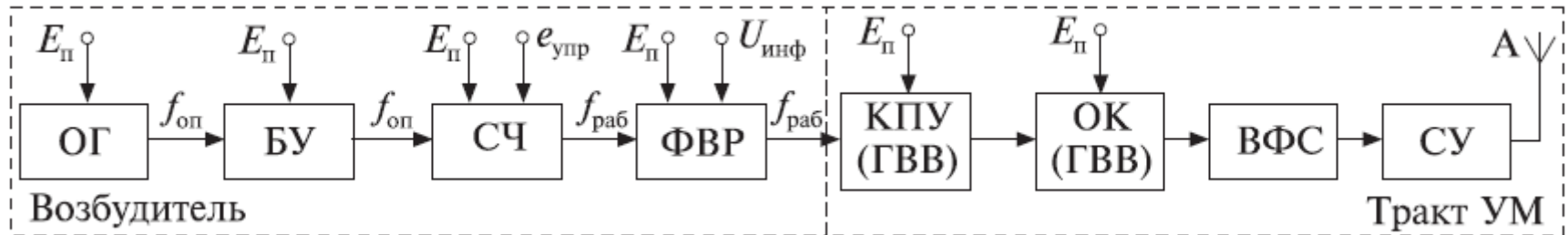


Лекция 7. Синтезаторы частот

Место СЧ в структуре РПДУ



Одним из основных элементов современного радиопередатчика является синтезатор частот, вырабатывающий одно или множество когерентных колебаний (сетку рабочих частот) с заданными частотами

Технические требования к тракту синтеза частот. Тракт синтеза частот радиопередатчика характеризуется следующими основными параметрами: диапазоном рабочих частот выходного колебания, характером изменения рабочей частоты (плавный или дискретный); общим числом фиксированных частот или шагом сетки частот; нестабильностью частоты и фазы; уровнем побочных спектральных составляющих в выходном колебании; инерционностью перестройки частоты; выходным напряжением на заданном сопротивлении нагрузки.

А также эксплуатационные хар-ки: потребляемая мощность, диапазон рабочих температур, интерфейс управления

Спектральные х-ки СЧ. Кратковременная нестабильность частоты

Радиосигнал на выходе синтезатора частот в общем случае

$$u(t) = U(t) \cos(\omega_0(t) + \varphi(t)) = [U_0 + \Delta U(t)] \cos \psi(t),$$

Мгновенная частота колебаний $\omega t = \psi/dt = \omega_0 + \Delta\omega(t)$,

Интенсивность отклонения частоты характеризуется дисперсией $\Delta\omega(t)$:

$$\sigma_\omega^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_\omega(\omega) d\omega,$$

где $S_\omega(\omega)$ — энергетический спектр флуктуаций частоты.

Интенсивность фазовых флуктуаций определяется дисперсией $\varphi(t)$:

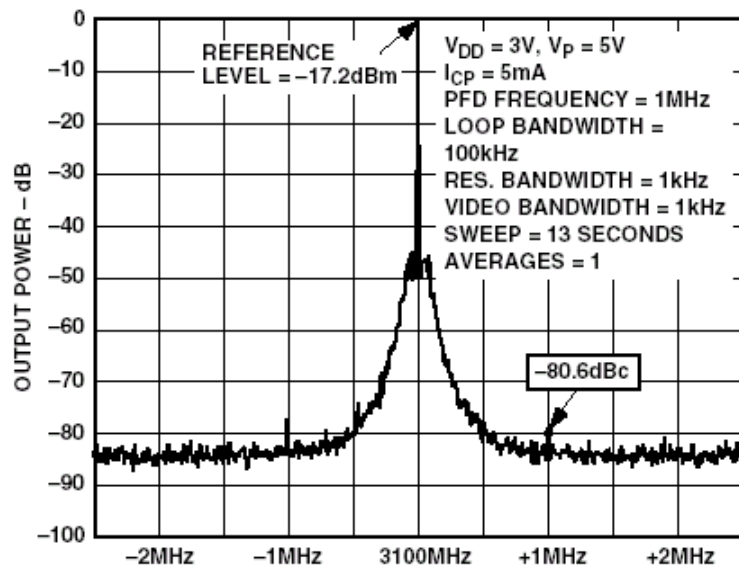
$$\sigma_\varphi^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_\varphi(\omega) d\omega,$$

где $S_\varphi(\omega)$ — энергетический спектр флуктуаций фазы, $S_\omega(\omega) = \omega^2 S_\varphi(\omega)$.

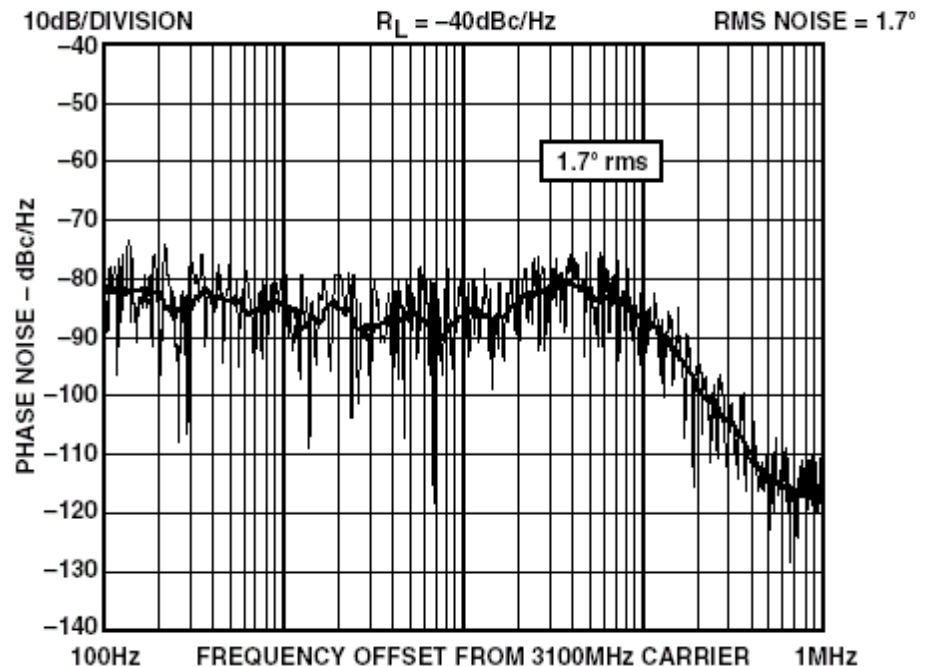
$S_\varphi(\omega)$ не убывает при $\omega \rightarrow \infty$ и неограниченно нарастает при $\omega \rightarrow 0$ интеграл расходится. **Реально интегрируют в полосе частот канала связи**

