

УДК 621.373.5: 621.3.049.774.2

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ КМОП-ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ

А.А.Зайцев, ведущий инженер НИИ вычислительных средств и систем управления МГИЭТ (ТУ); andazaitsev@mail.ru

Ключевые слова: импульсная фазовая автоподстройка частоты; КМОП-генератор, управляемый напряжением; помехоустойчивое генерирующее кольцо.

Достижения в технологиях полупроводникового производства субмикронных КМОП-элементов сделали доступным создание микросхем большой степени интеграции. Одновременно стремление разработчиков разместить на кристалле как можно большее количество функциональных устройств (для придания микросхеме большей функциональной законченности) привело к появлению класса микросхем, получивших название «система на кристалле» (СнК). В настоящее время СнК являются основной элементной базой при построении современных систем мультимедиа, телевидения и телекоммуникаций.

Современные высокопроизводительные СнК представляют собой интеграцию на одном кристалле процессорных ядер, специализированных блоков ввода/вывода, кодеров и декодеров, аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей. Для поддержки различных режимов работы и микропотребления СнК, как правило, имеют гибкую систему выработки сигналов тактовой синхронизации, основанную на использовании программируемых генераторов частот.

Одной из проблем, возникающих при проектировании микросхем СнК, является шумовая взаимосвязь между схемами, расположенными близко на кристалле, а также помехи по цепям земли и питания. Таким образом, актуальными остаются вопросы проектирования технологически удобных структур широкодиапазонных высокочастотных и помехоустойчивых генераторов тактовых частот, изготавливаемых по субмикронной КМОП-технологии и поддающихся полной интеграции на кристалле микросхемы СнК.

Требования к генератору тактовых частот для СнК. Основные характеристики генератора тактовых частот – диапазон генерируемых частот и фазовый шум выходного сигнала. Фазовый шум (англ. – jitter) представляет собой мгновенные отклонения от идеального положения во времени фронта и спада сигнала и характеризуется видом распределения и среднеквадратическим отклонением. Максимально допустимый уровень фазового шума ограничивается требованиями к характеристикам соответствующих блоков СнК.

В качестве интегральных генераторов частот наиболее распространенные получили устройства, синтезирующие сетку требуемых частот когерентно опорной частоте с помощью контура импульсной фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Часто при работе СнК необходимо наличие одновременно нескольких частот. Как правило, источником опорной частоты служит внешний кварцевый резонатор, остальные частоты синтезируются несколькими встроенными ФАПЧ-генераторами с дробными коэффициентами преобразования опорной частоты. Это связано с тем, что в случае применения нескольких внешних кварцевых резонаторов необходимо для каждого из них использовать элементы ввода-вывода, занимающие на кристалле микросхемы СнК площадь, со-

измеримую с площадью интегрального ФАПЧ-генератора. При использовании таких генераторов существует возможность гибкой программной перестройки синтезируемых частот. Кроме того, применение одного кварцевого резонатора для всего устройства на базе СнК повышает надежность, уменьшает габариты и стоимость конечного изделия.

В контуре импульсной ФАПЧ наиболее важным элементом, определяющим характеристики синтезируемого сигнала, является генератор, управляемый напряжением (ГУН). Часто требуется, чтобы диапазон синтезируемых частот имел по меньшей мере двукратное значение. При этом ГУН должен обеспечивать заданный диапазон с учетом технологических разбросов при производстве микросхемы СнК, а также при ее эксплуатации во всех условиях напряжения питания и температуры. В связи с тем, что наклон модуляционной характеристики ГУН является коэффициентом его передачи в контуре ФАПЧ, для стабильной работы устройства предпочтительно, чтобы в пределах рабочего диапазона частот изменение наклона модуляционной характеристики ГУН не превышало двух раз. При перестройке выходной частоты ГУН должен обладать малой инерционностью.

Для снижения чувствительности к шуму от других блоков микросхемы СнК и для того, чтобы ГУН не был источником шума сам, он должен отвечать двум основным требованиям. Во-первых, во всем рабочем диапазоне частот ГУН должен иметь одинаковую и равную напряжению питания амплитуду сигнала колебания, длительности фронта и спада колебания должны быть примерно равны. Во-вторых, у ГУН должно быть низкое постоянное значение и низкий уровень пульсаций потребляемого тока.

