

Аспекты радиационной стойкости синтезаторов частоты на основе ФАПЧ

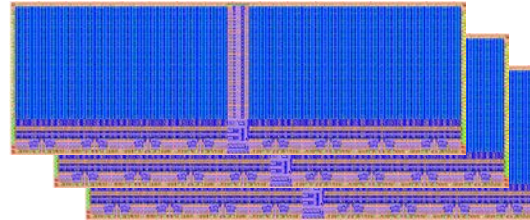
МЭС - 2018

*Технический директор ООО «Альфачип»
Леонид Евгеньевич Переверзев*

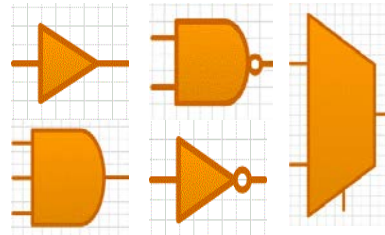
*Зеленоград
октябрь 2018*

Компоненты цифровых СнК

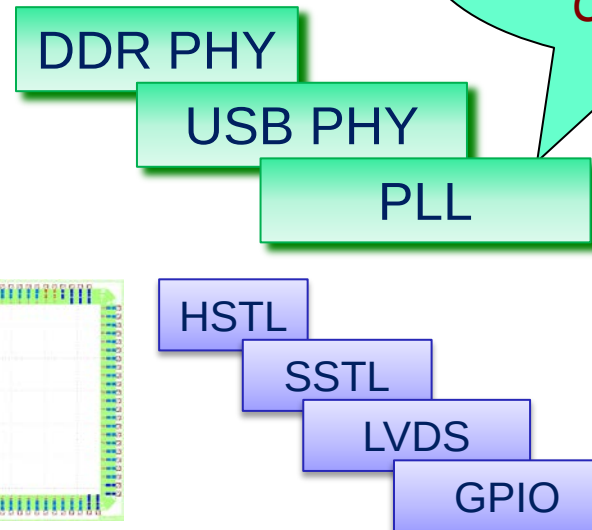
❖ Встраиваемая память



❖ Библиотеки стандартных ячеек

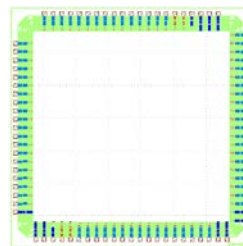


❖ Сложные функциональные блоки



Один из наиболее востребованных СФ-блоков

❖ Библиотеки ячеек ввода-вывода



Функции синтезатора частоты в СнК

❖ Синхронизация в каналах последовательной передачи данных

- процессор – память (GDDR5, DDR4)



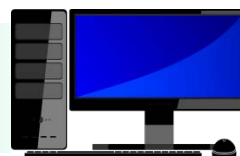
- процессор – периферия (PCIe, USB 3.1, Thunderbolt)



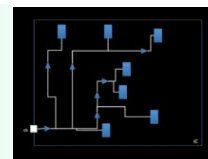
- процессор – процессор



- сетевые интерфейсы



❖ Генераторы тактовых сигналов



❖ Приемо-передающие тракты беспроводных средств коммуникации.



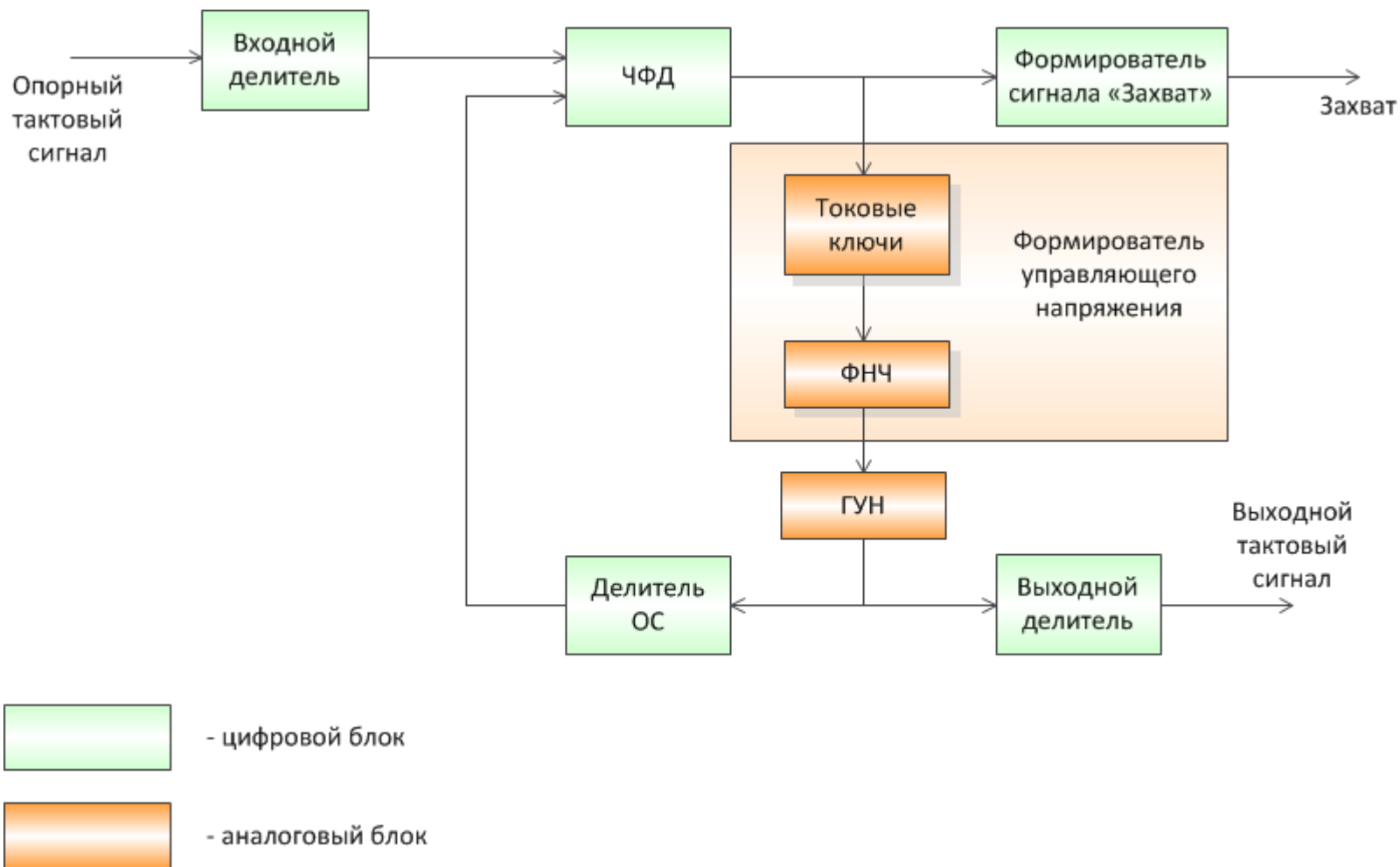
СЧ в генераторах тактовых сигналов СнК

❖ Среди большого разнообразия функций СЧ наиболее типичным их применением в СнК можно считать генераторы тактовых сигналов:

- широкая распространенность (большинство цифровых и смешанных СнК) имеют подсистему генерации тактовых сигналов;
- типичность технических требований:
 - широкий диапазон перестройки частоты;
 - отсутствие экстремальных ограничений на фазовый шум, дискретность перестройки и т.д., характерных для радиопередающих трактов.

❖ В силу вышеуказанных причин для анализа различных аспектов радиационной стойкости был выбран синтезатор тактовой частоты на основе ФАПЧ.

Пример архитектуры СЧ на основе ФАПЧ



Факторы радиационного воздействия

Фактор радиационного воздействия	Критичность влияния	
	на цифровые блоки СЧ	на аналоговые блоки СЧ
Тиристорный эффект	Высокая	Высокая
Накопление дозы	Низкая	Низкая: - изменение частоты компенсируется ОС ФАПЧ; - изменение скважности компенсируется выходным делителем на 2.
Одиночные воздействия ТЗЧ	Высокая при наличии последовательностных элементов и несамовосстанавливающихся схем	Высокая при наличии несамовосстанавливающихся схем

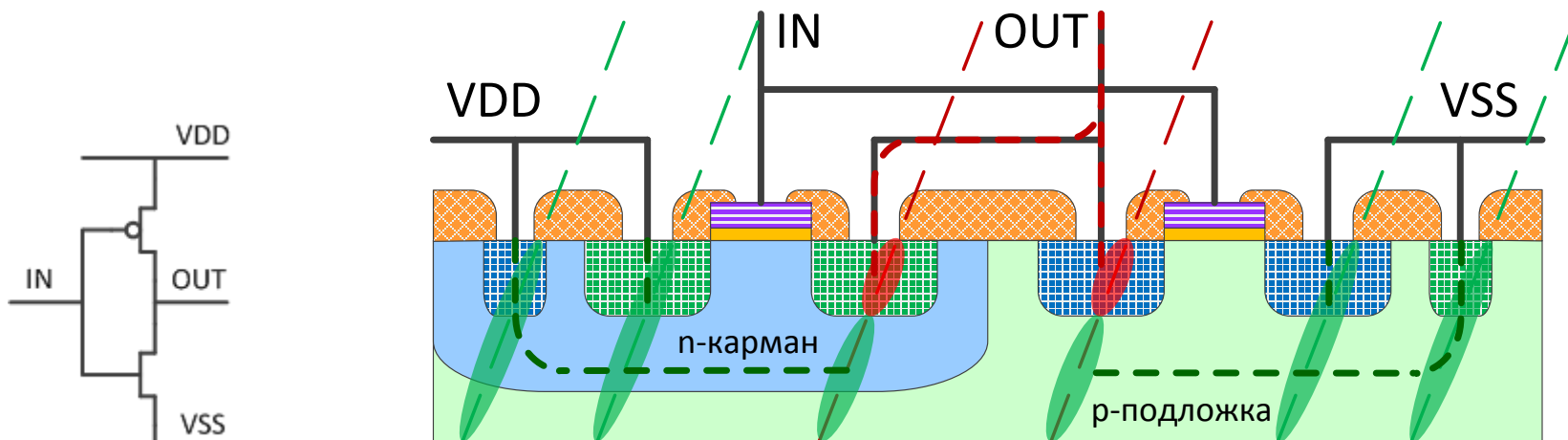
Критичность влияния ТЗЧ на блоки СЧ

- ❖ Аналоговые блоки имеют разную степень критичности:
 - ГУН, построенный на кольцевом генераторе приводит к накоплению сбоев;
 - токовые ключи могут вызывать локальные увеличения джиттера и восстановимую потерю захвата частоты;
 - ФНЧ, содержащий пассивные элементы, наименее подвержен влиянию ТЗЧ.
- ❖ *Все цифровые блоки СЧ содержат последовательностные элементы:*
 - счетчики-делители частоты построены на триггерах;
 - частотно фазовый детектор также построен на триггерах.
- ❖ *Таким образом, для повышения радиационной стойкости СЧ требуется принятие специальных мер практически для всех его блоков.*

Варианты реализации ГУН

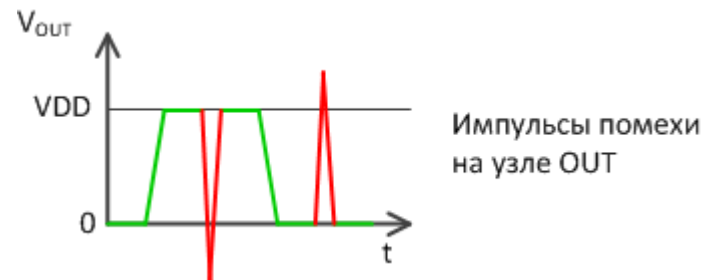
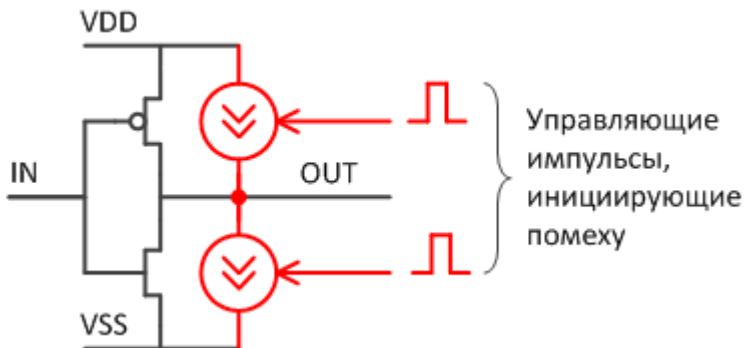
Особенности	Кольцевой генератор	Релаксационный генератор	LC - генератор
Коэффициент перестройки частоты	Высокий	Высокий	Низкий
Фазовый шум	Высокий	Высокий	Низкий
Коэффициент подавления шумов по питанию	Высокий (в дифференциальных схемах)	Низкий	Высокий
Простота реализации в техпроцессе СБИС	Реализуется в стандартном КМОП процессе	Реализуется в стандартном КМОП процессе	Удорожает технологический процесс
Самовосстановление после одиночного сбоя	Зависит от момента времени и энергии воздействия	Да	Да

