

# Методы проектирования тактовых генераторов с распределенным спектром

О.В. Сысоева, А.Е. Агафонов, П.Г. Кириченко

Учреждение Российской академии наук

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, olga@cs.niisi.ras.ru

**Аннотация** — Статья описывает методы проектирования тактовых генераторов с распределенным спектром (ТГРС), которые используются в составе синтезатора частоты с блоком фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Разработанный ТГРС предназначен для стандарта Serial ATA и обеспечивает расширение спектра синхросигнала в пределах  $-5000$  ppm. Модифицированный вариант ТГРС имеет более гибкие настройки: расширение спектра синхросигнала с повышением/понижением относительно центральной частоты в пределах  $5000$  ppm и  $2500$  ppm. Результаты проектирования подтверждены моделированием характеристик схемы на базе технологии КМОП 65 нм при напряжении питания 1В.

**Ключевые слова** — ФАПЧ, тактовый генератор, распределенный спектр.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Многие современные высокоскоростные системы подвержены влиянию электромагнитных помех (ЭМП). Одним из основных источников электромагнитного излучения (ЭМИ) являются генераторы тактовых импульсов, обеспечивающие синхронную работу этих изделий, поскольку частота тактового генератора, как правило, превышает остальные рабочие частоты. Генерируемые помехи ухудшают характеристики оборудования либо влияют на параметры находящегося поблизости устройства.

Наиболее распространенными методами снижения ЭМИ являются экранирование и фильтрация. Однако экранирование эффективно только в системах с высоким уровнем ЭМИ, в которых объем, вес и стоимость не очень важны. А использование фильтров низких частот может быть неприменимо для высокоскоростных систем, т.к. приводит к уменьшению критичных временных допусков сигналов.

Еще одним методом уменьшения ЭМИ является модуляция тактового сигнала, известная как распределенный спектр. При использовании технологии распределенного спектра системный тактовый сигнал модулируется низкой частотой в пределах  $30 \dots 35$  кГц. Энергия сигнала распределяется с помощью модуля-

ции в полосе частот, а не концентрируется в одной частоте. В отличие от фильтрации и экранирования, которые подавляют ЭМП, генераторы с распределенным спектром подавляют причину помех в самом источнике тактового сигнала. При использовании этого метода системные электромагнитные помехи могут быть снижены вплоть до 20 дБ.

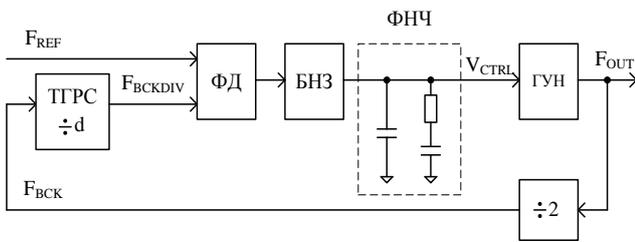
Стандарт последовательного интерфейса Serial ATA требует, чтобы в синтезатор синхросигналов передатчика встраивался блок, обеспечивающий размытие спектра синхросигнала в пределах  $5000$  ppm вниз от основной частоты [1]. Такое решение позволяет существенно снизить уровень ЭМП, возникающих при передаче данных в вычислительных системах по высокоскоростному последовательному каналу.

## II. АРХИТЕКТУРА

### A. Общая структура синтезатора синхросигнала с распределенным спектром

На рис. 1 изображена структурная схема однопетлевого синтезатора на основе блока фазовой автоподстройки частоты с возможностью модуляции выходного тактового сигнала.