В связи с тем, что сегодня микросхемы СнК в основном изготавливаются по субмикронной КМОП-технологии, для обеспечения технологической и конструктивной совместимости с другими блоками СнК, в схеме ГУН должны использоваться только КМОП-транзисторы.

Цель настоящей статьи – исследование возможности расширения частотного диапазона кольцевого КМОП ГУН при одновременном выполнении вышеизложенных требований к его составу и функционированию.

Структурная схема генерирующего кольца ГУН. На рис. 1 представлена типовая структурная схема генератора частот на базе контура импульсной ФАПЧ [1-3]. В состав устройства входят: импульсный частотно-фазовый детектор (ИЧФД);

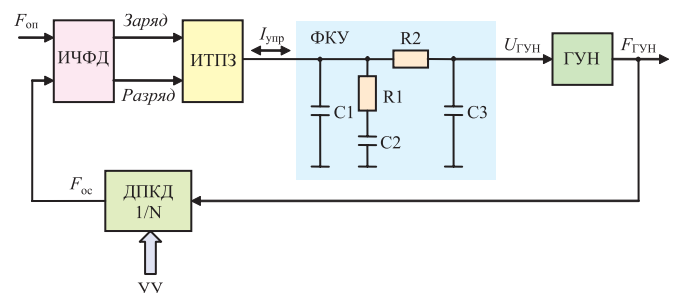


Рис. 1

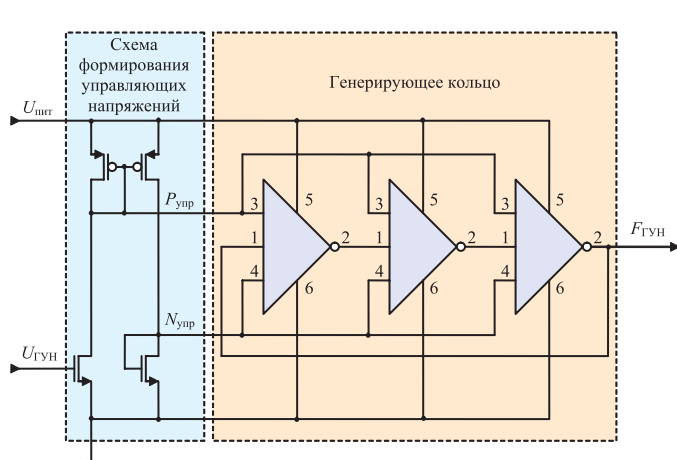


Рис. 2

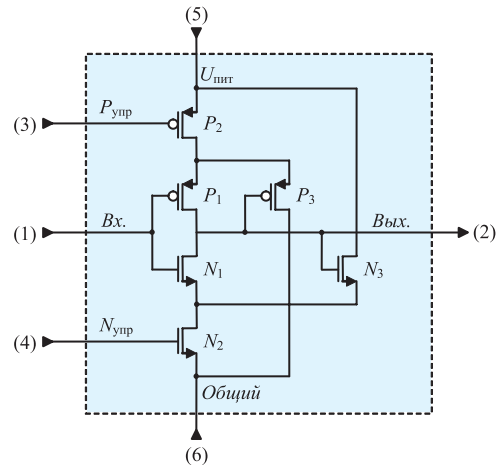


Рис. 3

источник тока поддержания заряда (ИТПЗ); фильтр контура управления (ФКУ); генератор, управляемый напряжением (ГУН), и для формирования сигнала обратной связи (ОС) $F_{ос}$, делитель с переменным коэффициентом деления (ДПКД). Необходимый коэффициент N в ДПКД устанавливается устройством управления (УУ). Так как регулирование частоты осуществляется через регистрацию разности фаз, а фаза является интегралом от частоты, то в установившемся режиме обеспечивается астатизм контура ФАПЧ по отношению к опорной частоте.

