



Александр ОДНОЛЬКО
Алексей ЦВЕТКОВ
Александр АРЕДОВ
Вячеслав КОКАРЕВ

Микросхема активной части программируемого кварцевого генератора в составе тактового генератора ГК 109-С

В статье рассматривается однократно программируемый генератор ГК 109-С, который выпускает российское предприятие «ЛИТ-Фонон» на базе микросборки. С помощью кварцевого резонатора собственного производства его напрямую подсоединяют к микросхеме ПМК «Миландр».

Введение

В своем непрерывном развитии рынок генераторов постоянно выдвигает все новые и более жесткие требования к появляющимся изделиям. Потребитель хочет получать высокочастотную, надежную и в то же время малогабаритную и малопотребляющую продукцию. При этом существует потребность в замещении старой элементной базы на новую без серьезной переделки электронных модулей.

Основной экономической проблемой производства является выпуск партии генераторов с одинаковой частотой, которая в обычных генераторах зависит от частоты кварцевого резонатора. Ведь для подгонки частоты одного резонатора требуется много времени. А в жизни потребителю необходима выходная частота, предел которой может

варьироваться от сотен килогерц до сотен мегагерц. Следовательно, для выпуска обширного частотного ряда генераторов нужны колоссальные материальные затраты. Поэтому для уменьшения стоимости производства необходимо создавать концептуально новые (программируемые на разные частоты) генераторы, работающие на принципе ФАПЧ и имеющие стабильную частоту с низкими фазовыми шумами. При этом разброс частоты применяемых кварцевых резонаторов может достигать нескольких мегагерц.

В конце 2009 года началась разработка активной части программируемого кварцевого генератора для производства линейки генераторов ГК 109-С. Перед специалистами стояла задача: разработать кристалл с размерами не более 1,6×1,5 мм, работающий с пьезоэлементами частотой 8–12 МГц.

Основным требованием было отсутствие любых внешних компонентов при сборке генератора, кроме самого пьезоэлемента. Следовало найти техническое решение для увеличения диапазона перестройки частоты резонатора подстроечными емкостями при минимальной площади на кристалле, осуществить проработку компактной однократно программируемой ячейки памяти и создать протокол передачи данных для записи/чтения информации на стадии программирования, используя только один вывод микросхемы.

В итоге в середине 2010 года был освоен в серийном производстве генератор ГК 109-С.

На рис. 1 приведен пример применения микросхемы в составе генератора ГК 109-С. В этом миниатюрном корпусе пьезоэлемент располагается непосредственно над микросхемой.



Рис. 1. Применение микросхемы в составе генератора ГК 109-С

Новизна и практическая значимость

Особенности генератора ГК 109-С:

1. Этот генератор не имеет российских аналогов.
2. Малые массо-габаритные характеристики.
3. Два диапазона питающего напряжения: 3,3 и 5 В.
4. При сборке не требуются дополнительные компоненты, кроме пьезоэлемента.
5. Широкий диапазон перестройки частоты кварцевого резонатора в совокупности с большой разрядностью делителей системы ФАПЧ позволяет при программировании настраивать частоту генератора 1–125 МГц с шагом сетки от 4 кГц до 3 МГц и точностью не хуже 3 ppm. Широкая сетка дает возможность выбрать вектор программирования либо в сторону лучшей характеристики фазового шума, либо в заданную частоту.
6. Программируемые функциональные возможности.

Все перечисленные особенности расширяют область применения генератора, например, для тактирования различных логических схем, включая микроконтроллеры и микропроцессоры.

Принципы работы

Этот программируемый генератор реализован на системе импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ), представленной на рис. 2.

ИФАПЧ состоит из делителей основной и опорной частоты с коэффициентами деления N и M, импульсного частотно-фазового детектора (ЧФД), схемы накачки заряда, петлевого фильтра низких частот (ФНЧ)

и генератора, управляемого напряжением (ГУН). Такая система позволяет получить частоту на выходе ГУН, которая определяется по формуле:

$$F = F_{on}(N/M), \quad (1)$$

где F_{on} — входная опорная частота системы.