$$\tilde{\sigma}_\omega^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_H}^{\omega_B} S_\omega(\omega) d\omega; \quad \tilde{\sigma}_\varphi^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_H}^{\omega_B} S_\varphi(\omega) d\omega.$$

Типичные спектры фазовых шумов СЧ СМС



ADF4113 Reference Spurs (3100 MHz, 1 MHz, 100 kHz)



ADF4113 Integrated Phase Noise (3100 MHz, 1 MHz, 100 kHz)

Уровень побочных спектральных составляющих выходного колебания синтезатора частот, лежащих в заданной полосе частот, определяется соотношением:

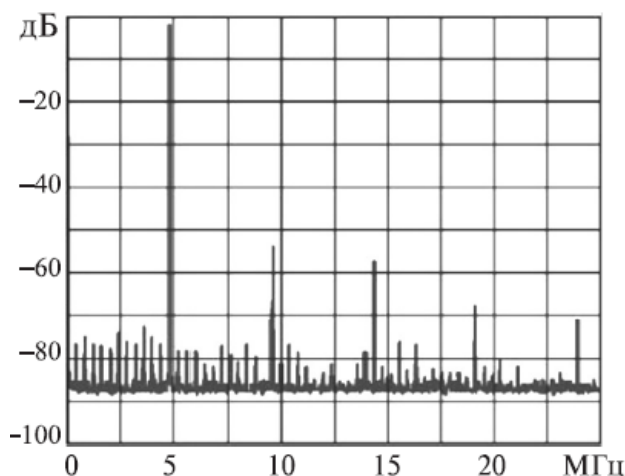
$$D = 20 \lg(U_{\text{пэф}}/U_{\text{эф}}),$$

где $U_{\text{пэф}}$ — эффективное значение суммарного напряжения побочных составляющих (дискретных и шумовых), лежащих в заданной полосе частот; $U_{\text{эф}}$ —

Уровень дискретных побочных составляющих выходного колебания синтезатора определяется соотношением

$$D_{\text{д}} = 20 \lg(U_{\text{эфд}}/U_{\text{эф}}),$$

где $U_{\text{эфд}}$ — эффективное значение суммарного напряжения всех дискретных побочных составляющих этого колебания.



Важным параметром синтезатора частот является время установки его частоты (инерционность перестройки).

Спектр выходного сигнала синтезатора AD9834

Под временем установки частоты понимается время между моментом окончания команды перестройки и моментом, после которого отклонение частоты колебаний на выходе возбуждителя от установившегося значения становится меньше **заданного** допустимого паразитного отклонения частоты.

Классификация синтезаторов частот.

Синтезаторы частот, построенные на основе прямого аналогового синтеза. В таких синтезаторах выходные колебания получаются с помощью операций сложения, вычитания, умножения и деления частоты высокостабильного опорного генератора.

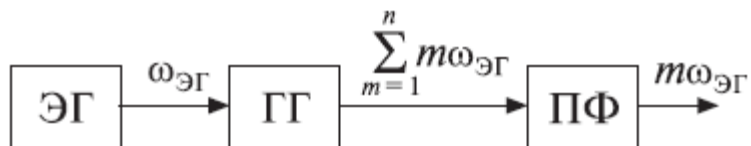
Синтезаторы частот, построенные на основе косвенного синтеза.

В основе таких синтезаторов лежат системы автоматической (чаще всего фазовой) подстройки частоты ФАПЧ (в зарубежной литературе PLL: phase locked loop), которые могут строиться как на элементах аналоговой, так и на элементах цифровой схемотехники.

Синтезаторы частот, построенные на основе прямого цифрового синтеза ПЦС (в зарубежной литературе DDS: direct digital synthesizers). В отечественной литературе эту разновидность синтезаторов часто называют также ЦВС: цифровой вычислительный синтезатор. Такие синтезаторы строятся на основе вычислений дискретных отсчетов выходного колебания в микропроцессорном устройстве с последующим цифроаналоговым преобразованием.