При реализации КМОП ГУН широкое распространение получили полностью интегральные кольцевые генераторы, не содержащие конденсаторов, резисторов и индуктивностей. На рис. 2 представлена типовая структурная схема недифференциального кольцевого КМОП ГУН [4]. В состав генератора входит схема формирования управляющих напряжений $P_{упр}$ и $N_{упр}$ и генерирующее кольцо, состоящее из нечетного числа инверторов с управляемым током переключения. За счет отрицательной ОС по постоянному току в кольце происходит вынужденное колебание $F_{ГУН}$. Частота сигнала колебания определяется числом инверторов в кольце и задержкой переключения каждого из них. Задержка переключения меняется за счет изменения длительности фронта и спада переключения и определяется током переключения, управление которым осуществляется во всех инверторах одновременно.

Способ расширения рабочего диапазона частот генерирующего кольца ГУН. На рис. 3 представлена предлагаемая схема инвертора с управляемым током переключения [5]. В случае, если выход инвертора находится в состоянии низкого уровня, потенциал напряжения на стоке транзистора P_2 зависит от протекающего через него тока, ограниченного управляющим напряжением $P_{упр}$, и от сопротивления открытого канала транзистора P_3 . Чем меньше протекающий ток, тем меньше падение напряжения на транзисторе P_3 и ниже уровень напряжения на стоке транзистора P_2 . Соответственно, ниже уровень входного напряжения инвертора для последующего переключения его выхода в состояние высокого уровня. При нахождении выхода инвертора в высокоуровневом состоянии все происходит аналогично. Значение управляющего напряжения $N_{упр}$ определяет уровень входного напряжения инвертора для переключения его выхода в низкоуровневое состояние.

Таким образом, в генерирующем кольце, построенном на базе рассмотренного инвертора, одновременно действуют два принципа регулирования частоты генерации: зависи-

мость от тока переключения и от входных уровней переключения инвертора. При генерации сигнала из низкочастотной области диапазона и малом токе переключения происходит не только завал фронта и спада сигнала колебания, но и одновременное расхождение входных уровней переключения. При генерации сигнала высокой частоты и большом токе переключения одновременно происходит не только обострение фронта и спада сигнала колебания, но и сближение входных уровней переключения инвертора.

Результирующий эффект такого комбинированного взаимодействия – расширение рабочего диапазона генерируемых частот. Причем из-за меньшего изменения длительностей фронта и спада сигнала колебания во всем диапазоне поддерживается постоянная амплитуда сигнала, близкая к напряжению питания $U_{пит}$. В связи с тем, что ограниченный сигналами управления $P_{упр}$ и $N_{упр}$ ток через инвертор течет постоянно, во время работы генерирующего кольца уменьшаются пульсации потребляемого тока.

Высокая скорость перестройки частоты колебания определяется малой инерционностью элементов схемы, а наличие разных входных уровней переключения инвертора гарантирует самовозбуждение генерирующего кольца. Дополнительно, предложенная схемотехника инвертора способствует линейаризации модуляционной характеристики ГУН.

Результаты математического моделирования ГУН. На рис. 4 представлены результаты математического моделирования рассмотренного кольцевого ГУН, реализованного по технологии КМОП 180 нм. Моделирование проводилось в системе проектирования интегральных микросхем AVOCAD [6]. В верхней части рисунка расположены диаграммы напряжения сигнала генерируемого колебания, в нижней – диаграммы тока, потребляемого генератором по линии $U_{пит}$. На рис. 4, а и б представлены диаграммы при управляющем напряжении $U_{ГУН}=765$ мВ, на в и г – 920 мВ, на д и е – 1205 мВ. Результаты моделирования сведены в таблицу.