На выходе синтезатора расположен перестраиваемый генератор, управляемый напряжением (на рисунке - ГУН), сигнал которого после требуемого деления на  $d$  по частоте ( $F_{\text{VCKDIV}}$ ) подается на один из входов фазового детектора (ФД). Другой вход фазового детектора подключен к опорному сигналу  $F_{\text{REF}}$ . Фазовый детектор сравнивает сигналы на обоих входах и генерирует сигнал ошибки, который поступает на вход блока накачки заряда (БНЗ). Последний формирует соответствующий корректирующий импульсный заряд большой амплитуды и малой длительности, который проходит далее через фильтр низких частот (ФНЧ) и подстраивает частоту ГУН к нужной выходной частоте. В установившемся состоянии синтезатор генерирует выходную частоту  $F_{\text{OUT}}$  в  $2d$  раз большую, чем опорная частота  $F_{\text{REF}}$ . Модуляция выходного тактового сигнала осуществляется в блоке тактового генератора с распределенным спектром (ТГРС).

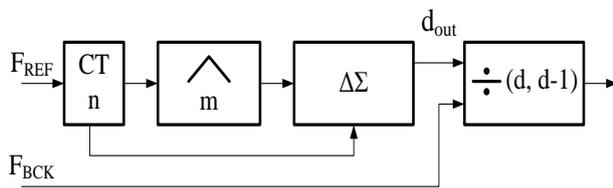


**Рис. 1. Структурная схема синтезатора синхросигнала с распределенным спектром**

В данной статье рассматриваются два варианта реализации ТГРС: с переменным коэффициентом деления  $d$  и с использованием фазового интерполятора.

### В. Функциональная схема ТГРС с переменным коэффициентом деления

Типовая функциональная схема блока тактового генератора с распределенным спектром с переменным коэффициентом деления представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Функциональная схема ТГРС с переменным коэффициентом деления**

Схема включает четыре блока (слева направо): счетчик импульсов опорной частоты; генератор профиля модуляции; дельта-сигма модулятор и делитель с переменным коэффициентом деления.

Алгоритм работы данной схемы выглядит следующим образом. Блок ТГРС должен менять коэффициент деления синтезатора так, чтобы выходная частота меняла свою величину в заданных пределах. В обычном режиме работы (сигнал  $d_{out}=0$ ) выходной тактовый сигнал имеет следующую частоту:

$$F_{OUT0} = F_{REF} \cdot 2 \cdot d. \quad (1)$$

При установке сигнала  $d_{out}$  в высокий уровень коэффициент деления синтезатора устанавливается равным  $d-1$ . В течение  $n$  циклов выходной частоты делителя сигнал устанавливается в высокий уровень  $m$  раз. Таким образом, усредненная частота за  $n$  циклов отличается от  $F_{OUT0}$  и равна:

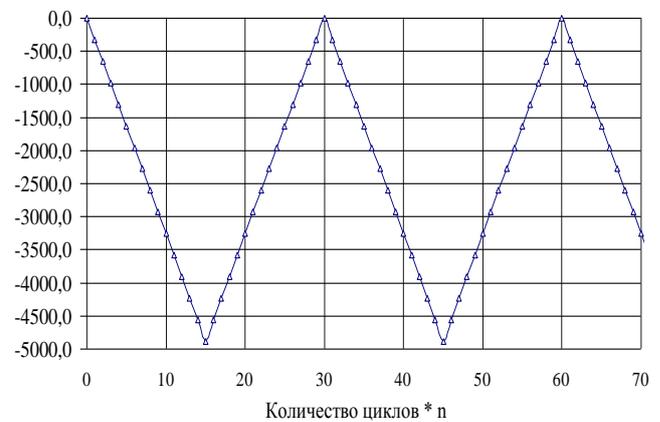
$$F_{OUT} = F_{OUT0} \cdot \left(1 - \frac{m}{n \cdot d}\right). \quad (2)$$

Если  $m$  будет изменяться периодически от 0 до  $M$  и обратно, то образуется низкочастотный профиль

модулирования, обеспечивающий отклонение выходной частоты синтезатора в требуемых пределах [2].

Задачу отсчета  $n$  импульсов опорной частоты выполняет блок счетчика, а расчет количества команд на понижение коэффициента деления  $m$  в текущем наборе из  $n$  импульсов – генератор профиля модуляции на рис. 2.