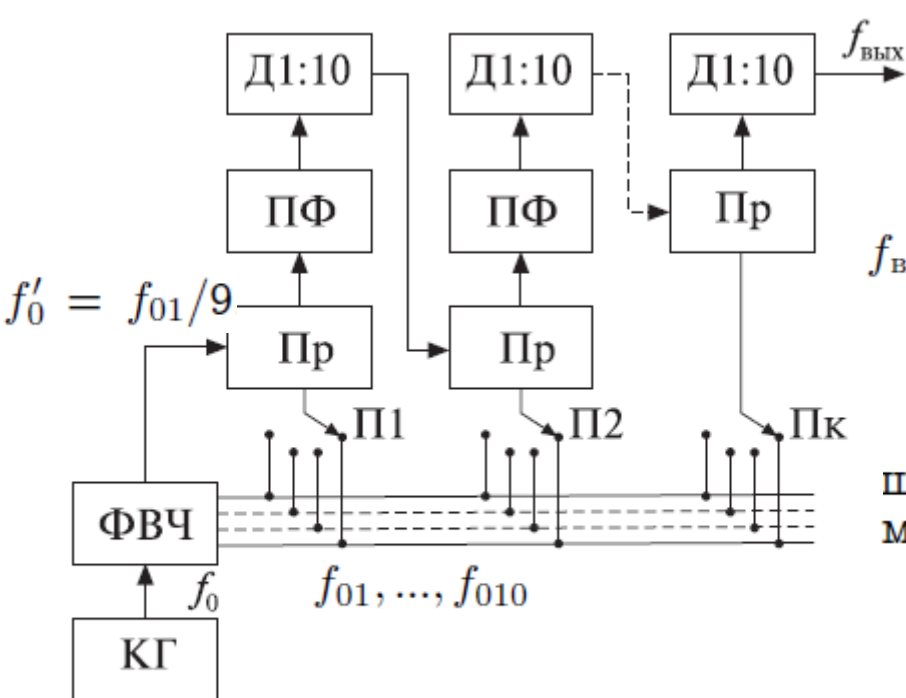
Также существуют синтезаторы частот, построенные путем комбинации двух или трех вышеперечисленных методов синтеза. Такие синтезаторы часто называют *гибридными*.

Синтезаторы частот, построенные на основе прямого аналогового синтеза.



Простейший синтезатор частот

При большом числе рабочих частот указанный ПФ необходимо перестраивать в широких пределах, что на практике оказывается затруднительным.



$f'_0 = f_{01}/9$. Опорные частоты f_{01}, \dots, f_{010} связаны соотношением $f_{\text{оп}} = f_{01} + (n-1)\Delta f$, где $n = 1, \dots, 10$; Δf — шаг

$$f_{\text{BIX}} = 10f'_{01} + \Delta f(n_k + n_{k-1}/10 + \dots n_1/10^{k-1}),$$

перестройка ПФ не требуется

Все K декад идентичны

шаг полученной сетки частот в $10^{(K-1)}$ раз
мельче интервала Δf

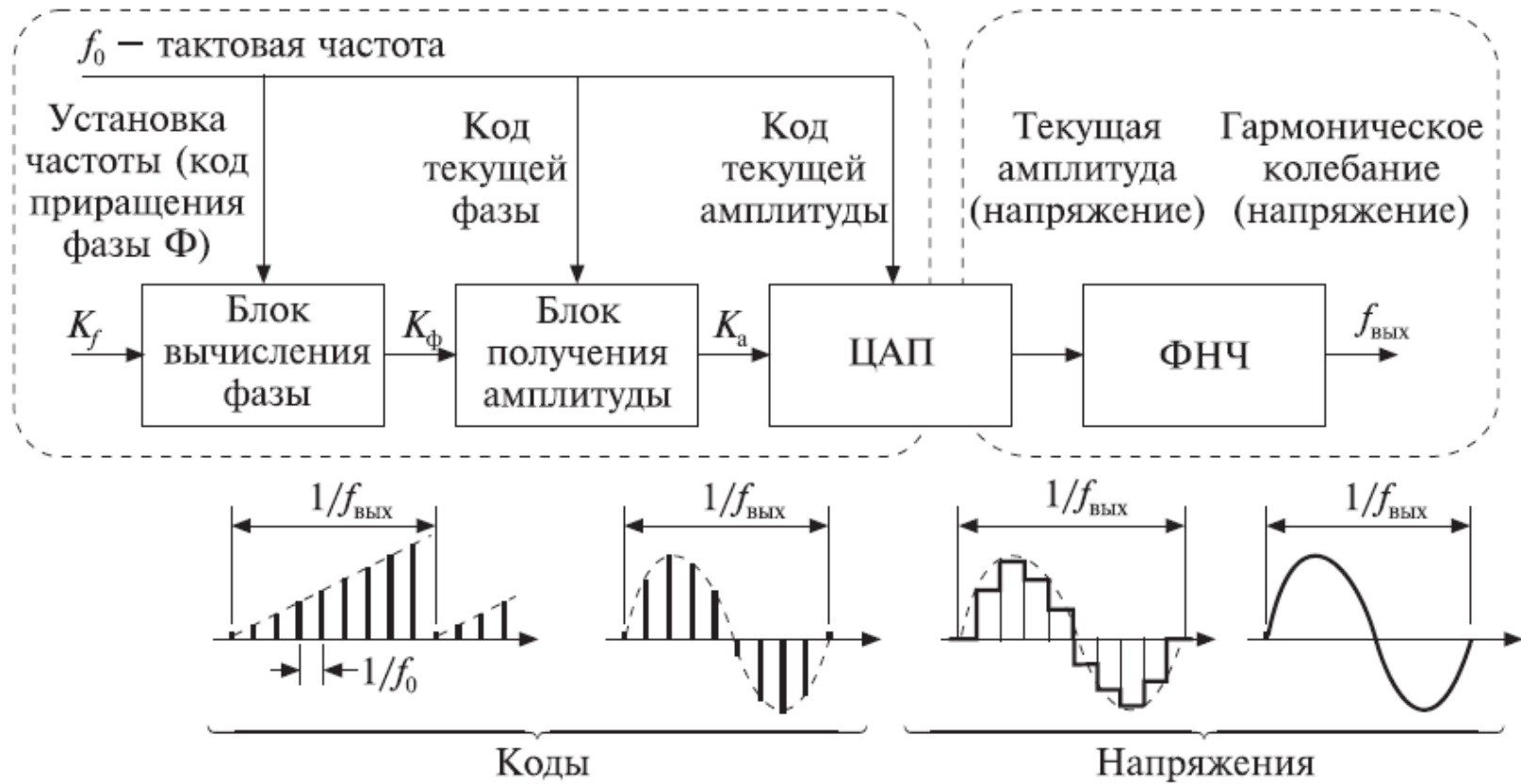
Схема синтезатора частот с идентичными декадами

Из-за Пр частот плохой спектр.