Во всех трех случаях амплитуда сигнала колебания близка к напряжению питания $U_{пит}=1,8$ В. Коэффициент заполнения по уровню половины напряжения питания близок к зна-

$U_{ГУН}$, мВ	$F_{ГУН}$, МГц	$I_{ср}$, мкА	$\Delta I_{ср}$, мкА
765	400	53,5	+4,1/-3,3
920	800	85,7	+4,1/-2,4
1205	1600	129,2	+9,2/-7,2

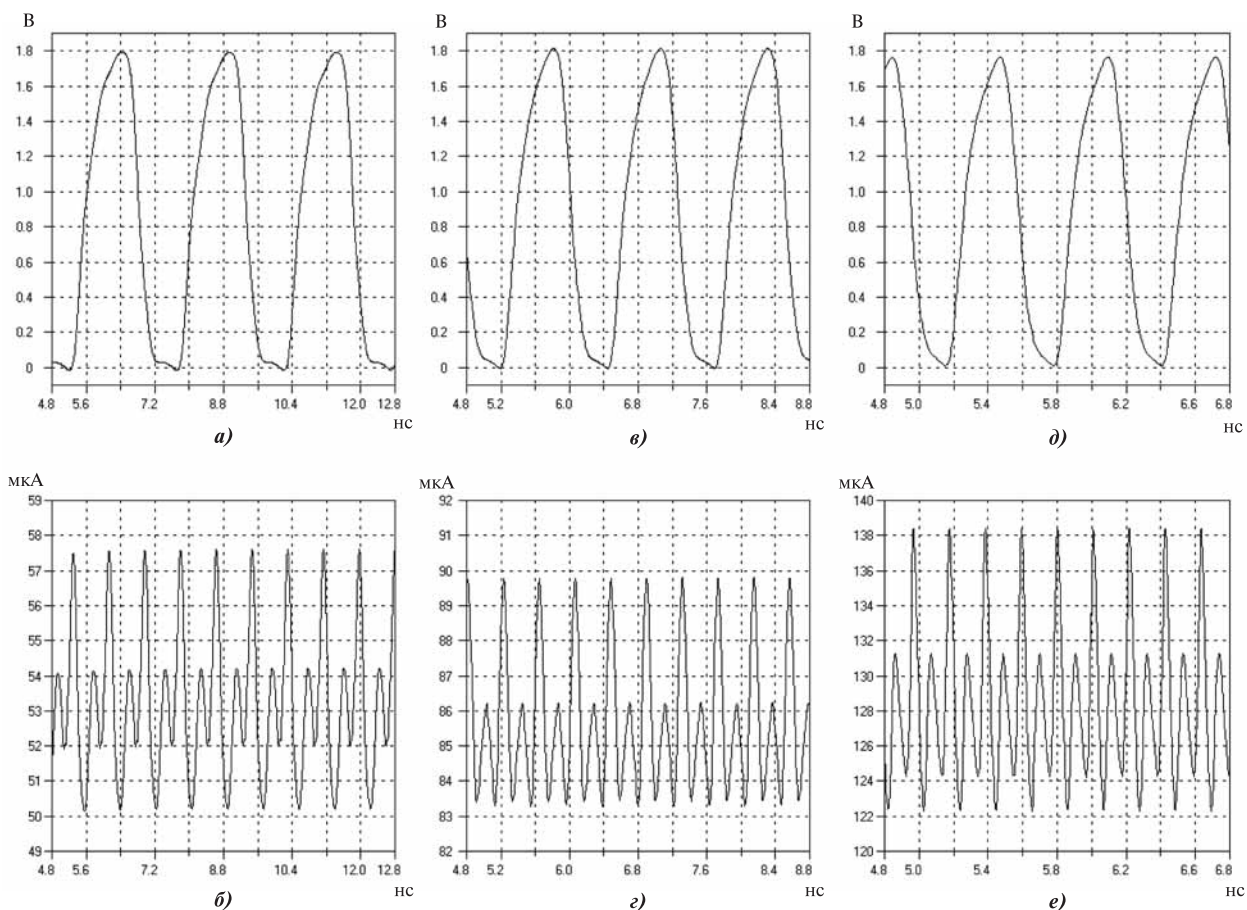


Рис. 4

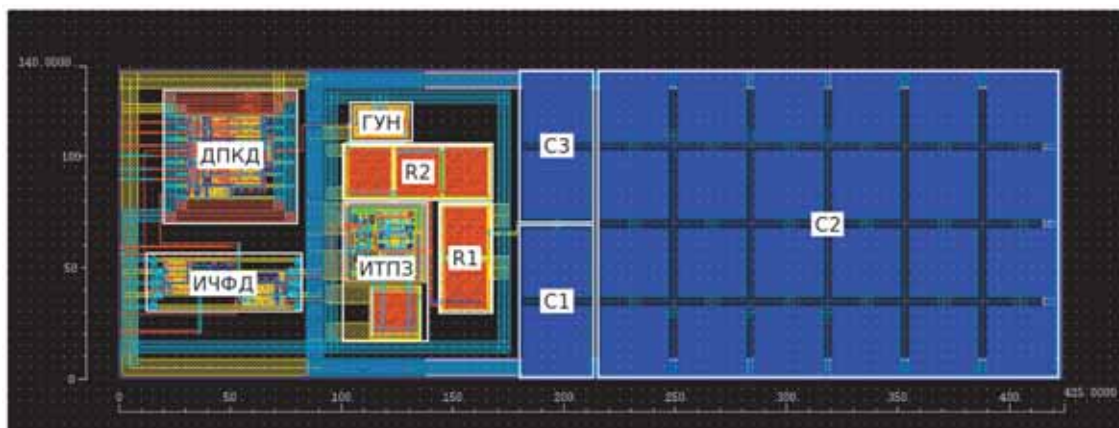


Рис. 5

чению 0,5. При частоте генерируемого колебания 1600 МГц мощность, потребляемая ГУН, составляет менее 250 мВт.

Топология интегральной реализации генератора на базе импульсной ФАПЧ. На рис. 5 представлен вид топологии генератора частот, реализованного по стандартному субмикронному технологическому процессу КМОП 180 нм и обеспечивающего синтез тактового сигнала в диапазоне частот от 400 до 1600 МГц при значении опорной частоты 20 МГц. Общие размеры блока составляют 425×140 мкм, причем более половины площади занимают конденсаторы ФКУ. Размеры собственно рассмотренного недифференциального кольцевого ГУН составляют 25×15 мкм.

Закключение. Предложенная новая реализация инвертора с управляемыми током и уровнями переключения позволила спроектировать компактный кольцевой КМОП ГУН,

работающий при низком напряжении питания, с низким постоянным значением и малым уровнем пульсаций потребляемого тока. Генератор имеет четырехкратное значение рабочего диапазона частот от 400 до 1600 МГц. Во всем диапазоне частот амплитуда сигнала колебания поддерживается постоянной и близкой к напряжению питания, что повышает помехоустойчивость генерирующего кольца. Коэффициент заполнения сигнала по уровню половины напряжения питания близок к 0,5. Изменение наклона модуляционной характеристики ГУН не превышает двукратного значения, что вполне приемлемо для построения устойчивого контура ФАПЧ. Максимальная потребляемая мощность составляет менее 250 мВт.