На рис. 3 приведены результаты теоретического расчета профиля модулирования ТГРС для синтезатора с опорной частотой 125 МГц и выходной 6 ГГц. При этом на вход делителя с переменным коэффициентом деления подается сигнал с частотой 3 ГГц. Вычисленные по формуле (2) коэффициенты  $n = 128$  и  $M = 16$  задают треугольный профиль модулирования с периодом  $\sim 32$  кГц и амплитудой  $\sim 5000$  ppm. По горизонтальной оси на рис. 3 переменной величиной является количество циклов выходной частоты делителя, умноженное на  $n$  (период, в течение которого  $m$  изменяется на 1), по вертикальной – разность между  $F_{OUT}$  и  $F_{OUT0}$ , выраженная в ppm.



**Рис. 3. Профиль модулирования**

Команды на изменение коэффициента деления необходимо подавать равномерно в течение  $n$  периодов выходной частоты делителя. В противном случае возможно значительное увеличение дрожания выходной частоты синтезатора или даже срыв генерации. Так как количество команд  $m$  в каждом конкретном наборе из  $n$  периодов разное, то для обеспечения равномерности используется дельта-сигма модулятор.

Достоинством данного вида модуляции является простота его реализации. Недостатком описанного ТГРС является слишком большой фазовый сдвиг выходного тактового сигнала при изменении коэффициента деления, что приводит к существенному увеличению его джиттера. Возникает опасность, что тактовый сигнал может временно выйти за допустимые пределы требуемой модуляции.

### С. Функциональная схема ТГРС с фазовым интерполятором

Для решения проблемы, описанной выше, в схему ТГРС был добавлен блок фазового интерполятора

(ФИ). В этом случае минимальная модуляция частоты будет соответствовать минимально возможному сдвигу фазы ФИ, что уменьшает джиттер выходного тактового сигнала. Функциональная схема модифицированного ТГРС приведена на рис. 4.

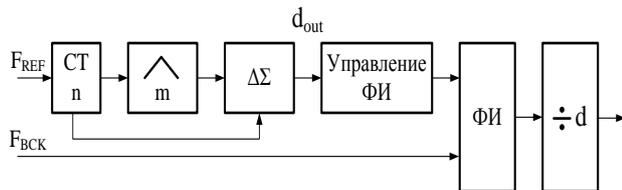


Рис. 4. Функциональная схема ТГРС с ФИ

В ТГРС используется архитектура ФИ, описанная в [3], с 32-мя сдвигами фазы на период тактового сигнала. Однако, в отличие от архитектуры [3], в разработанном ФИ фазовращатель управляется не сдвиговым регистром, а дельта-сигма модулятором, что обеспечивает большую гибкость системы. Коэффициент деления  $d$  остается постоянным при всех режимах работы синтезатора. Контроллер ФИ управляет направлением и величиной фазового сдвига. В данном варианте ТГРС реализовано расширение спектра синхросигнала глубиной в 5000 ppm и 2500 ppm с повышением/понижением относительно центральной частоты.

### III. ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Рассмотренные варианты ТГРС были разработаны на базе технологии КМОП 65нм с напряжением питания 1В. Площадь ТГРС с переменным коэффициентом деления – 2565 мкм<sup>2</sup>, с фазовым интерполятором – 5838 мкм<sup>2</sup>. Топология ТГРС с ФИ приведена на рис. 5.

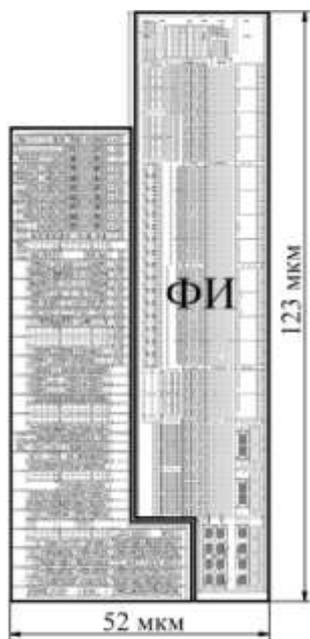


Рис. 5. Топология ТГРС с ФИ

### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование работы синтезатора с разными вариантами ТГРС проводилось в SPICE симуляторе после экстракции паразитов при напряжении питания 1В ±10% и температурах от -40 до 125 °С. Выходная частота синтезатора 6 ГГц, опорная частота 125 МГц.