Невозможна микроминиатюризация

Синтезаторы частот, построенные на основе прямого цифрового синтеза ПЦС (DDS) (ЦВС)

устройство, в котором с частотой дискретизации периодически цифровыми методами генерируются отсчеты (коды) амплитуды выходного сигнала.



Функционирование прямого цифрового синтезатора ПЦС

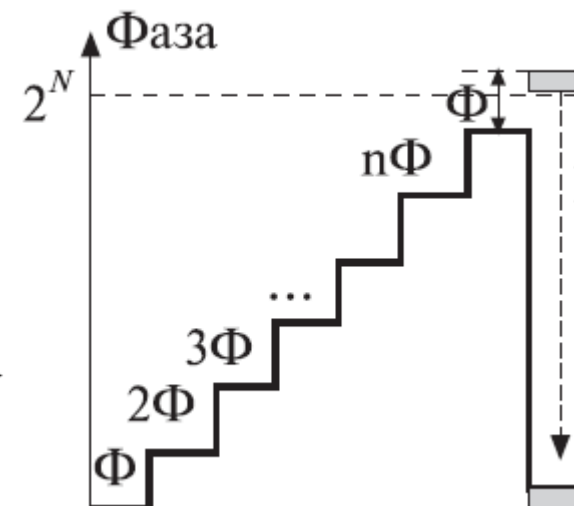
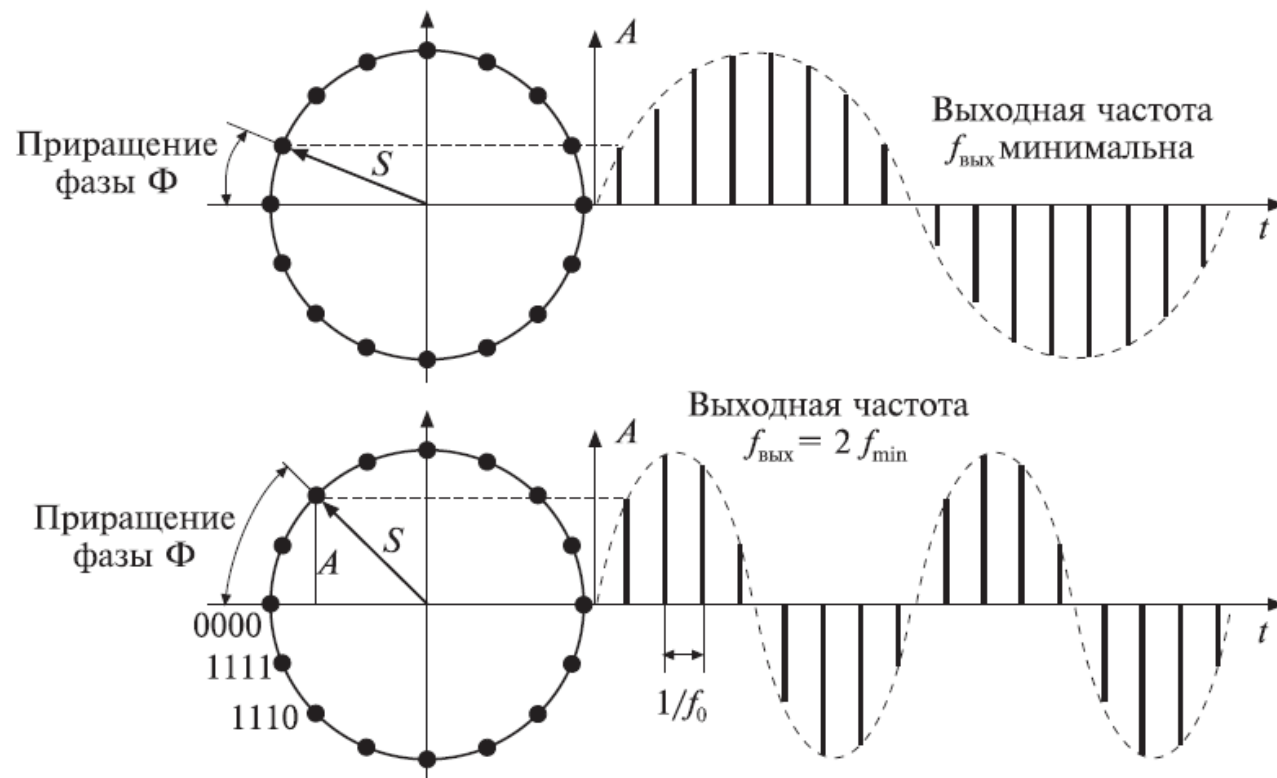
- Максимальная достижимая выходная частота ПЦС определяется частотой тактирования цифрового аккумулятора фазы и быстродействием функционального преобразователя кодов ПФА. А также ЦАП
- Шаг выходной частоты, который может быть сколь угодно малым, определяет разрядность кода цифрового аккумулятора фазы.



может быть получен очень малый шаг по частоте в доли герц, они технологичны — реализуются в виде специализированных ИС.

Такие синтезаторы позволяют формировать многочастотные сигналы в очень широкой полосе рабочих частот, в них могут быть сформированы сигналы с очень сложными схемами модуляции, обладающие малыми амплитудными и фазовыми погрешностями, т. е. очень высоким качеством.