Совокупность представленных характеристик показывает, что разработанная схема инвертора генерирующего

кольца может быть рекомендована к использованию при проектировании микропотребляющих высокочастотных генераторов тактовых сигналов, предназначенных для функционирования на одном кристалле с цифровыми и аналоговыми блоками высокопроизводительных субмикронных КМОП СнК.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зарецкий М.М., Мовшович М.Е.** Синтезаторы частоты с кольцом фазовой автоподстройки. — Л.: Энергия, 1974. — 255 с.
2. **Шахгильдян В.В., Пестряков А.В., Кабанов А.И.** Общие принципы построения быстродействующих синтезаторов частот на основе систем фазовой синхронизации // Электросвязь. — 1983. — № 10. — С. 36–42.
3. **Зайцев А.А.** Синтезатор сетки частот для ЖК телевизора с функцией поддержки разрешения высокой четкости// Электросвязь. — 2008. — № 8. — С. 42–45.
4. **Энис В.И., Кобзев Ю.М.** Проектирование аналоговых КМОП-микросхем. Краткий справочник разработчика. — М.: Горячая линия — Телеком, 2005. — 454 с.
5. **Зайцев А.А.** Широкодиапазонный кольцевой генератор, управляемый напряжением // Патент России № 2397603. 2010. Бюл. № 23. — 18 с.
6. **Зайцев А.А., Макаров С.В., Перминов В.Н.** Возможности пакета AVOCAD при моделировании сложных функциональных блоков интегральных схем // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: Тр. 52-й науч. конф. МФТИ. — М.: МФТИ, 2009. — Ч. 5. — Т. 1. — С. 159–161.