Принцип действия системы: частотно-фазовый детектор вырабатывает импульсный управляющий сигнал, пропорциональный разности фаз между его входными сигналами, с учетом знака этой разности. Схема накачки заряда совместно с фильтром низких частот преобразует этот сигнал в управляющее напряжение ГУН. Входными сигналами детектора являются поделенная в M раз опорная частота (частота сравнения F_c) и поделенная в N раз частота ГУН. Система является пропорционально-интегральным регулятором, в котором устойчивое статическое состояние возможно только при отсутствии какой-либо фазовой ошибки между входными сигналами ЧФД. Для этого необходимо, чтобы $F_{on}/M = F/N$, откуда и получается выражение (1).

Структурная схема и описание функционирования генератора ГК 109-С

Значение опорной частоты совместно с коэффициентами деления делителей опорной и выходной частоты определяет сетку допустимых значений выходной частоты генератора (рис. 3). При используемой данной разрядности счетчиков шаг этой сетки может быть от 4 кГц. Кроме того, для обеспечения генерации выходной частоты с максимальной возможной точностью осуществляется дополнительная подстройка опорного генератора путем подключения к нему одного или нескольких подстроечных конденсаторов, входящих в состав кристалла.

Вместе с коэффициентами деления в память ЭПЗУ записываются функции и режимы микросхемы.

Генератор может быть запрограммирован со следующими функциями и режимами:

- Функция OE (рис. 4б). При подаче на вход OE «лог. 1» на выходе OUT — выходной сигнал. При подаче «лог. 0» — выход в состоянии высокого импеданса, при этом микросхема функционирует.
- Функция «Выключено» (рис. 4а) (PWR_DWN). При подаче на вход OE «лог. 1» на выходе OUT — выходной сигнал. При «лог. 0» — генератор в состоянии «Выключено» и выход в «лог. 0».
- Режим синхронного и асинхронного выключения. В режиме синхронного выключения при подаче на вход OE «лог. 0» выход микросхемы пропускает два полных такта частоты (рис. 4 t_{PHZ_S}). Включение микросхемы всегда происходит синхронно (рис. 4 $t_{PZH_A/S}[ST/OE]$).