Основными недостатками устройств прямого цифрового синтеза являются достаточно высокий уровень паразитных спектральных составляющих, обусловленный методами формирования выходного сигнала, и диапазон выходных частот, недостаточно высокий для применения в радиооборудовании диапазона СВЧ. **Высокое энергопотребление**

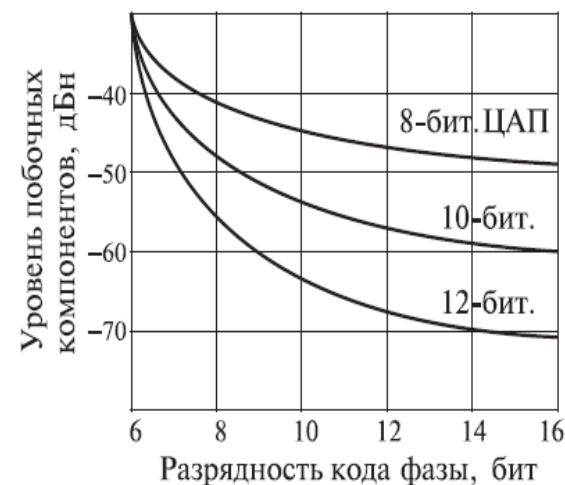


Процесс вычисления отсчетов гармонического колебания для разных частот

$$f_{\text{вых}} = (K_f / 2^N) f_0.$$

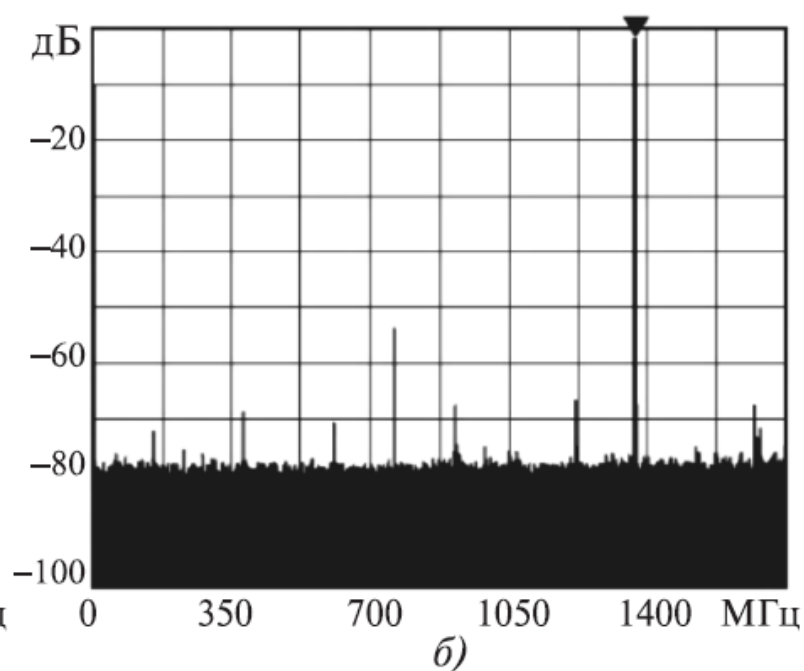
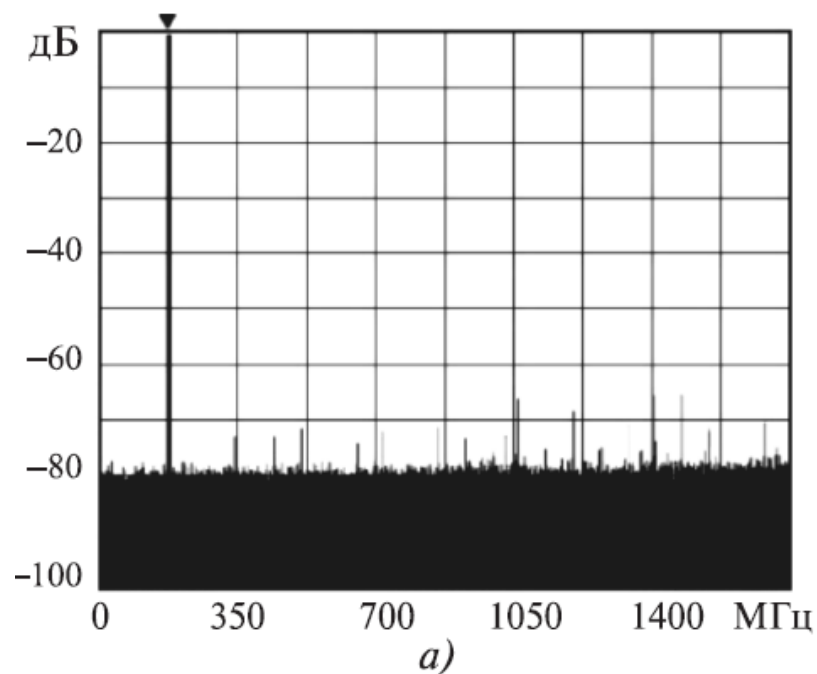
с шагом, равным коду частоты K_f

N может достигать 16, 32 бит. Тогда мин. шаг – доли Гц



Квантование амплитуды до 10...16 битов.