Имитация одиночного воздействия ТЗЧ



Пути протекания токов,
нейтрализующих
индуцированный заряд

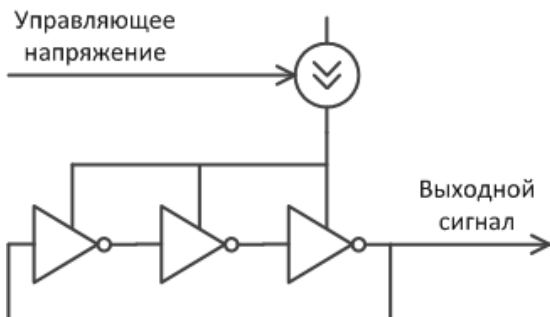
- через источник питания
- через функциональный узел



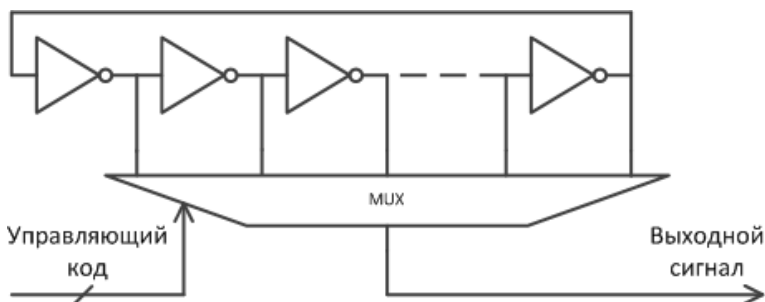
Параметры одиночного воздействия ТЗЧ

Диапазоны параметров одиночных воздействий, актуальные для современным КМОП технологий и требований по стойкости к воздействию ТЗЧ	Типовые значения параметров для анализа СЧ, разрабатываемого по технологии 65 нм
ЛПЭ: 1 ... 100 МэВ*см ² /мг	50 МэВ*см ² /мг
Длина пробега ТЗЧ: 50 ... 500 нм	100 нм
Индукцированный заряд: 0,5 ... 500 фКл	50 фКл
Емкость узла: 5 ... 50 фФ	10 фФ
Амплитуда импульса помехи (гипотетическая, без учета эффектов пробоя): 0,01 ... 100 В В большей части диапазона амплитуда помехи превышает пороги переключения логических элементов	5 В
Длительность нейтрализации индуцированного заряда током 100 мкА: (0,5*10 ⁻¹⁵ /10 ⁻⁴)=5 пс ... (500*10 ⁻¹⁵ /10 ⁻⁴)= 5 нс	0,5 нс

