
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.373.54

С. А. НЕСТЕРЕНКО, В. А. ЧУЛКОВ

УПРАВЛЯЕМЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ

Предложена схема кольцевого генератора импульсов для устройств синхронизации и преобразования информации, построенная на основе элементов локальной фазовой интерполяции. Принцип опережающей интерполяции в сочетании с электронным регулированием оси интерполяции обеспечивает широкодиапазонную перестройку частоты при сокращенном шаге дискретизации времени. Приведены результаты исследования в моделирующей среде *LTSpice4* интегрального генератора, выполненного по 50-нанометровой технологии.

Ключевые слова: *кольцевой генератор, частота импульсов, время задержки, элемент задержки, фазовая интерполяция, модуляционная характеристика.*

Решение задачи повышения точности и производительности цифровых устройств синхронизации и преобразования информации без ужесточения требований к быстродействию элементной базы потребовало развития средств фазовой интерполяции (ФИ). ФИ предполагает разделение интервала времени между парой событий на заданное число равных частей. Решение задачи деления тактового периода обеспечивает мультифазный кольцевой генератор (МКГ), представляющий собой замкнутую цепь буферов задержки с общей инверсной обратной связью [1]. Такие генераторы находят применение в системах синхронизации и восстановления данных, умножителях и синтезаторах частоты, цифровых измерительных преобразователях временных и фазовых величин, преобразователях формы представления информации [2].

Основные свойства МКГ определяются составляющими его каскадами: шаг дискретизации (смещение во времени импульсов на смежных выходах) равен времени задержки каскада t_D , а частота генерируемых импульсов зависит от их числа N :

$$f = 1/2Nt_D. \quad (1)$$

Как видно из (1), увеличение разрешения по времени при традиционном исполнении МКГ требует сокращения времени задержки его каскада, что не всегда возможно в рамках существующих технологий.

Обоснованный в статье [3] и получивший развитие в дальнейших разработках (см., например, [4]) способ опережающей ФИ (*Negative Skewed Delay*) позволяет преодолеть указанное технологическое ограничение и достичь разрешения, меньшего задержки каскада МКГ. Идея состоит в организации дополнительных обратных субсвязей в основном контуре МКГ, ускоряющих либо замедляющих, в зависимости от индексов обратной i и опережающей x связей, процесс продвижения сигнала по контуру. По существу, за счет объединения выходов инверторов со сложением их выходных токов осуществляется интерполяция исходного кванта времени t_D с фиксированными удельными весами опорных входов.

Частота генерируемых подобной схемой импульсов отличается от частоты импульсов, генерируемых обычной схемой кольцевого генератора [4]:

$$\delta f \approx \left(\frac{C_C}{C} - 1 \right) + k_0 A_S \frac{C_C}{C \operatorname{tg} \theta}, \quad (2)$$

где C_C и C — емкость нагрузки каскада для схемы с субсвязями и без них, θ — фазовый сдвиг каскада с учетом его инверсии, A_S — усиление шунтирующего инвертора, $k_0 = \sin[(i-1)\theta] + \operatorname{tg} \theta \cos[(i-1)\theta]$ — фазовый коэффициент, i — индекс обратной связи, численно равный количеству инверторов в каждом контуре дополнительной обратной связи. Для достижения значительного инкремента частоты, согласно (2), следует стремиться к минимизации увеличения емкости при подключении субсвязей и обеспечению положительных значений k_0 . Электронная перестройка частоты генератора, необходимая в устройствах фазовой синхронизации и измерительных преобразователях, возможна путем регулирования параметров пассивных компонентов схемы либо путем изменения коэффициента усиления (а по сути — мощности) шунтирующего инвертора.

