

Высокостабильный кварцевый генератор 10 МГц с цифровой компенсацией температурного ухода частоты

Дмитрий Тумайкин (Ярославская обл.)

В статье приведено описание кварцевого генератора, аппаратная часть которого реализована на ПЛИС и микроконтроллере. Представлена блок-схема генератора, размещённая в ПЛИС. Даны рекомендации по выбору кварцевых резонаторов и калибровке генератора.

Одним из главных факторов, влияющих на стабильность частоты генераторов, в том числе кварцевых, являются колебания температуры окружающей среды. Температура воздействует не только на кварцевый резонатор, но и на все элементы схемы, которые также являются источниками нестабильности генерируемой частоты.

Классическим способом борьбы с дестабилизирующими факторами является помещение схемы генератора в термостат, поддерживающий температуру всех компонентов порядка 50...60°C с достаточно высокой точностью. Для вывода генератора на номинальную частоту требуется время от 30 мин до 1 ч, а иногда и более. За счёт теплоизоляции габариты такого генератора весьма значительные. Качество стабилизации частоты хорошее. Такие генераторы называют термостатированными.

Существуют генераторы термокомпенсированные, в схему которых введены элементы, компенсирующие уход частоты генератора при измене-

ниях температуры. Одним из таких генераторов является ГК-321-ТК-10М; паспортная точность поддержания частоты в диапазоне температур -10...+60°C составляет $(0,6...0,8) \times 10^{-6}$. Испытания образца этого генератора, проведённые автором, показали изменение частоты в указанном температурном диапазоне 20 Гц, т.е. уход частоты от номинального значения составил $\pm 1 \times 10^{-6}$.

В статье предлагается новый способ стабилизации частоты в термокомпенсированных кварцевых генераторах. Аппаратная часть генератора, разработанного на его основе, реализована на ПЛИС и микроконтроллере (МК).

Характеристики откалиброванного генератора приведены в таблице.

Генератор состоит из двух частей: передающей и приёмной.

ПЕРЕДАЮЩАЯ ЧАСТЬ

Передающая часть схемы генератора отслеживает окружающую температуру. В качестве датчика температуры использован температурно-зависимый кварцевый резонатор типа РКТ-206, применяемый в электронных термометрах. При комнатной температуре его резонансная частота составляет примерно 32 кГц. Кварцевый резонатор реагирует на изменение температуры с чувствительностью 2 Гц/град., причём с ростом температуры его резонансная частота понижается. Корпус резонатора – цилиндрический, диаметром 1,5 мм и высотой 6 мм. Резонатор определяет частоту вспомогательного генерато-

ра 32 кГц, которая является функцией температуры.

На рисунке 1 приведены временные диаграммы передающей части устройства. Из-за тепловой инерционности компонентов схемы генератора считывание информации о температуре производится один раз в 5 с, что позволяет отслеживать изменение температуры с дискретностью 0,1°. За это время вспомогательный генератор отсчитывает $2^{15} \times 5 = 163\,840$ импульсов. Заданный диапазон изменения температуры $t_{\text{в}} - t_{\text{н}} = 70 - (-15) = 85^\circ$. При коэффициенте преобразования 1,65 Гц/град. изменение частоты генератора составит $1,65 \times 85 = 140$ Гц за одну секунду, а за 5 с, соответственно, 700 Гц.

Очевидно, что из общего числа 163 840 импульсов информацию о температуре содержат последние 700. Поэтому в схеме предусмотрено накопление импульсов, следующих после 5 с счёта. Пятисекундный интервал времени формируется на основе кварцевого генератора 10 МГц. Некоторая нестабильность этого генератора на выходе *Osc_10MHz* при формировании 5-секундного интервала не сказывается на конечном результате: компенсация отклонения частоты от номинального значения заложена в принцип работы.

Таким образом, изменение температуры преобразуется в унарный код *Temperature_Unar_Code*, импульсы которого один раз в 5 с поступают на МК для обработки.