На рис. 6 изображены графики спектральной плотности мощности (СПМ) двух режимов работы синтезатора с переменным коэффициентом деления: с включенной модуляцией и без. Величина размывания спектра составляет -5000 ppm, что соответствует стандарту SATA. На краях распределенного спектра заметен его подъем из-за больших фазовых сдвигов, вызванных изменением коэффициента деления  $d$ .

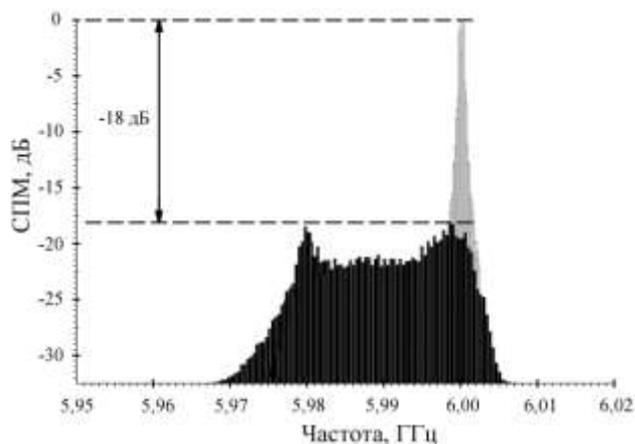


Рис. 6. СПМ для синтезатора с ТГРС с переменным коэффициентом деления. Модуляция -5000 ppm

На рис. 7 представлены графики СПМ для синтезатора с ТГРС на основе ФИ для вариантов модуляции ±2500 ppm и ±5000 ppm.

В табл. 1 приведены значения СПМ для различных вариантов ТГРС, полученные в результате моделирования, и аналогичного блока [4]. Из таблицы видно, что применение фазового интерполятора позволяет уменьшить СПМ тактового сигнала на 2 дБ.

Таблица 1

Сравнение ТГРС с различной архитектурой

	Изменение выходной частоты, ppm	СПМ, дБ
ТГРС с переменным коэффициентом деления	-5000	-18
ТГРС с ФИ	±5000	-20
	±2500	-17
Аналог [4]	±5000	-21