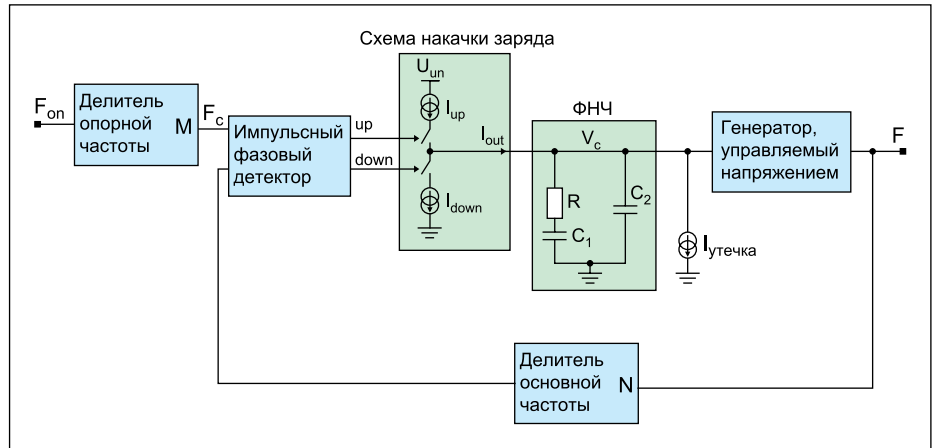


Рис. 2. Структурная схема системы ИФАПЧ

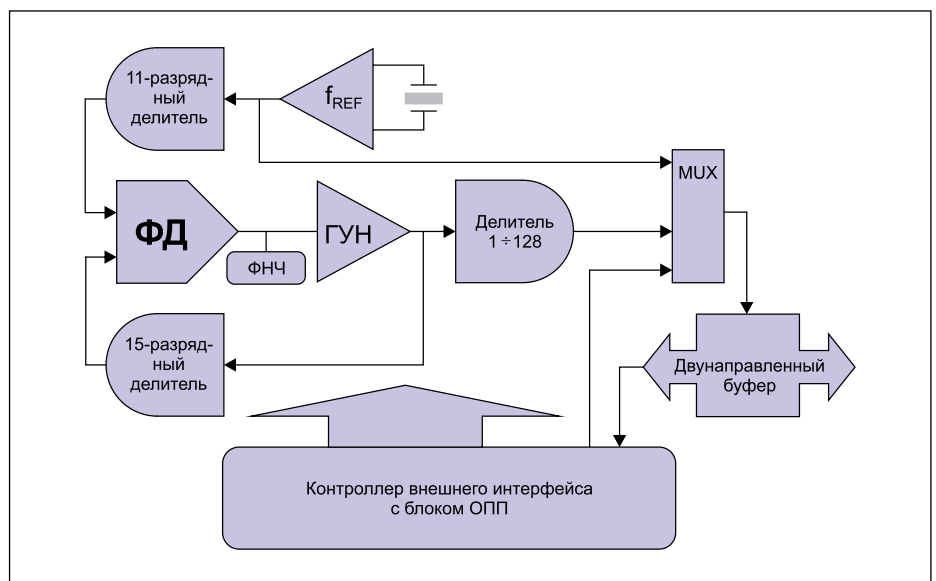


Рис. 3. Структурная схема генератора

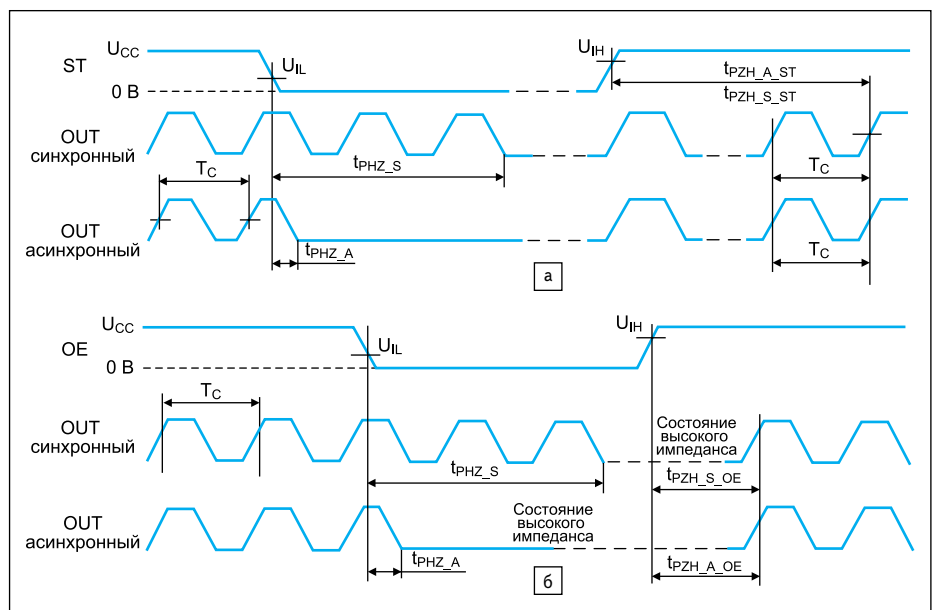


Рис. 4. Временная диаграмма работы генератора при запрограммированной функции с синхронным или асинхронным выключением: а) «Выключено»; б) «OE»

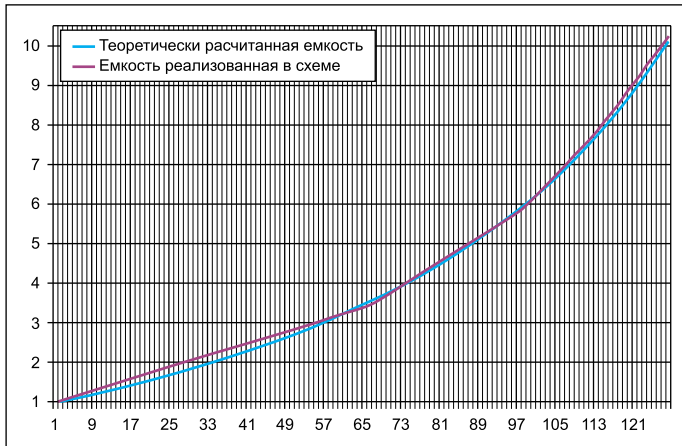


Рис. 5. Зависимость нагрузочной емкости от кода (теоретическая и реализованная в схеме)

Особенности опорного генератора

Для перекрытия шага сетки, заданного делителем опорной частоты, необходимо иметь хороший диапазон перестройки опорного генератора при соблюдении двух требований: это минимальная площадь топологии блока и большая линейная зависимость изменения частоты генерации от выбора нагрузочной емкости.