ПРИЁМНАЯ ЧАСТЬ

В ответ на полученную информацию о температуре микроконтроллер генерирует специальный код коррекции частоты *Serial_Correct_Code*, учитывающий нелиней-

Технические параметры генератора

Номинальная частота	10 МГц
Погрешность	$\pm 0,2 \times 10^{-6}$
Диапазон рабочей температуры	-15...+70°
Диапазон коррекции частоты (цифровая подстройка)	6 Гц
Диапазон коррекции частоты (аналоговая подстройка)	20 Гц
Напряжение питания	+5 В
Потребляемый ток	100 мА
Время готовности к работе	1 мин

ность температурной характеристики обоих кварцевых резонаторов. Эту функцию осуществляет приёмная часть устройства.

Следует отметить, что в данной схеме коррекция частоты реализуется не за счёт сжатия или растяжения периода следования импульсов основного генератора, а путём «выбивания» с определённой периодичностью избыточных импульсов, равномерно распределённых во времени.

На рисунке 2 приведены временные диаграммы приёмной части устройства. Для наглядности слева «выбит» каждый 10-й, а справа – каждый 4-й импульс. На практике «выбивание» импульса может происходить не чаще одного раза за 50 000 импульсов.

Для минимальной температуры диапазона желательно, чтобы частота генератора *Osc_10MHz* была на несколько десятков герц больше номинальной (10 МГц). Таким образом, наибольшее число импульсов, которое необходимо равномерно «выбить» из исходной частоты, составит приблизительно 200 за секунду.

ГЕНЕРАТОРЫ

Оба генератора – основной и вспомогательный – реализованы с использованием активных элементов ПЛИС. Для надёжного запуска и поддержания стабильной работы на краях температурного диапазона использован метод перевода входного логического элемента генераторов в линейный режим работы. Из ПЛИС выведены линии для подключения внешних элементов, необходимых для достижения баланса фаз и сдвига частоты.

Предусмотрена цифровая подстройка выходной частоты основного генератора 10 МГц в пределах 8 Гц при помощи перемычек. Возможен и альтернативный способ коррекции частоты путём введения подстроечного резистора.

На входе вспомогательного генератора 32 кГц установлен полевой транзистор. Его наличие призвано обеспечить высокое входное сопротивление схемы для кварцевого температурного датчика, у которого значение динамического сопротивления R_k при комнатной температуре составляет порядка 70 кОм, а с повышением температуры до конца

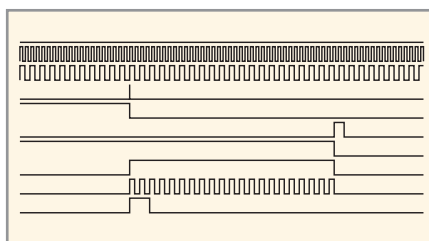


Рис. 1. Демонстрационная диаграмма работы передающей части устройства

(эпюры напряжений, сверху вниз):

Osc_10MHz – частота генератора 10 МГц до стабилизации; *Osc_32_Thermo* – частота генератора 32 кГц; *End_5s* – конец 5-секундного интервала; *5s* – импульс 5 с; *Count* – импульс переполнения счётчика по модулю 163840; *Count_32* – импульс с длительностью, равной времени полного заполнения счётчика по модулю 163840; *Overfilling_Time* – импульс выдачи температурного кода; *Temperature_Unar_Code* – унарный код температуры; *Begin_Essue* – начало выдачи температурного кода

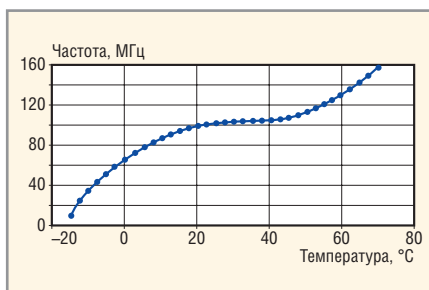


Рис. 3. Температурно-частотная характеристика кварцевого генератора 10 МГц

диапазона R_k может значительно увеличиваться. Корпуса обоих кварцевых резонаторов спаяны между собой для хорошего теплового контакта.

С ростом температуры частота основного генератора увеличивается. Испытания устройства в термостате показали, что в рабочем температурном диапазоне она изменяется на 160 Гц (см. рис. 3). Вид графика температурно-частотной характеристики (ТЧХ) зависит от типа кварцевого резонатора. На рисунке 4 приведена зависимость кода коррекции от температуры.