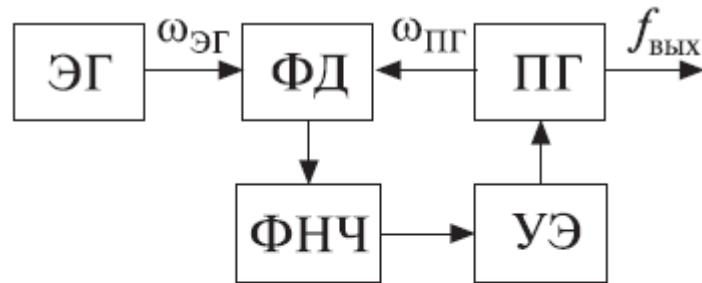
чаще всего быстродействующие ЦАП не выше 12 бит



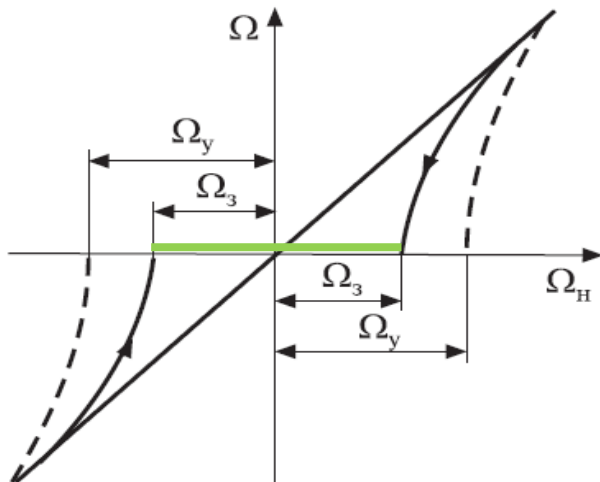
Спектр выходного сигнала синтезатора AD9914 при частоте тактирования 3,5 ГГц и выходных частотах 171,5 МГц (а) и 1396,5 МГц (б)

Синтезаторы частот, построенные на основе косвенного синтеза.

Синтезаторы, построенные на основе метода косвенного синтеза, содержат в своем составе подстраиваемый по частоте автогенератор, охваченный петлей автоподстройки частоты (АПЧ), на вход которой поступает колебание от эталонного генератора (ЭГ).



Структурная
схема системы фазовой
автоподстройки частоты



Системы ФАПЧ

несколько основных режимов работы
удержания (или режим синхронизма);
квазисинхронизма; захвата и биений

понятие *полосы удержания*.

Под *полосой захвата* понимается область начальных расстройек ПГ и ЭГ. в которой при любых начальных условиях устанавливается режим удержания

Ω - частота биений = 0 в **реж. синхронизма**

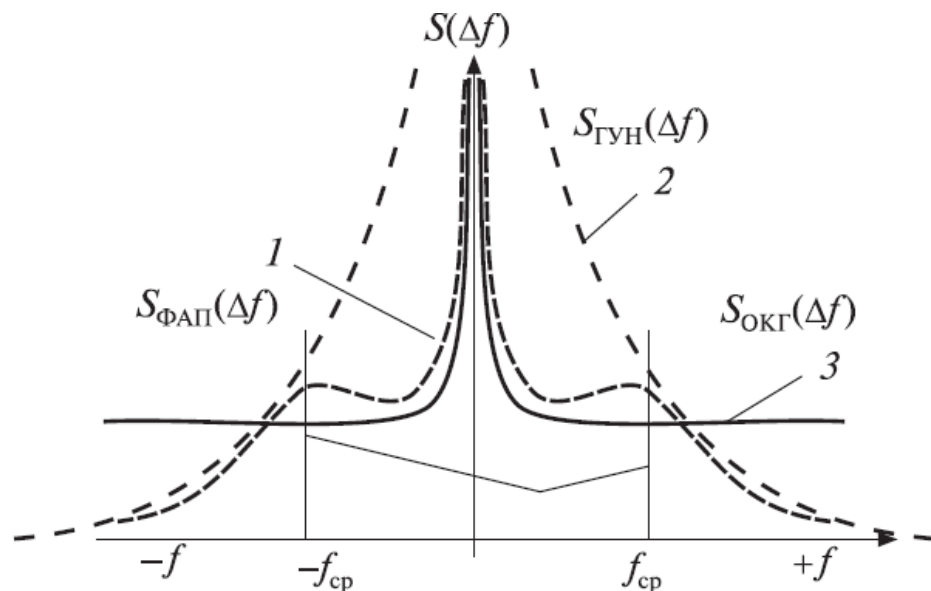
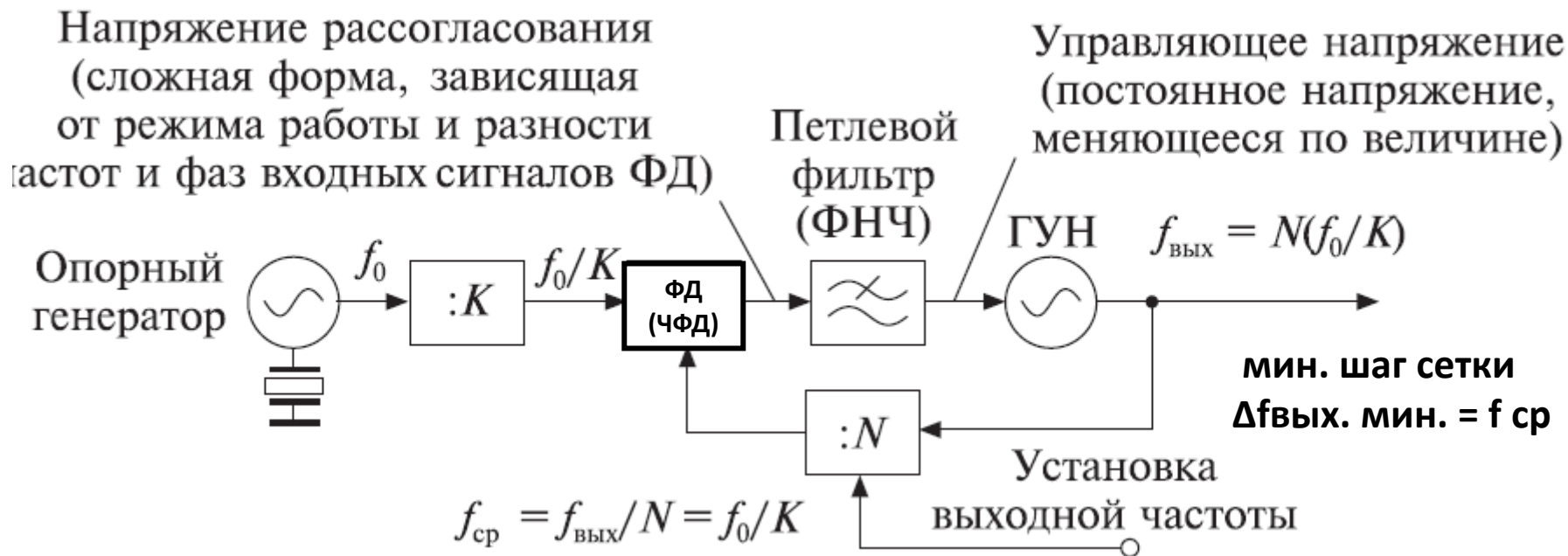
Только при $K_{фнч} = 1$ (нет ФНЧ) $\Omega_z = \Omega_y$.

