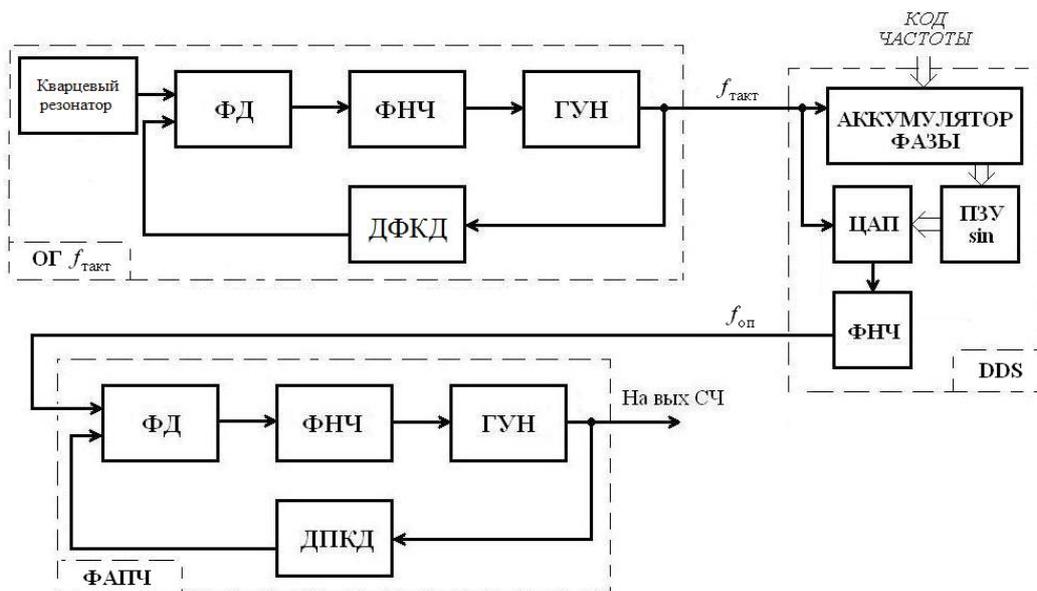


Рисунок 2. Пример применения ФАПЧ в качестве стабилизации тактовых импульсов для СЧ DDS.

Таким образом, предлагаемая структурная схема СЧ с улучшенными шумовыми характеристиками будет выглядеть как на рис. 2.

Список использованных источников:

1. Ридико Л.И. DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. - 2001. № 7-8.
2. Тармола С.А. Интегральные синтезаторы частоты в передатчиках магистральной радиосвязи./ 54-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2018. - 116-117 с.
3. Поликаровских А.И. Современные опорные генераторы для систем синтеза частот и сигналов./ Вестник Воронежского государственного технического университета, 2014.
4. Майская В. МЭМС-резонаторы. Процесс пошел./ Электроника, №4 (00110), 2011..