ВЫБОР РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ 10 МГц и 32 кГц

Принцип работы устройства определяет требования к резонансным частотам кристаллов:

1. Резонансная частота кварцевого резонатора 10 МГц при минимальной температуре рабочего

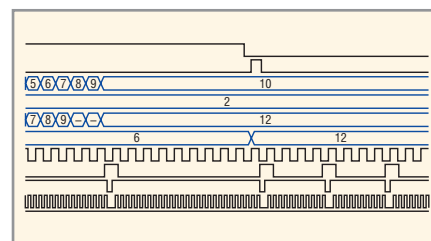


Рис. 2. Демонстрационная диаграмма работы приёмной части устройства

(эпюры напряжений, сверху вниз):

Start_Enable – стартовый импульс цикла; *Clearn* – импульс сброса счётчиков и перезаписи данных в буфере-защёлке; *Correct_Bin_Code* – бинарный код коррекции; *Shift_Bin_Code* – бинарный код сдвига частоты; *Summary_Bin_Code* – суммарный бинарный код коррекции; *Final_Bin_Code* – код коррекции после буфера; *Osc_32_Thermo* – частота генератора 32 кГц; *Correct_Pulses* – импульсы коррекции частоты *Osc_10MHz*; *Correct_Avoid_Pulses* – импульсы коррекции рабочие, равные 0,5 мкс; *Out_10MHz* – вид частоты на выходе устройства

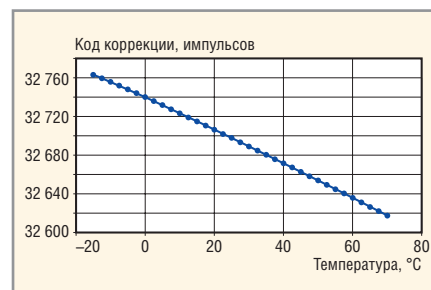


Рис. 4. Зависимость кода коррекции от температуры

диапазона не должна быть ниже 10^7 Гц;

2. Резонансная частота температурно-зависимого кварцевого резонатора 32 кГц при минимальной температуре не должна быть выше 32 768 Гц.

Нарушение 1-го условия в сторону значительного увеличения частоты приведёт к неоправданному увеличению числа битов для обработки данных, а уменьшение – к неработоспособности устройства. Нарушение 2-го условия приведёт к аналогичным последствиям. Желательно, чтобы оба резонатора имели невысокое значение динамического сопротивления R_k и были стабильны во времени.

Если нет возможности применить кварцевый резонатор 32 кГц нужной частоты, можно изменить условия, уменьшив значение модуля пересчёта в программе ПЛИС. Частоту генератора 10 МГц до точки коррекции можно повысить подбором ёмкости в схеме.