Системы ЧАПЧ

Нет проблем захвата

$\Omega = \Omega_H / K_{п} \neq 0$ **Никогда!** Но $\rightarrow 0$, при $K_{п} \rightarrow \infty$

СЧ на основе ИФАПЧ с цифровыми делителями частоты



Типовые спектры фазовых шумов

Спектр ОКГ и ФД (ЧФД) приведён к выходу (подъём на $20 \lg N$)

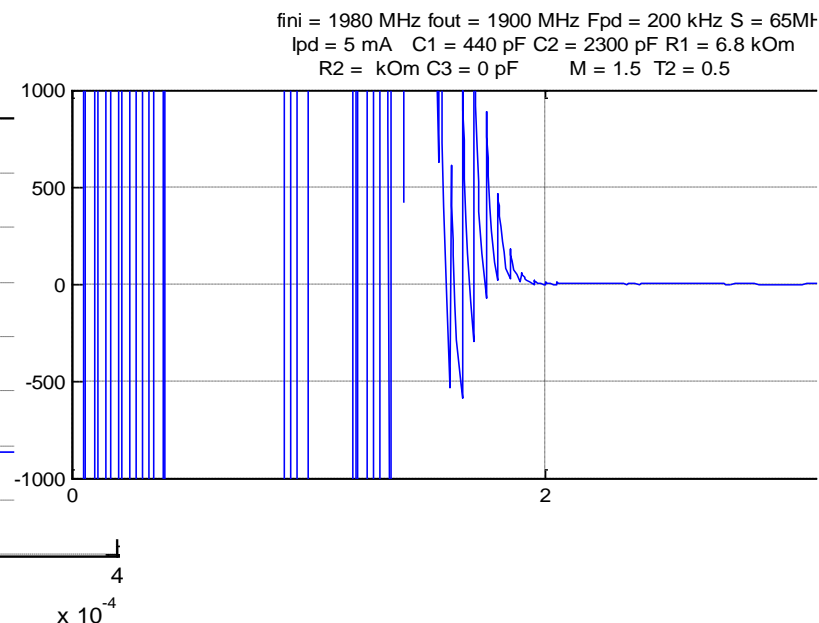
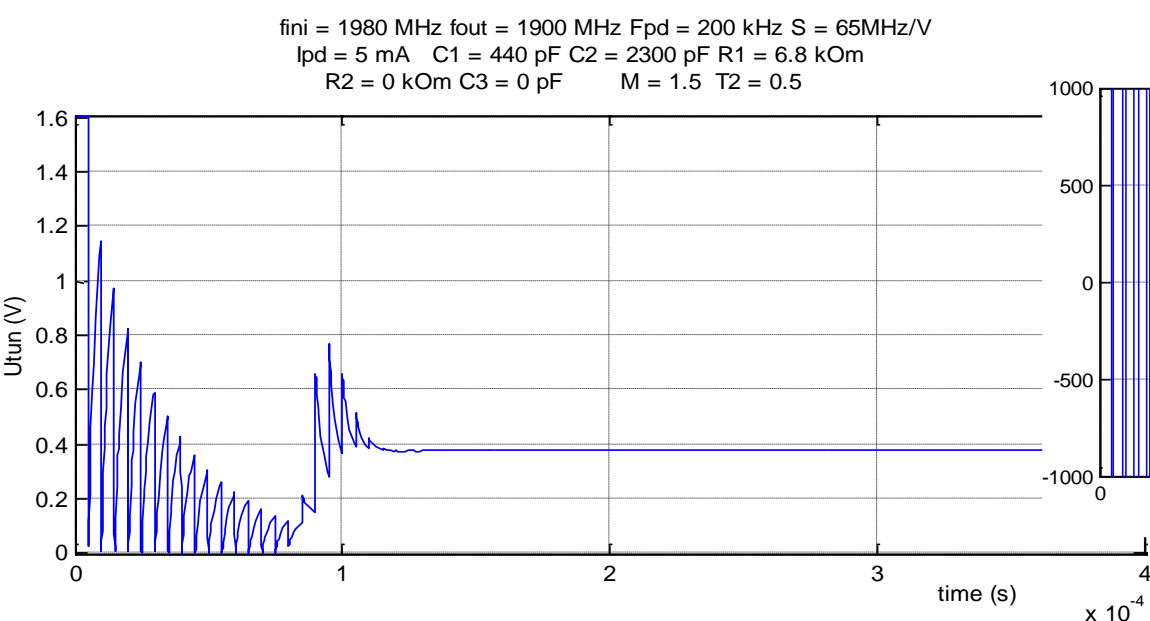
ИФАПЧ подавляет шумы ГУН при $\Delta f < f_{\text{ср}}/2$. **Теорема Котельникова!**
ИФАПЧ - импульсный следящий фильтр

+

Максимально достижимые выходные частоты (до десятков ГГц и выше. даже в оптике) при самом низком энергопотреблении и массогабаритных показателях. Наилучшие спектральные характеристики (по сравнению с прямым синтезом) особенно при больших отстройках. Удобство реализации в виде ИМС.