Рассмотрим схему МКГ, построенную на управляемых элементах ФИ, что обеспечивает плавное электронное регулирование частоты генерируемых мультифазных импульсов. Генератор (рис. 1) образован замкнутой в основное кольцо цепочкой из нечетного числа элементов ФИ, связи по кольцу осуществляются через первые входы элементов ФИ. Кроме того, в схеме имеются дополнительные субсвязи, шунтирующие пары каскадов основного кольца (второй вход элемента ФИ в каждом n -м каскаде подключен к выходу $(n-3)$ -го каскада). Шунтирование четного числа каскадов обеспечивает необходимое для интерполяции и повышения частоты опережающее смещение позиции второго опорного сигнала, при котором опорные сигналы остаются почти синфазными. Таким образом, для рассматриваемой схемы индекс опережающей связи неизменен — $x = 3$. Индекс обратной связи зависит от числа каскадов генератора — $i = N - x + 1$.

Элементы ФИ, образующие схему многокаскадного многосвязного МКГ (рис. 1), снабжены управляющими входами, которые подключены к общему зажиму управляющего напряжения U_y . Каждый элемент ФИ имеет пару опорных входов X , Y и выход Z , позиция фронта/спада импульса на котором относительно опорных импульсов, отсчитанная по уровню половины размаха, зависит от управляющего напряжения U_y :

$$t_Z = \alpha t_X + (1 - \alpha) t_Y + t_{D0}, \quad (3)$$

где $\alpha = U_y / E \in 0, \dots, 1$ — коэффициент управления, определяющий „веса“ опорных сигналов, E — питающее напряжение, t_{D0} — время задержки базового инвертора в элементе ФИ. Такой элемент можно представить эквивалентной схемой в виде инвертора с потенциометром, устанавливающим удельные весовые коэффициенты входных сигналов. Необходимым условием интерполяции является перекрытие во времени фронтов (спадов) опорных сигналов.

Границы диапазона перестройки частоты определяются числом элементов ФИ, входящих в замкнутое кольцо генератора для $0 < \alpha < 1$. Характер модуляционной характеристики — зависимости частоты генерируемых импульсов от управляющего воздействия — определяется числом каскадов схемы, точнее его кратностью трем.

В том случае, когда число каскадов кратно трем (например, на рис. 1 — девять каскадов), при $\alpha = 1$ в соответствии с (3) замкнуто основное кольцо генератора. Так как удельный вес входов элементов ФИ, участвующих в субсвязях, равен нулю, эти связи, по существу, отсутствуют, и частота определяется уравнением (1):

$$f_{\min} = 1/2N_{\alpha=1}t_{D0} = 1/18t_{D0}. \quad (4)$$

В случае $\alpha \rightarrow 0$ элемент ФИ осуществляет взвешенное суммирование своих опорных сигналов, при этом его задержка, отсчитываемая от оси интерполяции, сокращается. Частота импульсов возрастает и достигает максимума при $\alpha = 0$, когда связи между каскадами по основному кольцу отключаются, и образуются три формально независимых генератора из элементов соответственно 1, 4, 7, элементов 2, 5, 8 и элементов 3, 6, 9 (см. рис. 1), каждый из которых генерирует импульсы с частотой $f_{\max} = 1/2N_{\alpha=0}t_{D0} = 1/6t_{D0}$. Таким образом, диапазон плавного регулирования частоты колебаний в схеме оценивается отношением 3:1. Если предположить, что период колебаний МКГ линейно связан со значением коэффициента управления $T = T_{\max} - (1 - \alpha)(T_{\max} - T_{\min})$, то модуляционная характеристика генератора может быть записана как

$$f(\alpha) = \frac{1}{2[N_{\alpha=1} - (1 - \alpha)(N_{\alpha=1} - N_{\alpha=0})]t_{D0}}. \quad (5)$$

