

А. В. МЕДВЕДЕВ, В. А. ЧУЛКОВ

## КОЛЬЦЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСОВ НА ПЛИС

Рассмотрены принципы построения и особенности реализации кольцевых генераторов импульсов на ПЛИС. Оценены технологический разброс частоты импульсов генераторов, ее температурная стабильность и чувствительность к уходу питающего напряжения.

**Ключевые слова:** кольцевой генератор, частота импульсов, время задержки, элемент задержки, программируемая логическая интегральная схема.

Успехи в области микроэлектроники стимулировали развитие цифровых измерительных систем, что позволило осуществлять обработку информации непосредственно на кристалле интегральной схемы в соответствии с концепцией „система на кристалле“ (SOC — System on Chip). Благодаря использованию программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) сократились сроки и стоимость разработки таких систем. По сравнению с заказными микросхемами ПЛИС не достигают предельных для данного уровня технологии характеристик, однако обеспечивают исключительную гибкость проектирования.

Один из основных узлов цифровых систем обработки информации — генератор импульсов — выполняется в современных микросхемах по кольцевой схеме в виде замкнутой цепи буферных каскадов, реализующих функции элементов задержки (ЭЗ). Кольцевые генераторы импульсов (КГИ) широко применяются в системах фазовой синхронизации, средствах устранения нарушения синхронизации микропроцессорных систем, быстрых интерполирующих преобразователях время — код и код — время (генераторах задержки) [1]. КГИ можно рассматривать как мультифазный генератор, импульсы множества выходов которого интерполируют его период, сокращая шаг дискретизации времени. Характеристики генератора непосредственно отражаются на точности, стабильности и функциональных возможностях цифровой системы.

Если в заказной микросхеме ЭЗ можно снабдить средствами управления задержкой и, следовательно, осуществить аналоговое регулирование частоты импульсов КГИ, то в ПЛИС такая возможность затруднена ввиду фиксированной структуры вентилях конфигурируемых блоков и ограниченного количества вариантов их соединений. Однако во многих случаях оказывается достаточным дискретное регулирование частоты и фазы импульсов КГИ путем мультиплексирования множества его выходов [2].

Цель настоящей статьи — выяснение условий возбуждения колебаний, а также оценка технологического разброса и стабильности частоты кольцевого генератора импульсов, построенного на кристалле ПЛИС.

Для предотвращения триггерного эффекта в схеме КГИ используется фазоинверсия сигнала обратной связи (рис. 1, а). Число  $N$  элементов задержки дифференциального (парафазного) типа может быть произвольным, в то время как при использовании однофазных ЭЗ их число должно быть обязательно нечетным.

Условие возбуждения и поддержания колебаний в схеме генератора состоит в том, чтобы на заданной частоте при фазовом сдвиге прямой ветви, равном  $\pi$ , коэффициент усиления был не менее единицы. Возможны несколько режимов работы схемы (рис. 1, б) [3]. Если замкнуть выходы единственного элемента на его противофазные входы, то колебания не возникают вследствие невыполнения условия возбуждения. По мере увеличения количества ЭЗ в схеме общий фазовый сдвиг возрастает, и возникают близкие к гармоническим автоколебания с малой амплитудой при коэффициенте усиления, равном единице. Даль-

нейшее увеличение числа  $N$  элементов приводит к возрастанию времени задержки и коэффициента усиления. Это обуславливает увеличение амплитуды выходного напряжения, при этом форма сигнала приближается к сглаженной трапеции (мягкое ограничение). Наконец, при существенном увеличении числа элементов каждый из них успевает полностью переключаться, амплитуда сигналов достигает максимума, а их форма становится близкой к меандру.

Ориентировочно оценить частоту колебаний КГИ можно, считая задержку каждого каскада равной  $t_D$ . Импульс распространяется через все  $N$  элементов задержки один раз, обеспечивая фазовый сдвиг  $\pi$  в течение полупериода  $Nt_D$ .