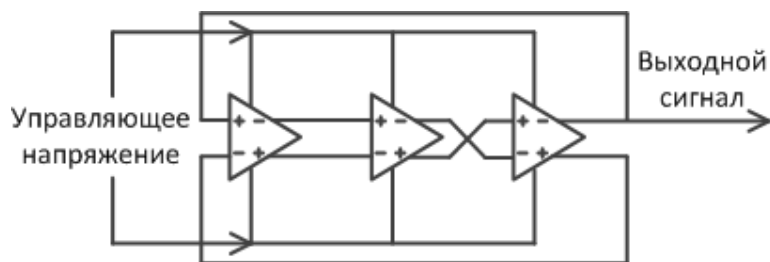
Накопление сбоев в кольцевом генераторе



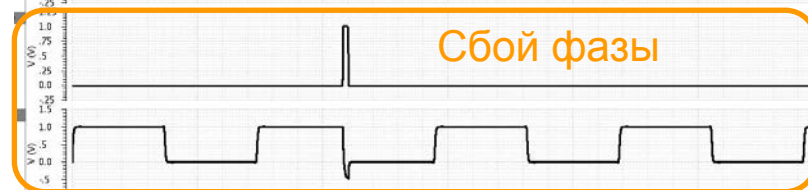
Управляемые инверторы



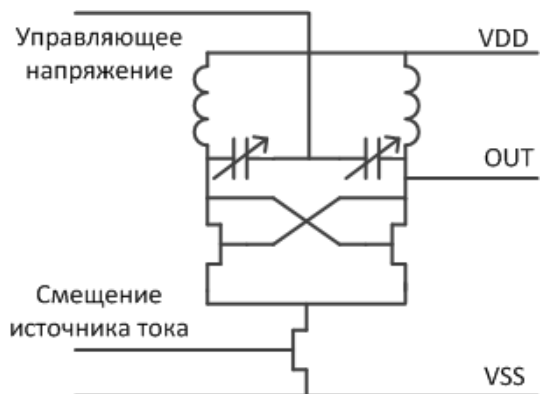
Программируемая линия задержки



Дифференциальные буферы

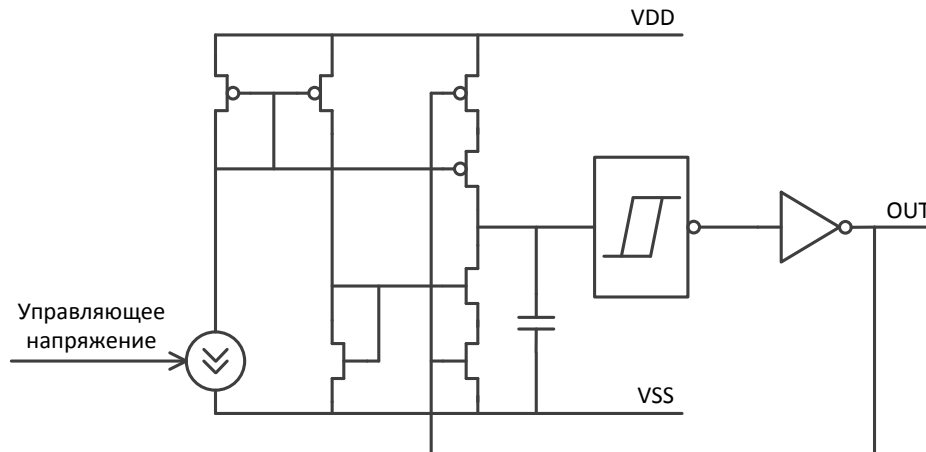


Генераторы с самовосстановлением



LC-генератор

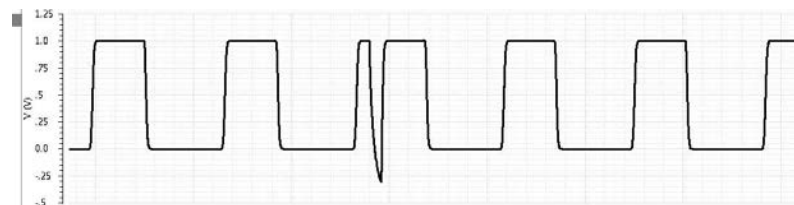
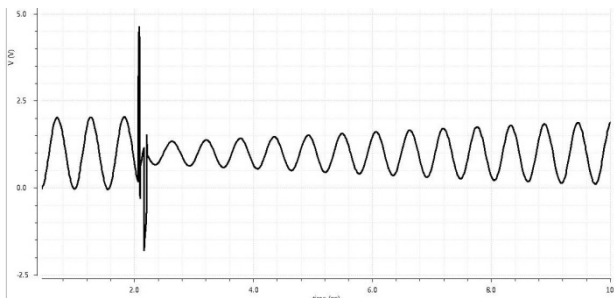
Минимальный фазовый шум
Малый диапазон перестройки
Большая площадь
Более дорогая технология (L)



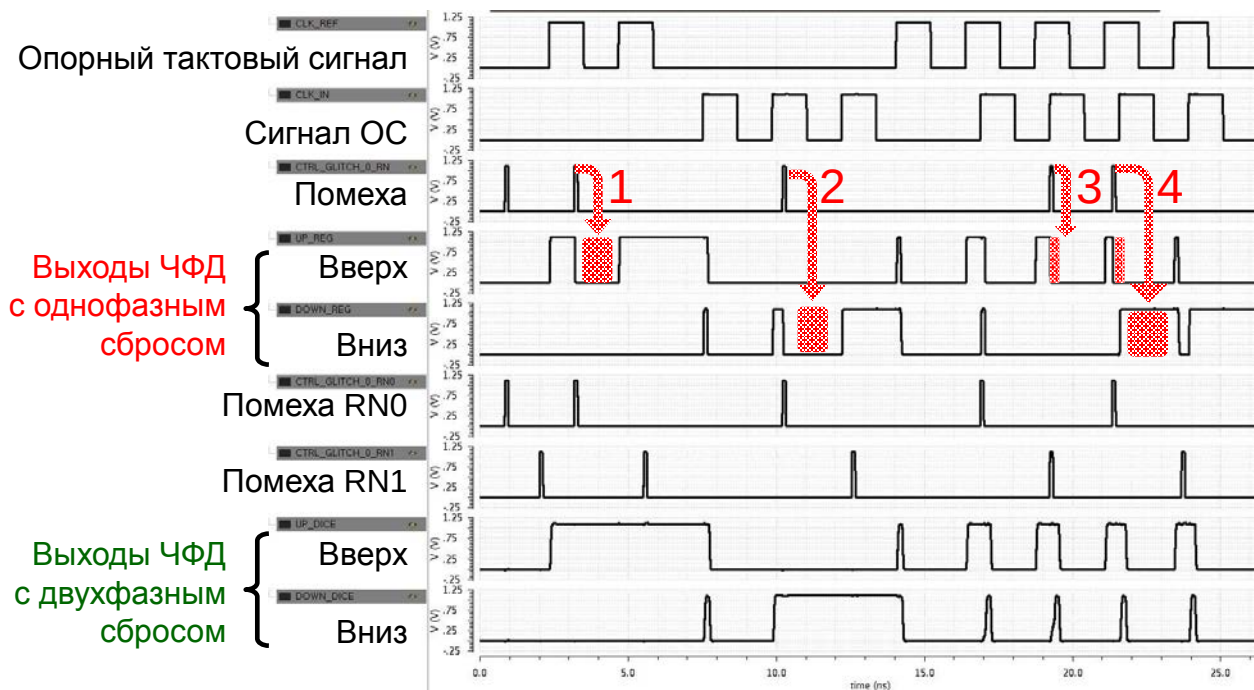
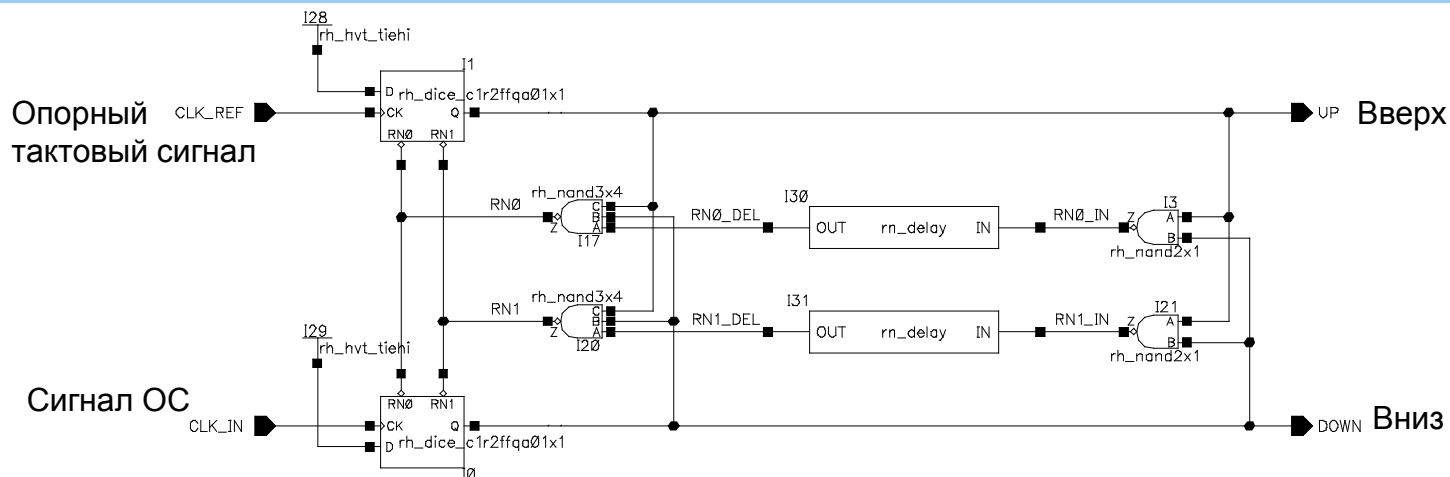
Релаксационный генератор