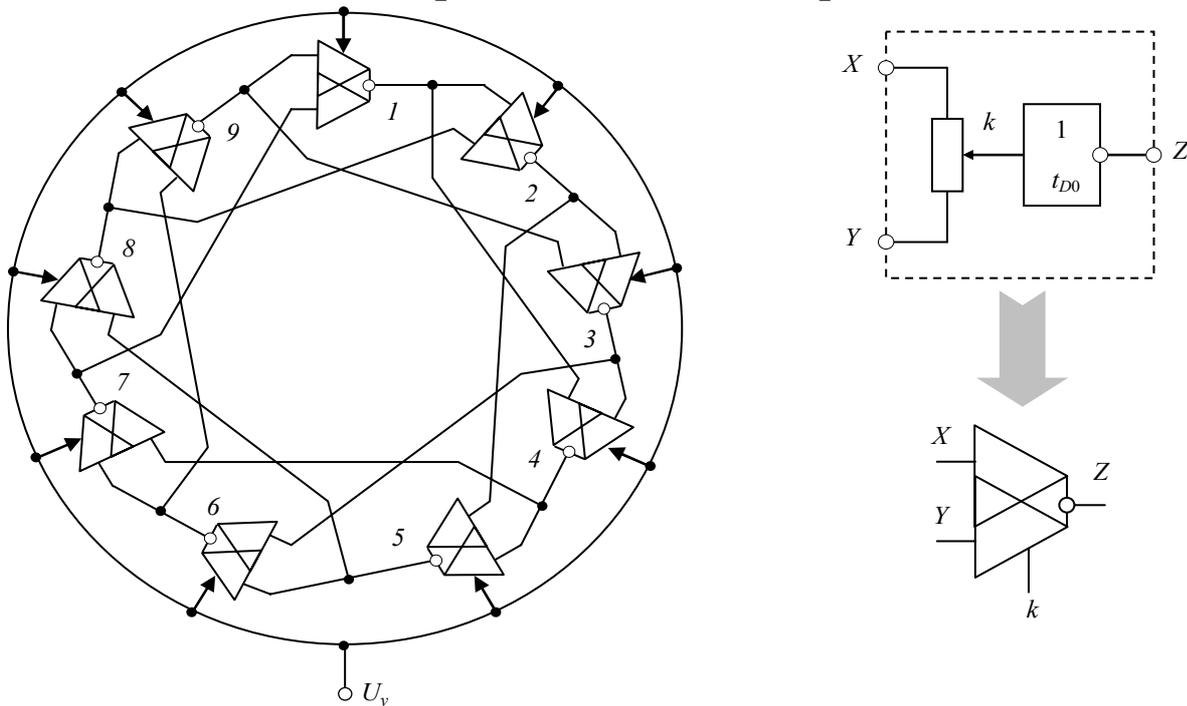


Рис. 1

Если число каскадов генератора не делится на три, то при любом значении управляющего воздействия оно остается неизменным, и частота на границах диапазона перестройки ($\alpha = 1$, $\alpha = 0$) определяется формулой (4). Значение частоты в центральной части модуляционной характеристики возрастает, при этом степень ее увеличения зависит, главным образом, от значения коэффициента k_0 в (2), для $x = 3$:

$$k_0 = \sin \left[\frac{(N-3)(N+1)}{N} \pi \right] + \operatorname{tg} \left(\frac{(N+1)}{N} \pi \right) \cos \left[\frac{(N-3)(N+1)}{N} \pi \right]. \quad (6)$$

Значение k_0 изменяется с возрастанием числа каскадов в интервале 5—15 от 1,175 до 0,42. Для абсолютного значения частоты в [4] найдено асимптотическое выражение, которое после некоторых преобразований для схемы на элементах ФИ может быть записано как

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \left[\operatorname{tg} \left(\frac{N+1}{N} \right) + k_0 A_S \right], \quad (7)$$

где R — выходное сопротивление каскада. В данной формуле первый член в скобках отражает составляющую, относящуюся к частоте традиционного одноконтурного кольцевого генератора, а второй — составляющую, обусловленную введением субсвязей. Поскольку значение

частоты зависит от многих конструктивно-технологических факторов, то аналитически можно дать лишь его приближенную оценку.

Для исследования предложенной схемы генератора с помощью программы *LTSpice4* [5] выполнено моделирование элемента ФИ и измерены основные характеристики устройства в целом. Для построения схем использованы модели современных МОП-транзисторов с коротким каналом *BSIM4* (*Berkeley Short-channel IGFET Model*), изготавливаемых по нормам 50-нанометрового техпроцесса [6, 7]. Указанные транзисторы обладают низким пороговым напряжением (порядка 0,2 В) и способны работать в схемах при напряжении питания 1 В.