Сначала была теоретически рассчитана минимальная и максимальная нагрузочная емкость для оптимального диапазона перестройки. Затем рассчитаны промежуточные номиналы емкостей, при которых сохранялась линейная зависимость частоты генерации от кода. На рис. 5 представлен теоретический закон изменения емкости нагрузки от кода и практическая реализация в схеме.

В схеме реализована емкость подстройки, имеющая зависимость от кода, близкую к теоретической. Для создания подобной зависимости необходимо после определенного кода увеличивать шаг, с которым растет нагрузочная емкость. Реализовано это было при помощи дополнительных емкостей, подключаемых младшими битами, при условии, что старшие биты имеют необходимые значения.

Дополнительная емкость в функцию суммарной нагрузочной емкости входит как следующее произведение:

$$C = X \times K_i \times K_j, \quad (2)$$

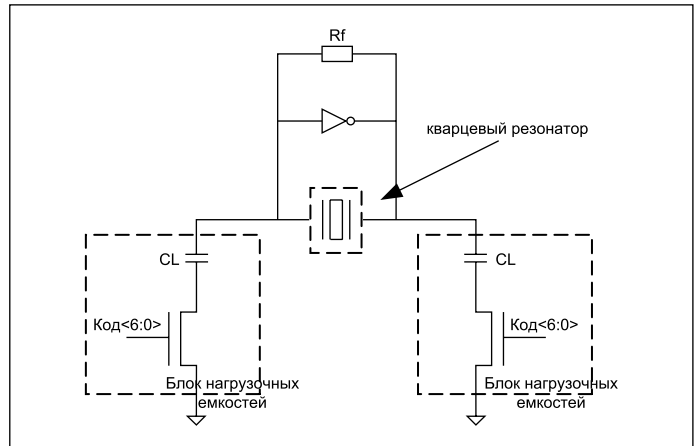


Рис. 6. Структура блока подстройки частоты кварцевого резонатора

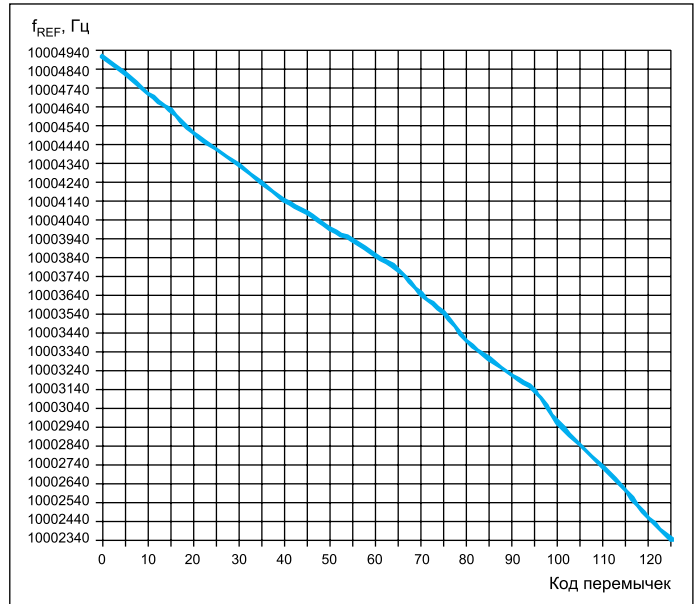


Рис. 7. Измеренная зависимость частоты опорного генератора от кода управления (характеристика измерена в составе собранного генератора ГК 109-С)