-

Время переключения частот существенно зависит от шага сетки частот **$\Delta f_{\text{вых. мин}} = f_{\text{ср}}$** . Т.к. все процессы в ИФАПЧ пропорциональны периоду следования выборок **$T_p = 1/f_{\text{ср}}$** , а также от инерционности системы (ФНЧ + ГУН – аналоговые инерционные элементы). Это принципиально для СМС с TDD (GSM, UMTS и т.п.)



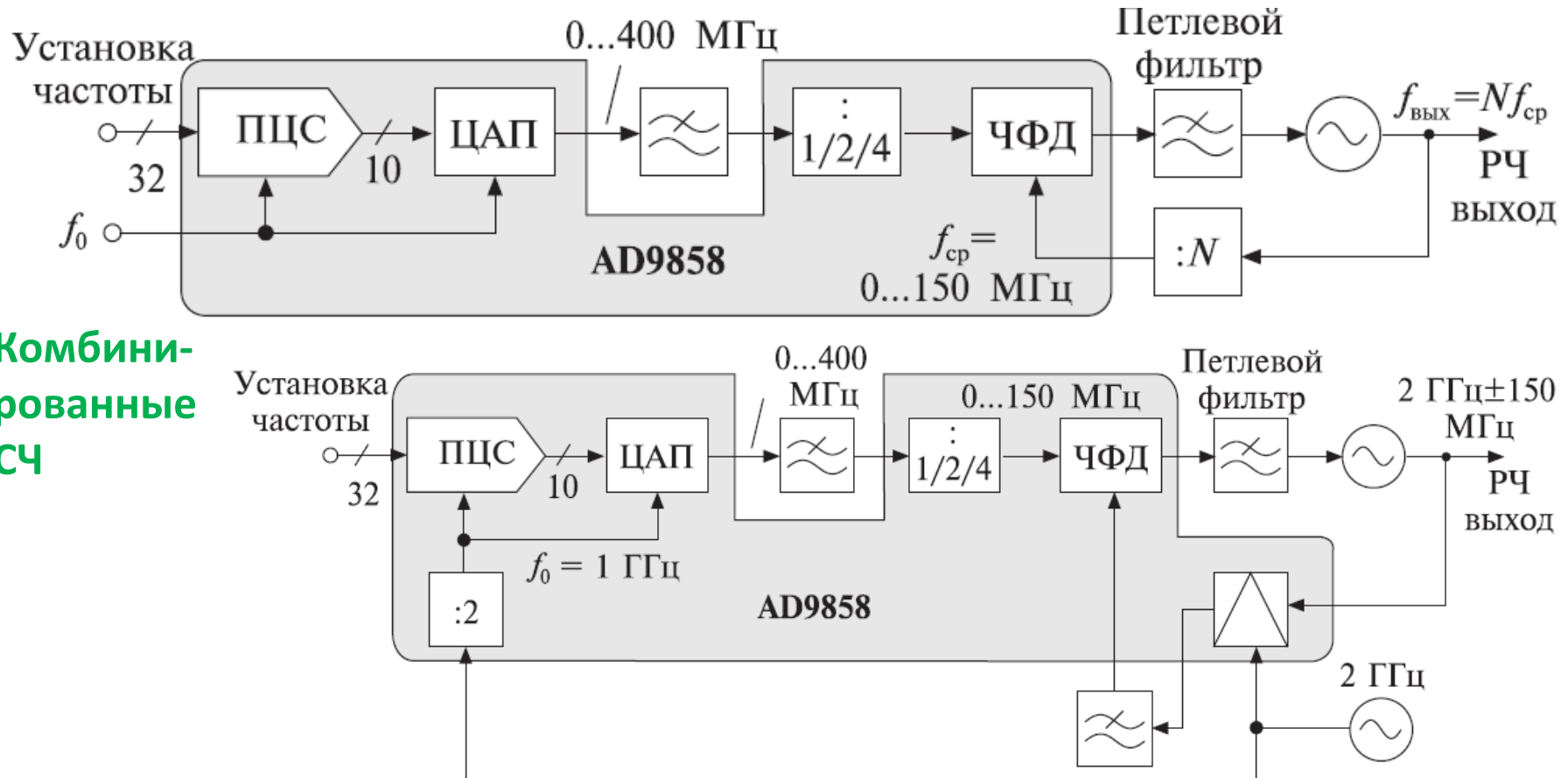
Переходные процессы в СЧ для GSM. Компьютерное моделирование каф. РОС

Для разрешения противоречия используют СЧ на основе **ИФАПЧ с ДДПКД** или комбинированные структуры (косвенный + прямой цифровой метод).

Вариантов множество!

В СЧ на основе **ИФАПЧ с ДДПКД** реализуется $\Delta f_{\text{вых. мин}} \ll f_{\text{ср}}$, резко повышается быстродействие и фильтрация шумов в ближней зоне. Но заметно растут шумы «дробности» в дальней зоне спектра вых. сигнала. Повышают порядок и инерционность ФНЧ, что опять ухудшает быстродействие.

Компромисс!



**Комбини-
рованные
СЧ**