Получено 27.05.10

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ САМУИЛА СОЛОМОНОВИЧА КОГАНА

17 апреля 2011 года исполнилось 100 лет со дня рождения видного ученого и инженера, доктора технических наук, много лет возглавлявшего крупное научно-исследовательское подразделение, занимавшееся разработкой фильтров, амплитудных и фазовых корректоров в Научно-производственном объединении «Дальняя связь» Министерства промышленности средств связи СССР **Самуила Соломоновича Когана**.

Широкий кругозор, глубокая эрудиция, творческий поиск выдвинули его в ряд ведущих ученых страны, научные достижения и изобретения которых воплощены в разработках, нашедших широкое применение в народном хозяйстве страны.

С.С. Коган внес основополагающий вклад в теорию и практику синтеза электрических цепей. По результатам теоретических изысканий им в 1950 году была опубликована монография «Теория и расчет фильтров для установок дальней связи», а в 1956 году защищена докторская диссертация. Монография была переведена на несколько иностранных языков и до сих пор не потеряла своей актуальности для специалистов, занимающихся разработкой фильтров различного применения.

Обладая даром научного предвидения, Самуил Соломонович Коган стал пионером в области применения в аппаратуре связи магнитоэлектрических, электромеханических, пьезоэлектрических монолитных, электрических фильтров. Специалистам хорошо известен его большой вклад в теорию передачи дискретных сигналов по каналам связи.

Научные исследования по проектированию каналов с помощью



С.С. Коган (1911–1989)

специальных устройств — пассивных постоянных корректоров и регулируемых гармонических и локальных корректоров на операционных усилителях позволили обеспечить качественную передачу дискретной информации по существующим каналам связи. Полученные результаты широко использовались при создании практически всех типов и разновидностей отечественных систем передачи.

Особо следует отметить роль Самуила Соломоновича как главного конструктора уникального каналообразующего оборудования «Газета-2» и «Газета-2СК» для высокоскоростной передачи газетных полос по кабельным, радиорелейным и спутниковым линиям связи.

В состав комплекса «Газета-2» входят три основные части: фототелеграфный аппарат, канальное оборудование и установка для автоматической обра-

ботки фотонегативов в пункте печатания газет.

Разработка комплекса была проведена в рекордно короткие сроки: началась в III квартале 1967 года, а в IV квартале 1969 года уже были изготовлены опытные образцы, которые были установлены на магистрали Москва–Алма-Ата и работали в течение нескольких лет, до замены их серийными стойками.

Канальное оборудование в составе всего комплекса «Газета-2» в 1970 году экспонировалось на ВДНХ и было удостоено Золотой медали выставки. В 1975 году комплекс экспонировался на отраслевой выставке «Связь-75». В 1985 году главный конструктор канального оборудования С.С. Коган был удостоен звания лауреата премии Совета Министров СССР.

Благодаря самоотверженной научной, производственной и общественной деятельности С.С. Коган завоевал заслуженный авторитет среди коллег как в своей, так и в смежных отраслях техники. Он привлекал специалистов к решению сложных проблем, осуществлял постоянное руководство их научными работами, результаты которых находили отражение в статьях, диссертациях, а затем широко применялись в оборудовании связи.

Огромная работоспособность С.С. Когана, его увлеченность, целеустремленность в достижении результатов служат примером для последующих поколений ученых и специалистов. Научные идеи Самуила Соломоновича еще многие годы будут востребованы специалистами-разработчиками телекоммуникационного оборудования.

Б.А. Лапшин, д.т.н.
Л.С. Левин, д.т.н.
В.Д. Лиференко, д.т.н.