После этого импульс инвертируется и второй раз распространяется через те же элементы задержки, что обеспечивает общий период  $2Nt_D$ . Таким образом, частота колебаний оказывается равной

$$f_0 = \frac{1}{2Nt_D}.$$

Цифровое регулирование частоты колебаний КГИ на ПЛИС можно осуществить одним из двух способов: прямым воздействием на частоту путем изменения длины кольца составляющих его ЭЗ и косвенным воздействием на частоту путем направленного перебора выходов КГИ [2].

При использовании первого способа (рис. 2, а) кольцо генератора замыкается через такое количество ЭЗ, которое задается управляющим кодом  $X$  посредством мультиплексора  $MX$ . Частота импульсов определяется приведенным выше выражением. Шаг дискретизации частоты, равный  $1/2N(N+1)t_D$ , можно сократить практически вдвое до значения  $1/2N(2N+1)t_D$ , если дополнить устройство логическим преобразователем управляющего кода [4].

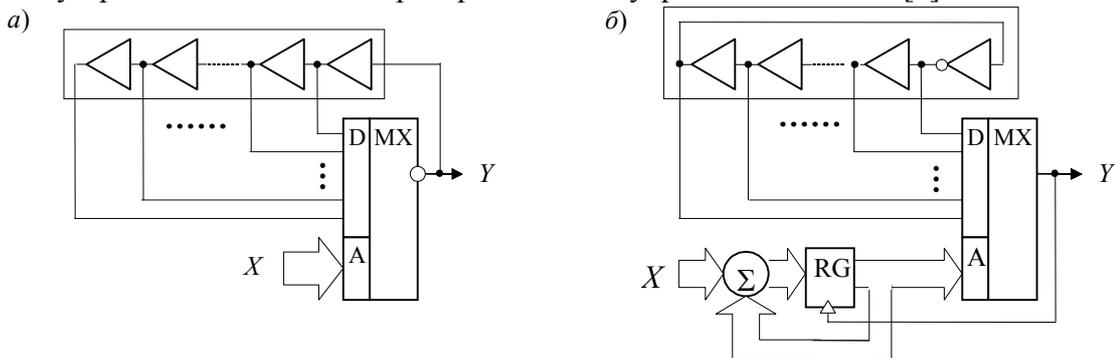


Рис. 2

Согласно второму способу (рис. 2, б) частота кольцевого генератора остается неизменной, однако на выход  $Y$  устройства выводятся сигналы разных фаз КГИ в соответствии с управляющим цифровым кодом на адресном входе мультиплексора. Адресный код формируется аккумулятором (узлом суммирования с обратной связью через регистр  $RG$ ), который на каждом такте работы уменьшает текущий адрес мультиплексора на значение  $X$ . В результате частота импульсов при  $X \ll N$  определяется формулой

$$f = \left(1 - \frac{X}{N}\right) f_0,$$

где  $f_0$  — собственная частота КГИ.

Объектом практического исследования послужила схема КГИ, выполненного на кристаллах ПЛИС EPF10K10LC84-4 и EP2C20F484C7N фирмы “Altera”. Схема состоит из 100 каскадов задержки в виде ячеек LCELL (рис. 3, а), одна из которых снабжена инвертором, обеспечивающим дополнительный сдвиг сигнала обратной связи на  $\pi$ . Размещение компонентов схемы генератора на кристалле и трассировка соединений реализованы в двух версиях: автоматически с помощью компилятора и вручную (на рис. 3, б приведена топология схемы при ручной трассировке на кристалле EP2C20F484C7N).