Большой фазовый шум
Большой диапазон перестройки
Меньшая площадь
Не требуется поддержка L

Отсутствие накопления сбоя от одиночных воздействий ТЗЧ



Частотно-фазовый детектор



Сбои ЧФД на основе DICE D-триггеров с однофазным сбросом:

- 1 – пауза в импульсе «Вверх»
- 2 – пауза в импульсе «Вниз»
- 3 – укорочение импульса «Вверх»
- 4 – укорочение импульса «Вверх» и ложный импульс «Вниз»

ЧФД на основе DICE D-триггеров с двухфазным сбросом устойчив к одиночным воздействиям ТЗЧ

Токовые ключи и ФНЧ

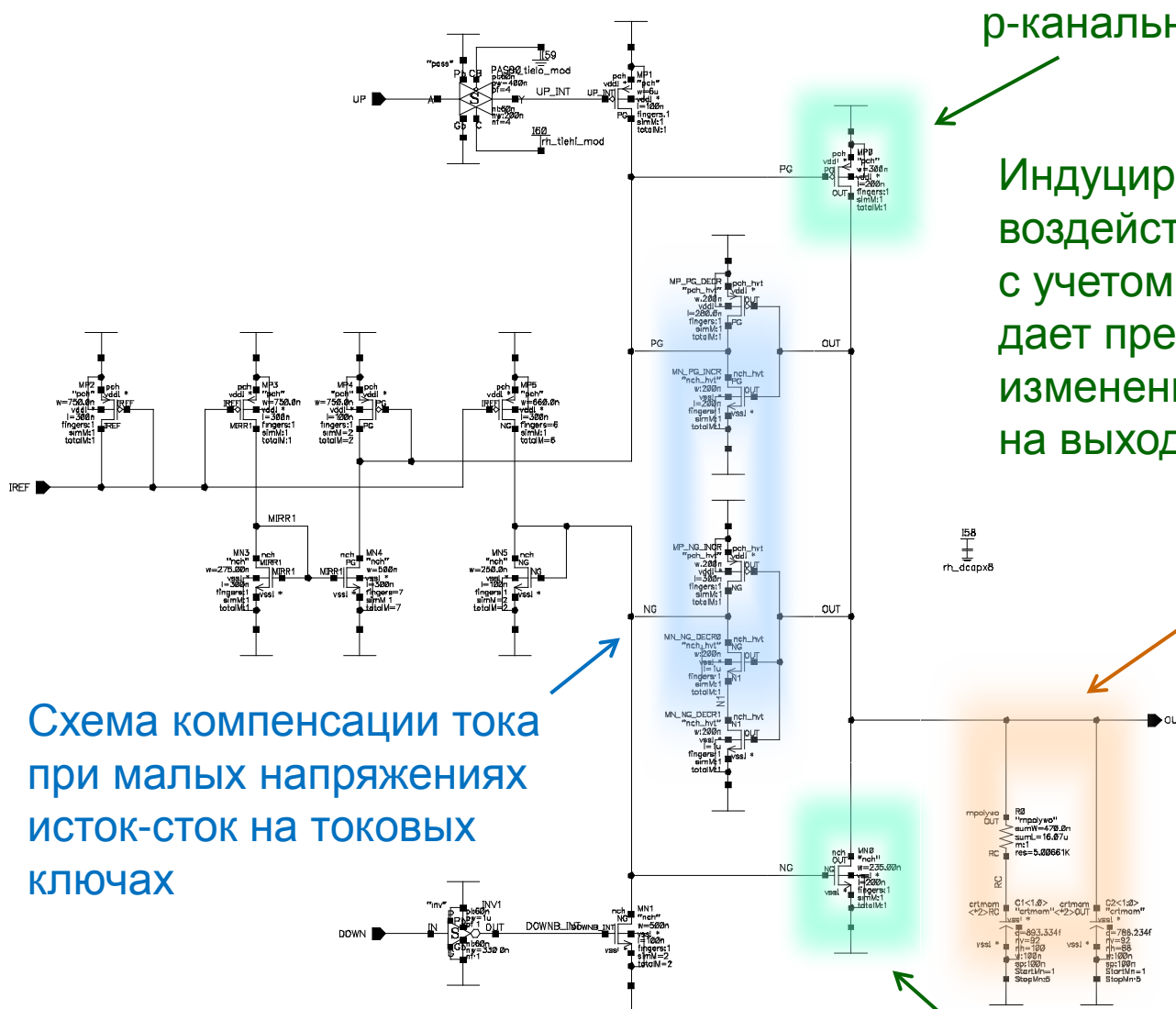


Схема компенсации тока при малых напряжениях исток-сток на токовых ключах

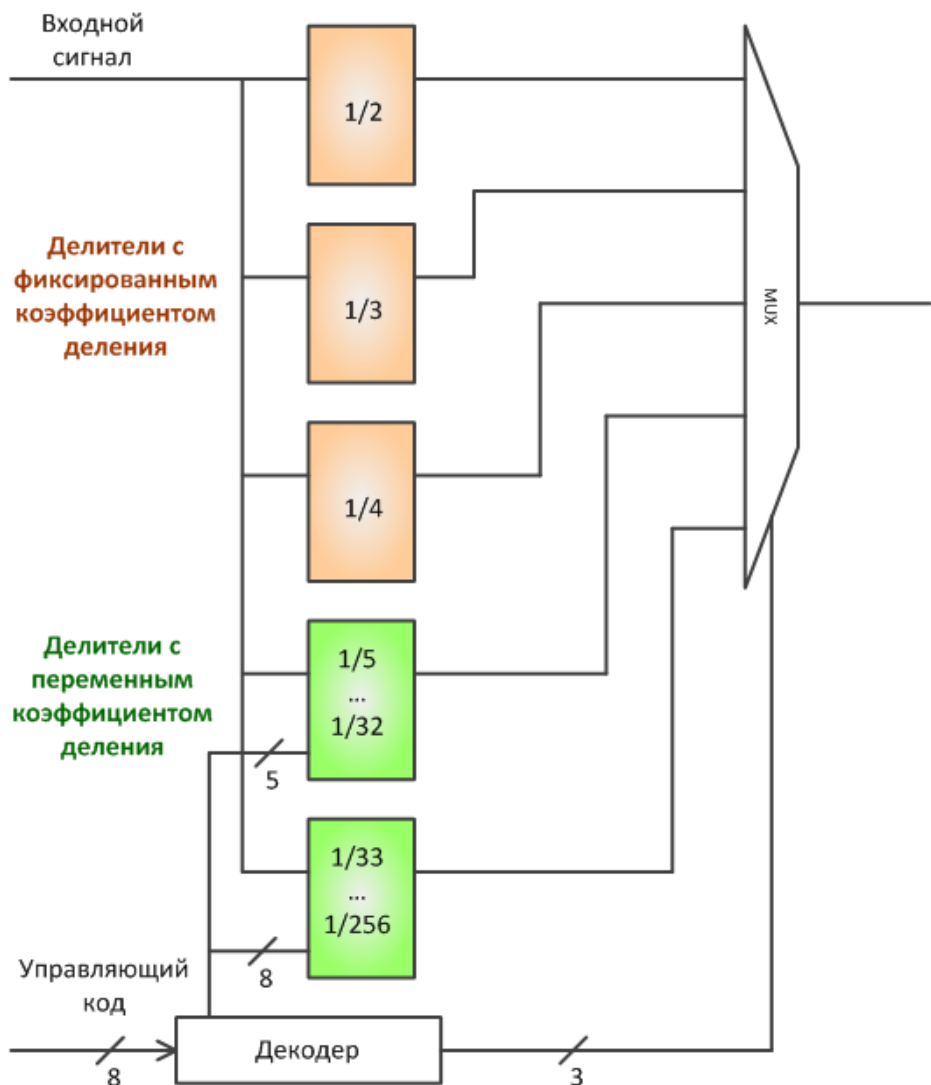
р-канальный ключ

Индукированный одиночным воздействием ТЗЧ заряд ~ 50 фКл с учетом емкости ФНЧ $C2=1,6$ пФ дает пренебрежимо малое изменение потенциала на выходе фильтра: ~ 30 мВ

ФНЧ
 $R0=5$ кОм
 $C1=16$ пФ
 $C2=1,6$ пФ

п-канальный ключ

Счетчики-делители частоты



❖ Повышение стойкости к воздействию ТЗЧ достигается использованием:

- схем самовосстанавливающихся счетчиков;
- DICE D-триггеров для построения счетчиков.

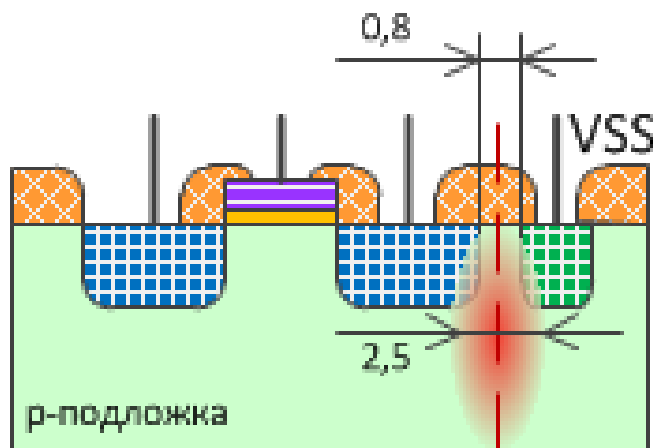
❖ В разработанном СЧ применены счетчики на DICE - триггерах:

- самовосстанавливающиеся счетчики Джонсона с фиксированными коэффициентами деления $1/3$ и $1/4$;
- самовосстанавливающиеся счетчики $N/N+1$ с целочисленными коэффициентами деления

Формирователь сигнала «Захват»

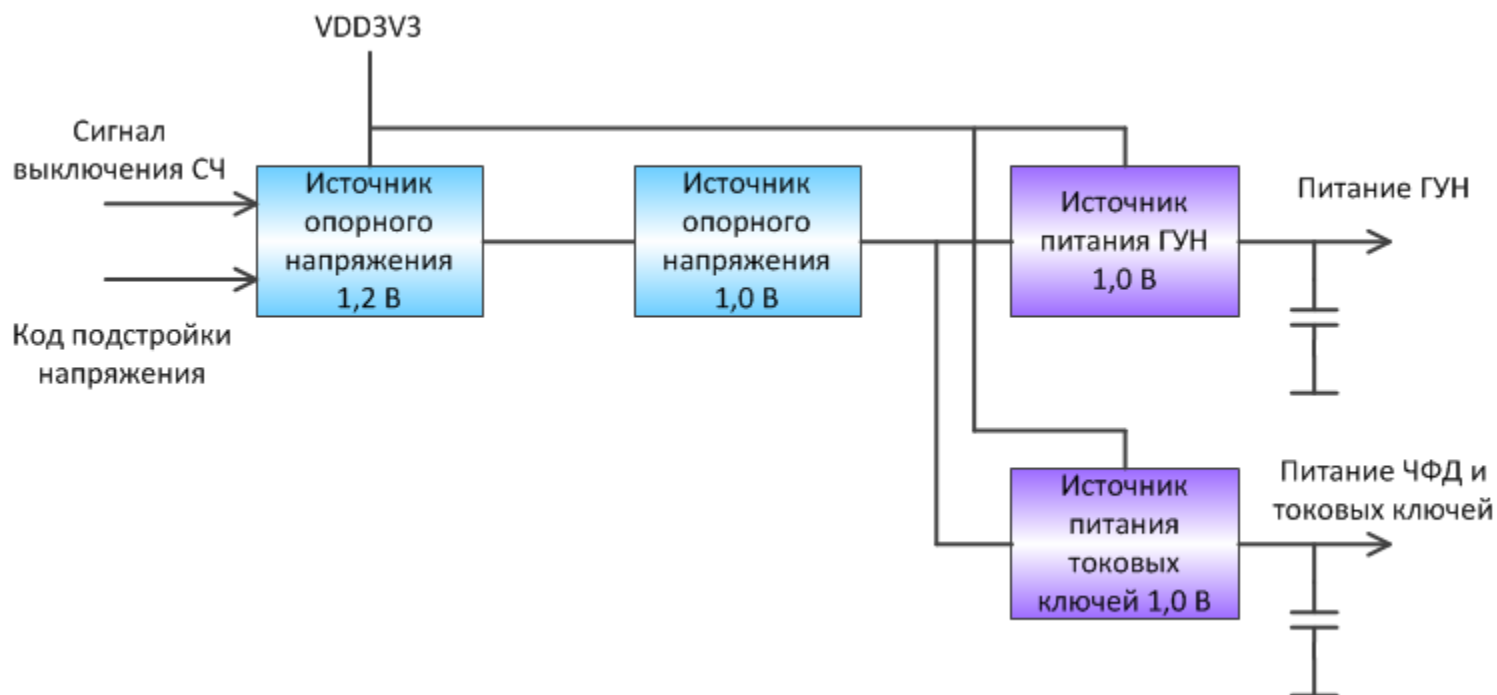
- ❖ В формирователе сигнала «Захват» также применены DICE-триггеры для построения последовательностных элементов и двухфазная комбинационная логика с целью повышения их стойкости к воздействию ТЗЧ.
- ❖ Защита от тиристорного эффекта реализована при разработке топологии так же, как и во всех других блоках СЧ, применением контактов и охранных колец с расстоянием от контактов к подложке и карману до активных областей приборов не превышающем диаметра пятна поражения от одиночного воздействия ТЗЧ $\sim 2,5$ мкм.