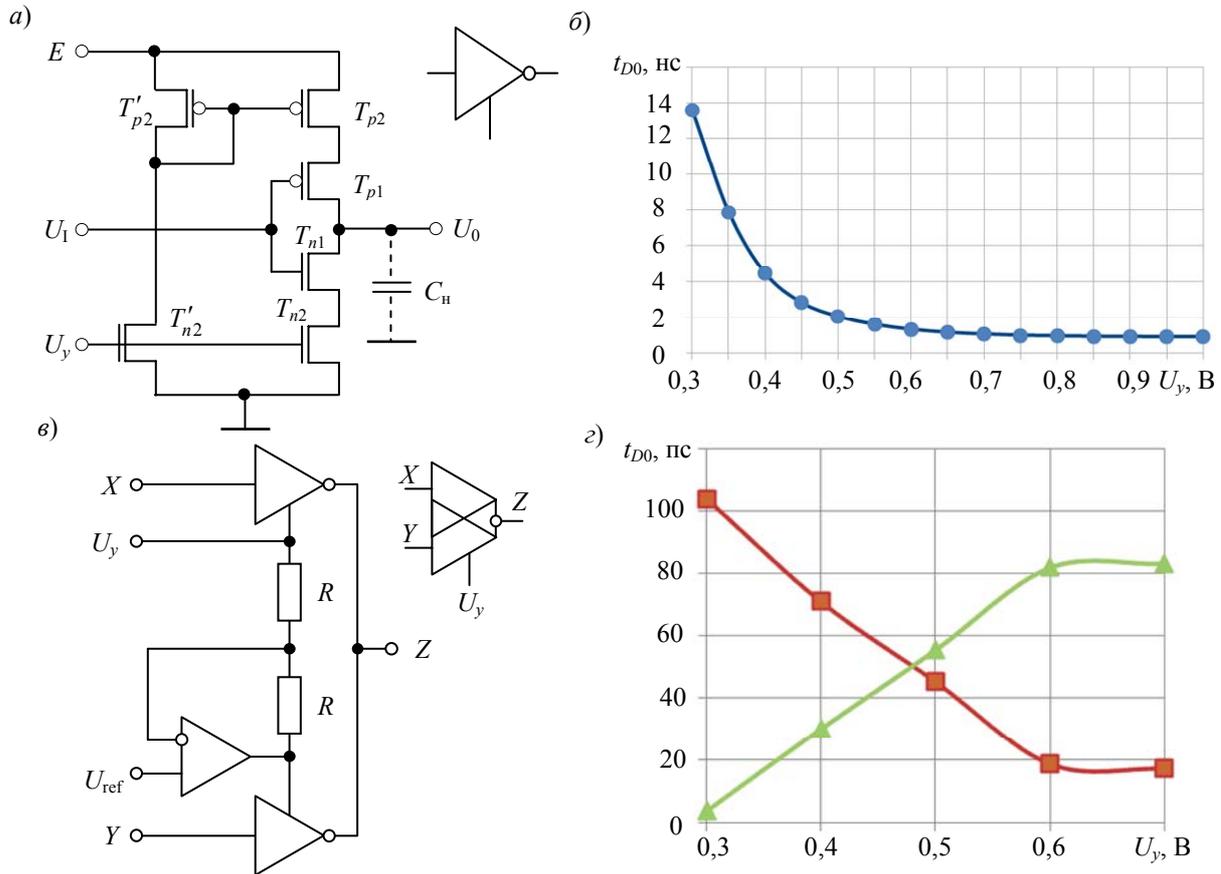


Рис. 2

В качестве базовой структуры элемента ФИ была выбрана схема КМОП инвертора с ограничением тока (рис. 2, а), обеспечивающая полный размах выходного напряжения в пределах питающего напряжения E . Основной инвертор, состоящий из комплементарных транзисторов T_{p1} и T_{n1} , встроен в образованную транзисторами T_{p2} , T'_{p2} , T_{n2} , T'_{n2} схему „токового зеркала“, обеспечивающую равенство абсолютных значений „вытекающего“ и „втекающего“ токов инвертора, что гарантирует симметрию задержки — равенство задержек фронта и спада импульса. Время задержки инвертора, которое отсчитывается по уровню половины размаха сигналов, определяется скоростью перезаряда емкости нагрузки C_n , поэтому изменение рабочего тока инвертора путем регулирования управляющего напряжения U_y приводит к изменению времени его задержки в соответствии с выражением [2]:

$$t_{PLH} = t_{PHL} = \frac{C_n E}{K (U_y - U_{пор})^2},$$

где $U_{пор}$ — пороговое напряжение (В), K — удельная крутизна (A/V^2), одинаковые для всех комплементарных транзисторов. Регулировочная характеристика смоделированного управляемого инвертора при емкости нагрузки 100 фемтофард представлена на рис. 2, б.

Схема элемента ФИ образована парой сопряженно-управляемых инверторов с объединенными выходами, поскольку для КМОП вентилях нет опасности короткого замыкания благодаря ограничивающему действию сопротивлений каналов (рис. 2, в). Сопряженное