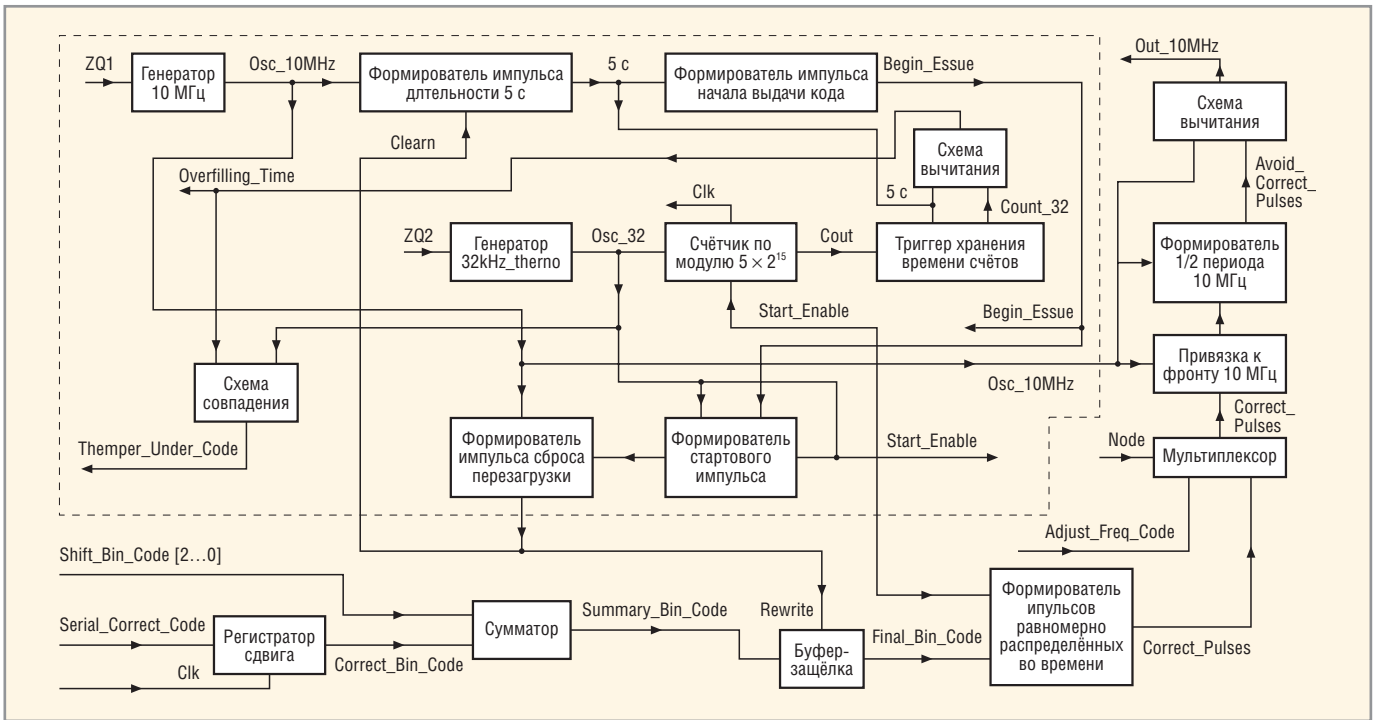


Рис. 5. Блок-схема генератора, размещённая в ПЛИС

ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ

Полная функциональная схема генератора, реализованная на базе ПЛИС, приведена на рисунке 5. Схема разделена на две части – передающую и приёмную.

Передающая часть формирует унарный код текущей температуры *Temperature_Unar_Code* и вспомогательные сигналы и содержит два генератора: основной на 10 МГц и вспомогательный на 32 кГц, реаги-

рующий на изменение температуры.

Восьмибитный последовательный код коррекции *Serial_Correct_Code*, поступающий из МК, синхронизируется внешним сигналом и преобразуется в параллельный двоичный код. Далее он поступает на один из входов сумматора. На другой вход сумматора подаётся код смещения. Выходной код сумматора проходит через буфер-защёлку, который в определённый

момент времени перезаписывает содержимое сумматора и хранит его до момента обновления.

Окончательный код коррекции *Final_Bin_Code* подаётся на формирователь импульсов, равномерно распределённых во времени. На выходе формирователя корректирующие импульсы *Correct_Pulses* следуют с периодичностью, согласованной с текущей окружающей температурой. На рисунке 6 приведена схема взаимодействия сигналов ПЛИС и МК.