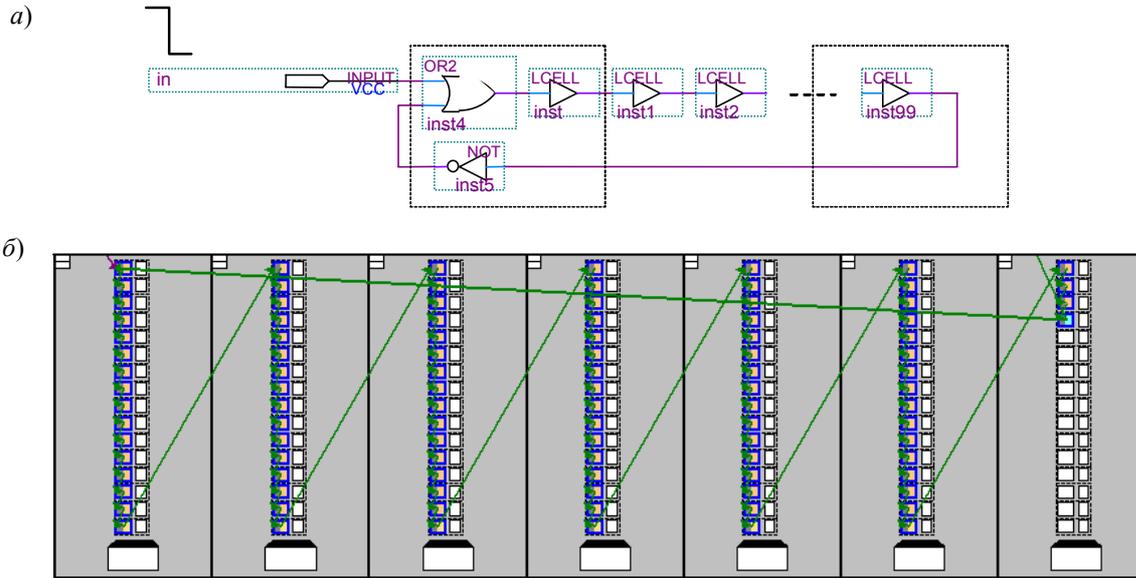


Рис. 3

Частота импульсов генератора, размещенного на кристалле EP2C20F484C7N, составила в среднем 16,5 МГц и имела технологический разброс (среднеквадратическое отклонение по десяти образцам на одном кристалле) 0,278 МГц для устройств, полученных с помощью компилятора, и 0,047 МГц — для устройств, размещение элементов которых и трассировка выполнены вручную. Таким образом, ручной способ позволил существенно сократить технологический разброс частоты, который не превысил  $\pm 1\%$ .

Как было отмечено ранее, частота импульсов кольцевого генератора обратно пропорциональна числу  $N$  его каскадов. Практически важен вопрос о минимальном значении  $N$ , достаточном для возбуждения и поддержания колебаний в КГИ. Для ответа на этот вопрос была измерена частота импульсов кольцевых генераторов на обоих ПЛИС в зависимости от числа каскадов и проверена их работоспособность.

Результаты эксперимента отражены графиками, представленными на рис. 4, а—г. На кристалле EP2C20F484C7N (рис. 4, а) колебания возникают после объединения в кольцо семи буферов задержки, при этом частота импульсов составляет 230 МГц. На кристалле EPF10K10LC84-4 (рис. 4, б) колебания с частотой 192,3 МГц возникают при замыкании инверсной обратной связи двух каскадов.

Далее была проверена стабильность частоты генерируемых импульсов при изменении температуры окружающей среды и питающего напряжения для пяти образцов КГИ на ПЛИС типа EPF10K10LC84-4 (рис. 4, в, каждая из кривых соответствует одному из пяти образцов). Температурный коэффициент частоты составил в среднем  $-0,2\%/^{\circ}\text{C}$ . Работоспособность генератора сохранялась в диапазоне питающего напряжения от 4,75 до 5,25 В (рис. 4, г), при этом чувствительность частоты к уходу напряжения питания не превысила  $8,7\%/V$ . Как видно из графиков, частоты генераторов, выполненных на одном

кристалле, весьма близки, а работа генераторов при изменении температуры и напряжения питания совершенно идентична.