управление инверторами состоит в одинаковом, но разнонаправленном изменении управляющих напряжений U_y , указанных инверторов с помощью инвертирующего операционного усилителя со смещенной к $U_{\text{ref}} = E/2$ точкой равновесия. Задержка полученного интерполирующего сигнала Z t_{D0} компенсируется задержкой опорных сигналов с дополнительными инверторами сигналов X и Y (на рис. 2, в не показаны).

В ходе эксперимента опорные сигналы X и Y подавались на элемент ФИ с задержкой друг относительно друга в 100 пс, обеспечивающей выполнение условия интерполяции — перекрытие во времени их фронтов. Результаты определения позиции интерполирующего сигнала Z (оси интерполяции) на интервале между опорными сигналами X и Y (задержки $X-Z$ и $Z-Y$) в зависимости от управляющего напряжения приведены на рис. 2, г. С нарастанием напряжения U_y от 0,3 до 0,6 В фронт выходного сигнала Z перемещается от фронта сигнала X к Y , зависимость близка к линейной. Диапазон регулирования оси интерполяции составляет ± 40 пс.

В *LTSpice4* было построено несколько кольцевых генераторов с нечетным числом каскадов, для которых проверялись форма генерируемых импульсов, достигаемый шаг дискретизации времени как задержка каскада с учетом его инвертирующей функции, построены модуляционные характеристики. Во всех генераторах субвязи каскадов выполнялись с индексом опережения $\chi = 3$.

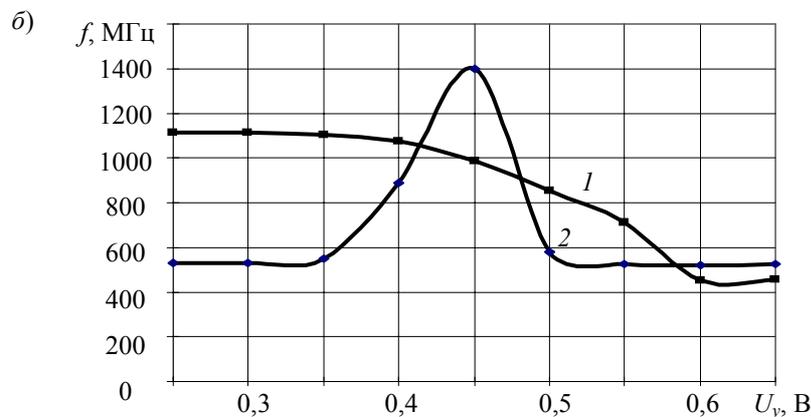
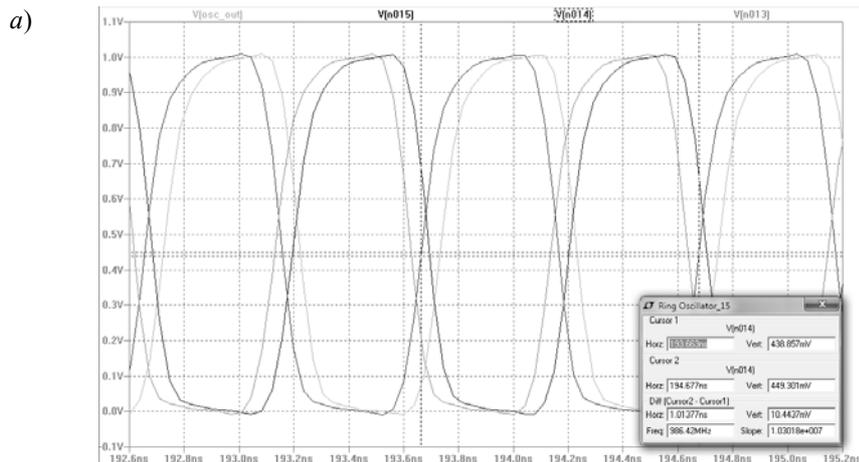