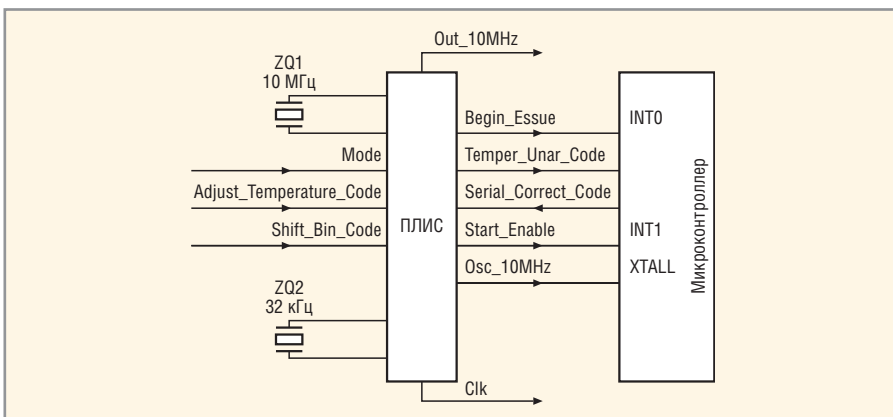


Рис. 6. Взаимодействие сигналов ПЛИС и МК

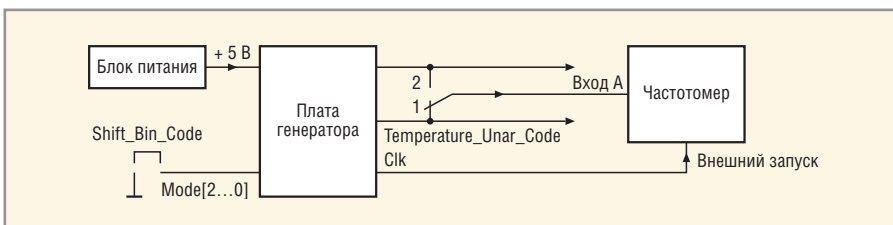


Рис. 7. Блок-схема, используемая для калибровки генератора

Для организации калибровки устройства предусмотрен мультиплексор. Режим «Работа/Калибровка» выбирается битом управления мультиплексором *Mode*. На первый вход мультиплексора поступают рабочие корректирующие импульсы *Correct_Pulses*, а второй вход мультиплексора используется для подключения импульсного генератора НЧ, задействованного в процессе калибровки. Далее импульсы коррекции привязываются к фронтам импульсов 10 МГц, и из них формируются короткие импульсы, запускающие формирователь инвертированного полупериода частоты 10 МГц.

Схема вычитания «выбивает» избыточные импульсы из исходной частоты *Osc_10MHz*, создавая тем самым стабилизированную частоту 10 МГц, обозначенную на схеме *Out_10MHz*.

КАЛИБРОВКА ГЕНЕРАТОРА

Для калибровки генератора необходимы термостат, частотомер и блок питания +5 В. Частотомер работает в режиме внешнего запуска, сигнал которого поступает от схемы генератора. На плате следует установить переключку Mode в положение калибровки (см. рис. 7). К процессу калибровки следует относиться внимательно, так как от него зависит погрешность генератора.

Плата помещается в камеру термостата, экранированные провода выводятся через специальное отверстие в камере. При калибровке задаётся текущая температура в камере термостата и выжидается время до её установления. В положении 1 переключателя S1 (см. рис. 7) по частотомеру определяется число импульсов N , которое отражает текущую температуру и является её унарным кодом *Temperature_Unar_Code*. Затем переключатель переводится в положение 2, и считывается текущее значение частоты основного генератора 10 МГц. Это значение всегда будет выше номинального на ΔF , которое является основой для

формирования кода коррекции частоты *Serial_Correct_Code* и показывает, сколько должно быть «выбито» избыточных импульсов за 1 с.

Итак, для калибровки генератора достаточно двух значений: код текущей температуры *Temperature_Unar_Code* и код коррекции частоты *Serial_Correct_Code* при этой же температуре. По данным составленной таблицы строятся графики. После завершения калибровки переключку Mode следует вернуть в рабочее положение.

Полученные данные являются основой для задания коэффициентов полинома в программе для МК. Задача МК – выдать в ответ на унарный код, полученный от ПЛИС, код коррекции температуры, учитывающий нелинейность преобразования температура-частота:

$$CUC = \sum_{i=0}^4 k_i TUC^i,$$

где CC – *Correct_Code* – код коррекции в бинарном формате; TUC – *Temperature_Unar_Code* – унарный код температуры; k_i – коэффициенты

полинома. Для этого на основании полученных в ходе калибровки данных вычисляются коэффициенты полинома 4-й степени, отражающего вид графика температурной зависимости, которые затем используются в программе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом испытания генератора, реализованного по данной схеме, показывают высокую стабильность в заявленном температурном диапазоне. Для применения данных генераторов в аналоговой схемотехнике в его конструкцию потребуются внести некоторые изменения – вместо выбивания импульсов воздействовать посредством ЦАП или ШИМ с выделением среднего значения (что дешевле) на схему генератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтицуллер Г.Б., Елфимов Н.Н., Шакулин В.Г. Кварцевые генераторы: Справ. пособие. М.: Радио и связь, 1984.
2. Стещенко В.Б. Плис фирмы Altera. Проектирование устройств. Додэка-XXI, 2002. ©