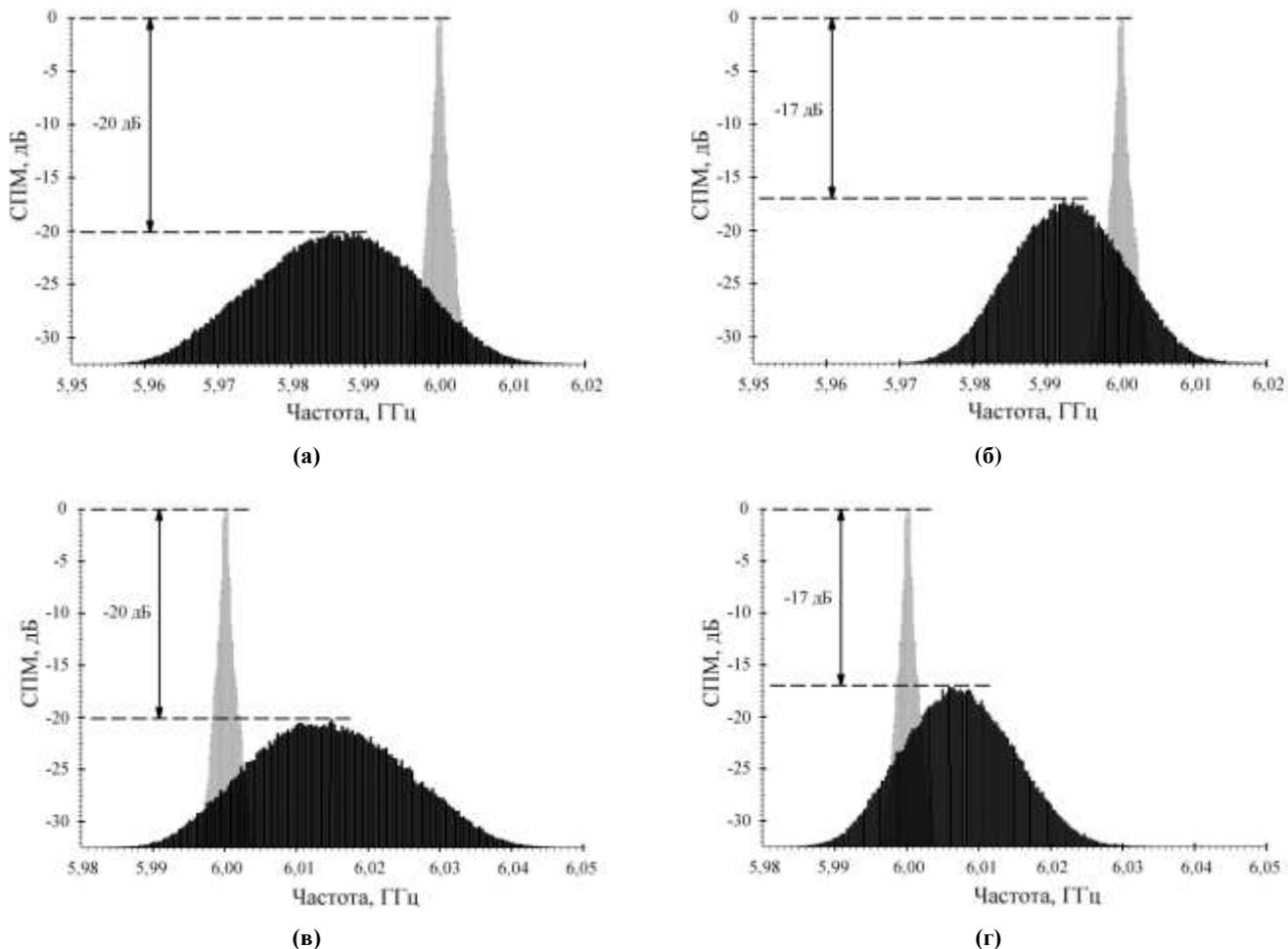


Рис. 7. СПМ для синтезатора с ТГРС с ФИ с модуляцией -5000 ppm (а), -2500 ppm (б), +5000 ppm (в), +2500 ppm (г)

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье описаны две архитектуры ТГРС, который входит в состав однопетлевого синтезатора частоты на основе ФАПЧ.

ТГРС на основе переменного коэффициента деления обеспечивает расширение спектра синхросигнала до 5000 ppm с понижением относительно центральной частоты. Модифицированный вариант ТГРС с ФИ обладает улучшенными характеристиками и позволяет расширить спектр тактового сигнала с повышением/понижением относительно центральной частоты в пределах 2500 ppm и 5000 ppm. Возможность программирования величины и направления модуляции (вверх/центральная/вниз) позволяет использовать разработанный синтезатор с ТГРС в различных применениях: не только SATA, но также SAS и PCI Express.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Serial ATA Standard Revision 2.6 // Serial ATA International organization. 2007. P. 600.
- [2] Sugawara M., Ishibashi T., Ogasawara K., Aoyama M. 1.5 Gbps, 5150 ppm Spread Spectrum SerDes PHY with a 0.3 mW, 1.5 Gbps Level Detector for Serial ATA // Symposium on VLSY Circuits Digest Of Technical Papers. 2002. P. 60-63.
- [3] Hsien M.-T., Sobelman G.E. Clock and Data Recovery with Adaptive Loop Gain for Spread Spectrum SerDes Applications // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2005. P. 4883-4886.
- [4] Hsien M.-T., Welch J., Sobelman G.E. PLL performance comparison with application to spread spectrum clock generator design // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2010. V. 63. № 2. P. 197-216.