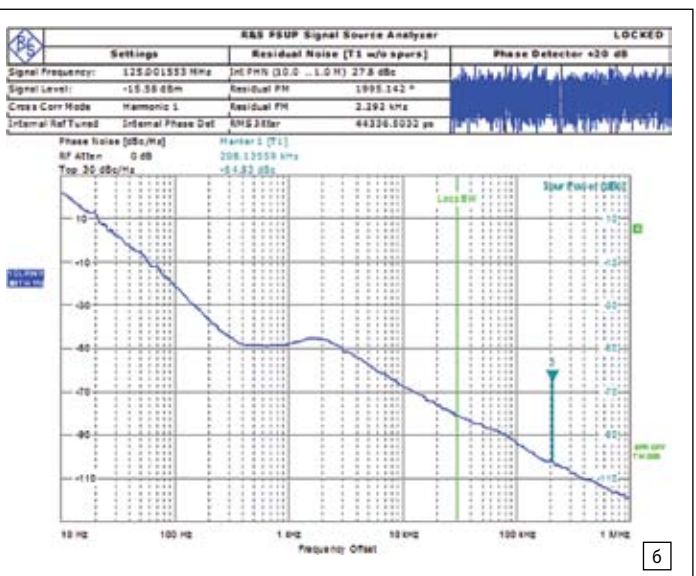
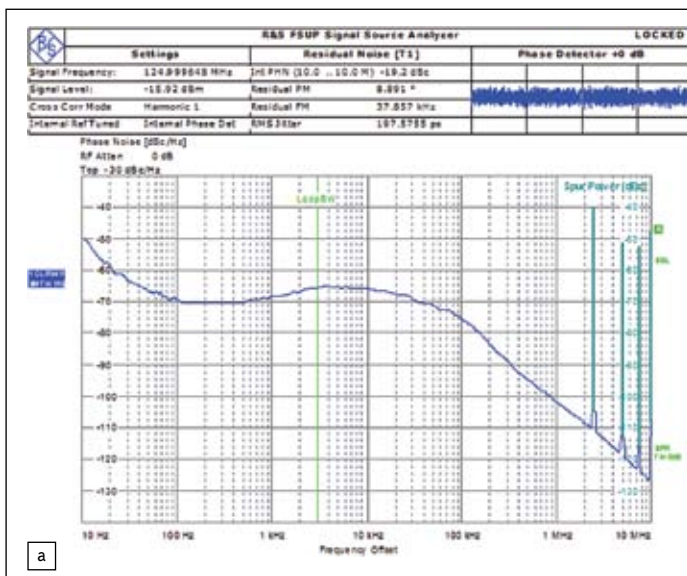


Рис. 8. Диаграмма фазового шума генератора: а) ГК 109-С; б) EPSON 8002

где K_i — старшие биты, задающие код, после которого шаг увеличивается; K_j — младший бит, подключающий дополнительную емкость; X — номинал дополнительной емкости.

В ходе разработки блока нагрузочных емкостей было выбрано три точки, в которых наклон графика зависимости нагрузочной емкости от кода будет меняться.

Зависимость нагрузочной емкости от кода описывается следующей функцией:

$$C_L = 2 + 0,068 \times K_0 + 0,15 \times K_1 + 0,3 \times K_2 + 0,6 \times K_3 + 1,2 \times K_4 + 2,4 \times K_5 + 4,8 K_6 + 0,068 \times K_6 \times K_0 + 0,15 \times K_6 \times K_1 + 0,3 \times K_6 \times K_2 + 0,6 \times K_6 \times K_3 + 1,2 \times K_6 \times K_4 + 2,4 \times K_6 \times K_5 + 0,1 \times K_6 \times K_5 \times K_0 + 0,2 \times K_6 \times K_5 \times K_1 + 0,4 \times K_6 \times K_5 \times K_2 + 0,8 \times K_6 \times K_5 \times K_3 + 1,6 \times K_6 \times K_5 \times K_4 + 0,068 \times K_6 \times K_5 \times K_4 \times K_0 +$$

$$+ 0,15 \times K_6 \times K_5 \times K_4 \times K_1 + 0,3 \times K_6 \times K_5 \times K_4 \times K_2 + 0,6 \times K_6 \times K_5 \times K_4 \times K_3.$$

Блок опорного генератора содержит семь переключаемых индивидуально контролируемых конденсаторов (бинарный код [0:127]). Структура блока показана на рис. 6.

Такой алгоритм подключения нагрузочных емкостей позволяет добиться диапазона перестройки до 260 ppm в зависимости от характеристики кварцевого резонатора (рис. 7).

Заключение

Как уже было отмечено, генератор ГК 109-С обладает расширенными возможностями и хорошими характеристиками, а главное — не имеет российских аналогов. Основные плюсы для потребителя — малые

габариты и вес, а также широкий диапазон программирования выходных частот.

Еще одним важным преимуществом является программирование генератора перед поставкой потребителю. По желанию заказчика программирование можно осуществлять по двум направлениям:

- Минимизация фазовых шумов при небольших требованиях к точности подгонки к заданной частоте.
- Максимальная точность подгонки к заданной частоте при меньших требованиях к фазовым шумам.

На диаграммах (рис. 8) представлено сравнение характеристик фазового шума ГК 109-С с EPSON 8002 после программирования на частоту 125 МГц при использовании алгоритмов программирования производителей. ■