Рис. 3

На рис. 3 представлены результаты моделирования схемы 15-каскадного генератора — осциллограммы импульсов на четырех смежных выходах (а) и модуляционная характеристика (б). Для сравнения на рис. 3, б приведена также отличающаяся немонотонностью модуляционная

характеристика (кривая 2) 13-каскадного МКГ (число каскадов не кратно трем). Как и предполагалось (см. формулы (4)—(7)), схемы обеспечивают почти трехкратную перестройку частоты. Модуляционная характеристика носит монотонный характер при кратном трем числе каскадов и немонотонный с выраженным экстремумом — при числе каскадов, не кратном трем.

Импульсы на смежных выходах генератора инвертированы друг относительно друга и при средней частоте смещены во времени примерно на 33,8 пс. Если построить традиционную схему кольцевого генератора на обычных неуправляемых инверторах, то в нем достигается в полтора раза более высокая частота (для 15 каскадов $\approx 1,5$ ГГц), что определяет шаг разбиения времени $t_D = 1/2Nf_0 = 22,2$ пс. Однако в предложенной схеме имеется возможность регулирования и стабилизации частоты, что в ряде применений играет решающую роль, поскольку позволяет компенсировать технологический разброс и нестабильность параметров интегральной схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чулков В. А., Медведев А. В. Кольцевые генераторы импульсов на ПЛИС // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. № 12. С. 50—53.
2. Чулков В. А. Интерполирующие устройства синхронизации и преобразователи информации. М.: Физматлит, 2010.
3. Lee S.-J., Kim B., Lee K. A Novel High-Speed Ring Oscillator for Multiphase Clock Generation Using Negative Skewed Delay Scheme // IEEE J. of solid-state circuits. 1997. Vol. 32, N 2. P. 289—291.
4. Sun L., Kwasniewski T. A. A 1.25-GHz 0.35- μ m Monolithic CMOS PLL Based on a Multiphase Ring Oscillator // IEEE J. of solid-state circuits. 2001. Vol. 36, N 6. P. 910—916.
5. Linear Technology — Design Simulation and Device Models [Электронный ресурс]: <<http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>>.
6. Baker R. J. CMOS: circuit design, layout, and simulation. IEEE Press Series on Microelectronic Systems. 2010. 1208 p.
7. Модели МОП приборов [Электронный ресурс]: <http://cmosedu.com/cmos1/cmosedu_models.txt>.

Сведения об авторах

- Степан Андреевич Нестеренко** — аспирант; Пензенская государственная технологическая академия, кафедра вычислительных машин и систем; E-mail: zdvv@bk.ru
- Валерий Александрович Чулков** — д-р техн. наук, профессор; Пензенская государственная технологическая академия, кафедра вычислительных машин и систем; E-mail: chu@pgta.ac.ru

Рекомендована кафедрой
вычислительных машин и систем

Поступила в редакцию
29.10.12 г.