В разработанном для технологии 65 нм СЧ расстояние от контактов до активных областей не превышает 0,8 мкм.



Вторичная система питания

- ❖ Для подавления влияния шумов по питанию на критичные аналоговые блоки, такие как ГУН и токовые ключи, применяется встроенная в СФ-блок СЧ вторичная система электропитания.
- ❖ Раздельные источники питания 1 В позволяют уменьшить влияние шумов по питанию, создаваемых токовыми ключами и ЧФД на ГУН и уменьшить дрожание фазы выходного сигнала СЧ.

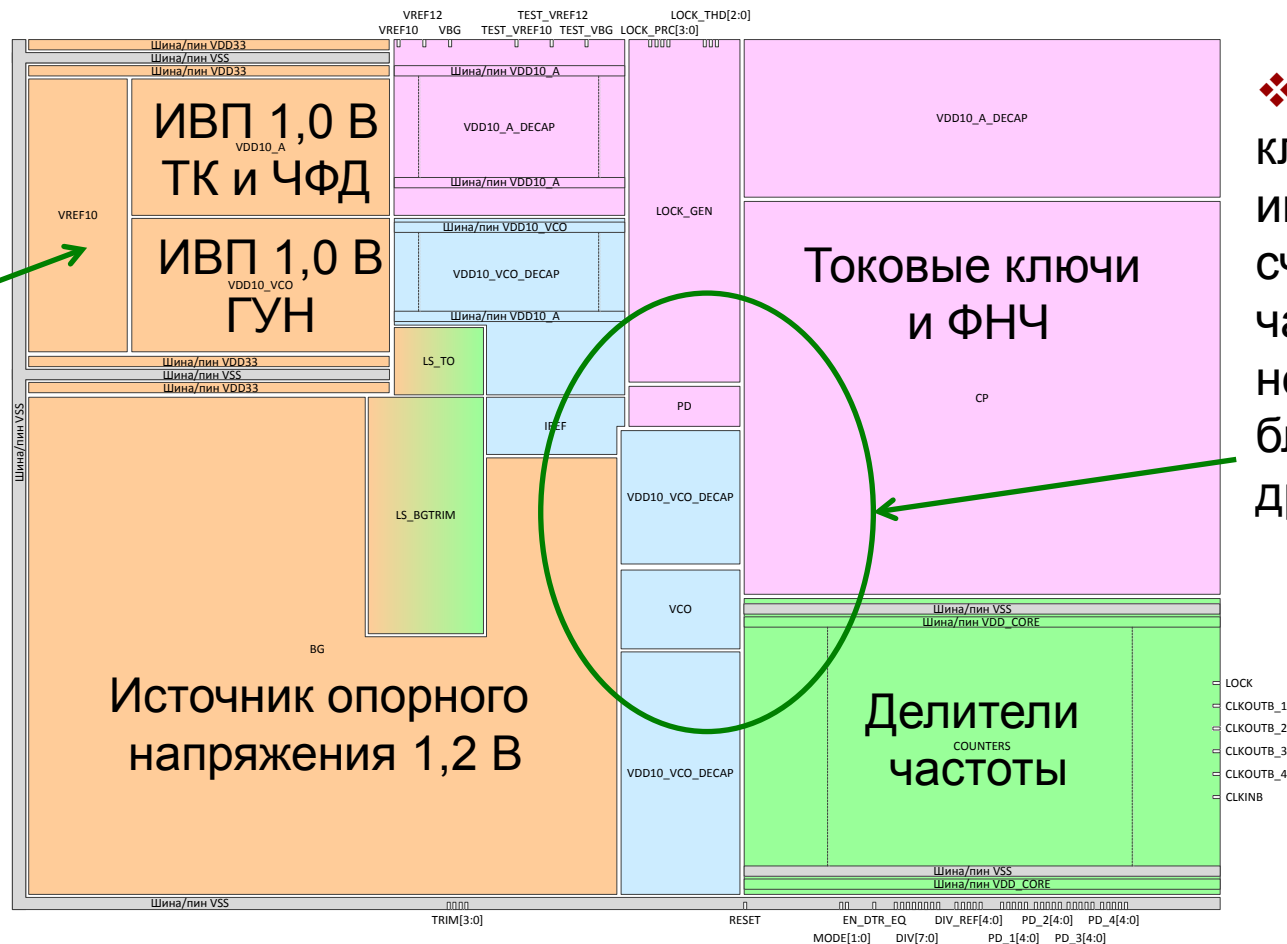


Параметры разработанного СЧ

- ❖ Технологический процесс – объемный КМОП 65 нм
- ❖ Назначение – генератор тактовых сигналов для цифровых СнК, предназначенных для эксплуатации в условиях воздействия радиации
- ❖ Входная частота – до 500 МГц
- ❖ Выходная частота – до 1600 МГц
- ❖ Делители частоты с целочисленными коэффициентами деления и инкрементом 1:
 - входной – до 32
 - в цепи обратной связи – до 256
 - выходной - до 64
- ❖ Время захвата частоты – не более 30 мкс
- ❖ Дрожание фазы – не более 50 пс
- ❖ Источники питания – 3,3 В; 1,0 В
- ❖ Размеры топологии: ширина – 278,16 мкм; высота – 200,4 мкм