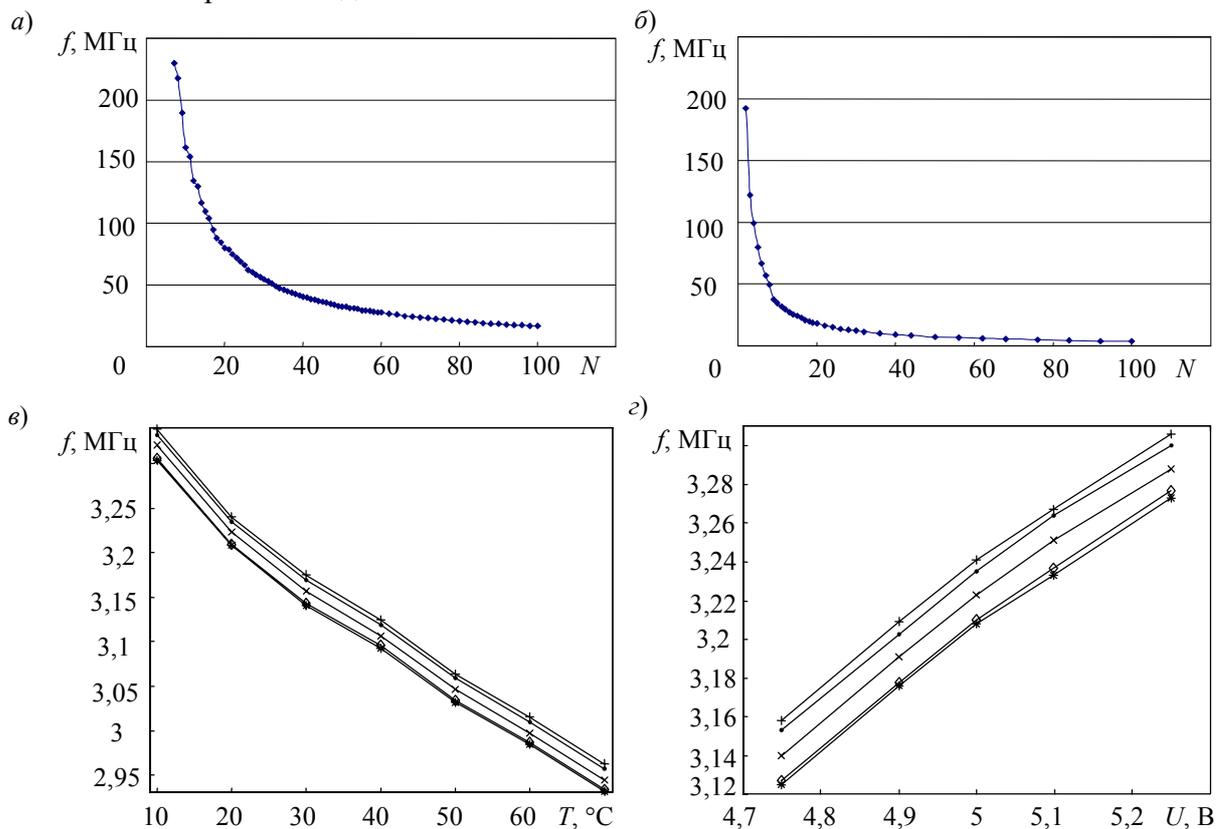


Рис. 4

При построении цифровой системы на кристалле ПЛИС опорный генератор может быть выполнен по кольцевой схеме, число звеньев которой выбирается в соответствии с заданной частотой. Функциональные возможности таких генераторов ограничены, поскольку существуют программные „рамки“ на конфигурацию схемы. Невозможно, например, объединение выходов вентилях с целью интерполяции времени их задержки и сокращения за счет этого шага дискретизации времени. Тем не менее сохраняются возможности цифрового управления генератором при проектировании, например, систем фазовой синхронизации и декодирования данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чулков В. А. Фазовая интерполяция в системах синхронизации и преобразования информации. Пенза: Изд-во Пензен. гос. технол. академии, 2008.
2. Чулков В. А. Генераторы импульсов с селекцией опорной фазы // Радиотехника. 2002. № 10. С. 51—55.
3. Razavi B. A 2-GHz 1.6-mW phase-locked loop // IEEE J. of Solid-State Circuits. 1997. Vol. 32. P. 730—735.
4. Пат. 2170490 РФ. Генератор импульсов с цифровой перестройкой периода / В. А. Чулков.

#### Сведения об авторах

- Алексей Владимирович Медведев** — аспирант; Пензенская государственная технологическая академия, кафедра вычислительных машин и систем; E-mail: mav@pgta.ac.ru
- Валерий Александрович Чулков** — канд. техн. наук, доцент; Пензенская государственная технологическая академия, кафедра вычислительных машин и систем, профессор; E-mail: chu@pgta.ac.ru

Рекомендована кафедрой  
вычислительных машин и систем

Поступила в редакцию  
30.12.08 г.