Планировка топологии СЧ

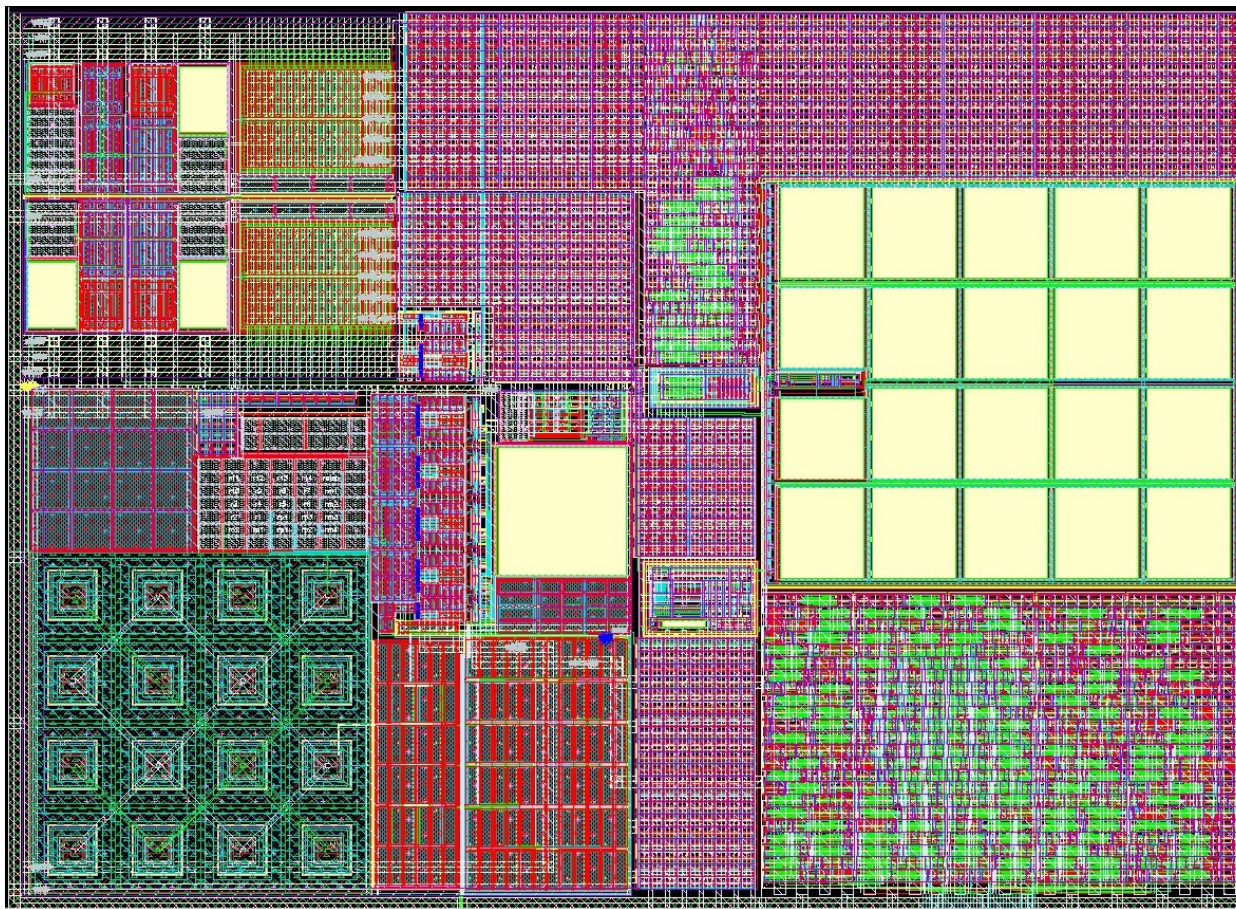
Источник опорного
напряжения 1,0 В



❖ ГУН, ЧФД, токовые ключи и интерфейсные части счетчиков-делителей частоты находятся в непосредственной близости друг от друга.

- VDD3V3 - внешнее питание 3,3 В
- VDD_CORE - внешнее питание 1,0 В для счетчиков-делителей частоты
- VDD10VCO - вторичное питание 1,0 В для ГУН
- VDD10_A - вторичное питание 1,0 В для ЧФД и токовых ключей

Топология СФ-блока СЧ



- ❖ Ширина – 278,16 мкм; высота – 200,4 мкм
- ❖ Площадь – 55743,264 мкм²
- ❖ Количество слоев металлизации - 4

Заключение

- ❖ В качестве ГУН радиационно-стойких СЧ целесообразно применять самовосстанавливающиеся генераторы, такие как релаксационные и LC-генераторы. Применение кольцевых генераторов в качестве ГУН радиационно-стойких СЧ нецелесообразно из-за эффекта накопления одиночных сбоев.
- ❖ Последовательностные элементы схем целесообразно выполнять на основе DICE-триггеров.
- ❖ Комбинационные элементы схем целесообразно выполнять на основе двухфазной логики, в первую очередь, цепи сброса триггеров частотно-фазового детектора.
- ❖ На основе данных рекомендаций разработан СФ-блок синтезатора частоты для применения в качестве генератора тактовых сигналов в СнК, предназначенных для эксплуатации в условиях радиационных воздействий.
- ❖ В качестве дальнейшего развития данной разработки планируется реализация частотно-фазового детектора с двухфазными выходами и увеличение коэффициента подавления шумов по питанию релаксационного генератора.

Спасибо за внимание!

ООО Альфачип
124498, Москва, Зеленоград,
пл. Шокина, д. 1, стр. 8.
Технический директор
Переверзев Л.Е.
leonidp@alphachip.ru