

**Гершенков Д.И., Никитин Ю.А**  
 Санкт-Петербургский государственный университет  
 телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

## Прецизионный опорный генератор микроволнового диапазона на кольце ИФАП

*В данной работе представлен инженерный расчёт синтезатора частот микроволнового диапазона на кольцах импульсно-фазовой автоподстройки частоты с применением различных трактов приведения. В сравнении традиционному делителю частоты в тракте приведения сопоставлен тракт дробным нониусом. Тракт с дробным нониусом в кольце ИФАП позволяет получить меньший уровень побочных спектральных шумов при прочих равных условиях.*

**Ключевые слова:** Опорное колебание, ФАП, ИФАП, СВЧ Диапазон, дробный нониус.

В современной радиотехнике существует проблема получения прецизионного колебания с минимальным уровнем побочных шумовых составляющих. Для решения этой проблемы применяют кольца фазовой автоподстройки частоты (ФАП). Типовое кольцо ФАП представлено на рисунке 1.

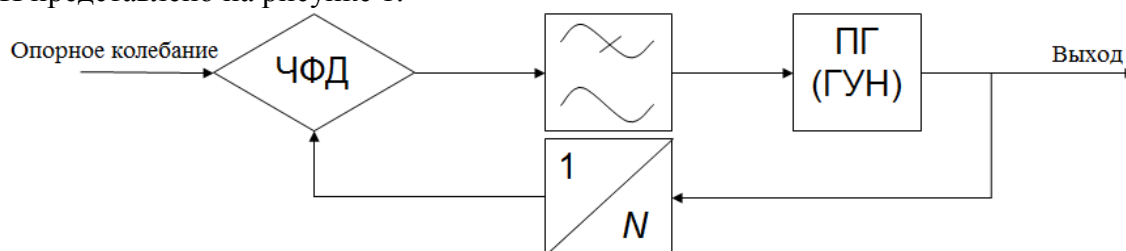


Рис. 1. Кольцо ФАП.

Кольцо может быть реализовано на элементах булевой логики. Для этого ЧФД можно представить в виде двух RS-триггеров, управляющих схемой подкачки заряда (charge pump); делитель частоты — счётчиком импульсов. В данном случае регулирование будет производиться в импульсном режиме, следовательно, кольцо в таком исполнении имеет название ИФАП.

К недостаткам умножающего кольца ИФАП следует отнести умножение помех, приходящих с опорным колебанием, попадающим в полосу прозрачности кольца ( $f_{\text{ИФАП}}$ ) в  $N$  раз, где  $N$  — коэффициент деления кольца (см. рис. 2). Данный недостаток негативно влияет на спектр выходного колебания.

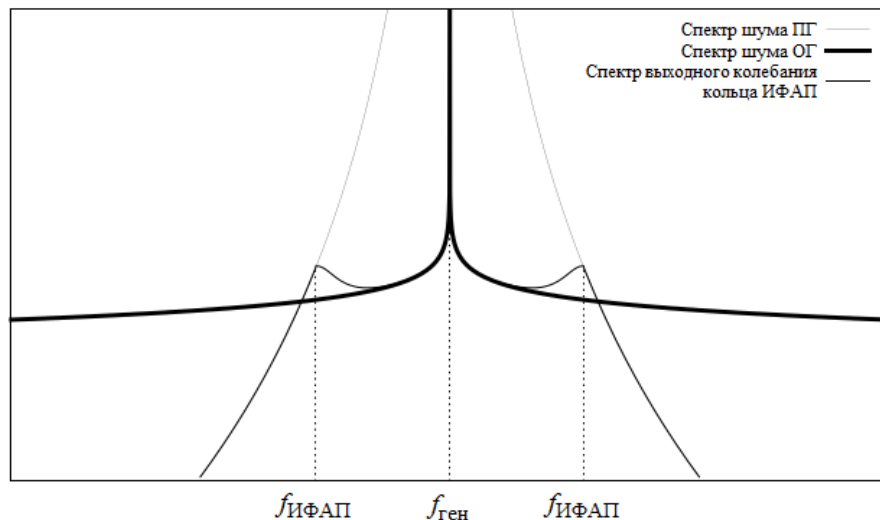


Рис. 2. Умножение кольцом ИФАП побочных спектральных составляющих ОГ.

Для борьбы с данным недостатком целесообразно ввести дробный нониусный тракт приведения (ТП) частоты [1,2], как это продемонстрировано на рисунке 3.

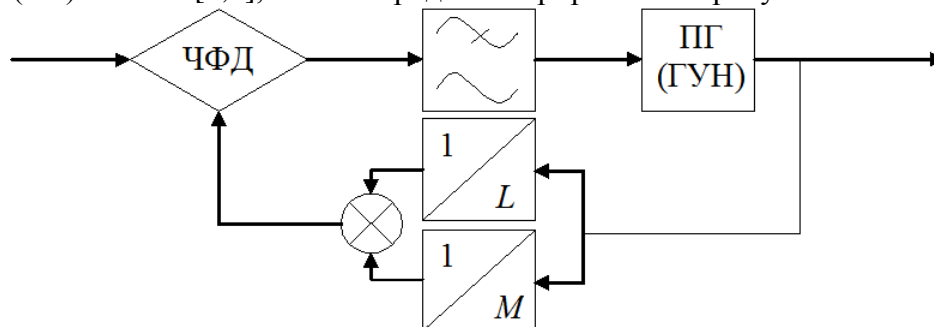


Рис. 3. Кольцо ИФАП с дробным нониусом в тракте приведения частоты.

Произведём расчет умножающих колец ИФАП для двух случаев [3]. Зафиксируем частоту выходного колебания — 1 ГГц, частота сравнения 5 МГц.

Перед началом расчета колец ИФАП произведён выбор компонентной базы. В качестве генератора опорного колебания применен ГК54-ТС-5М с выходной частотой 5 МГц. В данном случае тракт приведения должен обеспечить коэффициент деления частоты:

$$N = \frac{1000 \text{ МГц}}{5 \text{ МГц}} = 200$$

Для этого случая коэффициенты деления дробного нониусного ТП подобраны следующие —  $L = 8$  и  $M = 8\frac{1}{3}$ , в результате будет получен эквивалентный коэффициент деления:

$$N_{\text{экв}} = \frac{1}{\frac{1}{8} - \frac{1}{8\frac{1}{3}}} = \frac{1}{\frac{3}{24} - \frac{3}{25}} = 200$$

Эквивалентный коэффициент деления  $N_{\text{экв}}$  в данном случае остаётся прежним, но уровень шумов в «окне прозрачности» кольца поднимется всего в 9 раз. Цифра 9 получается при искусственном создании дробности ( $8\frac{1}{3}$ ) управляемым делителем частоты коэффициентами деления 8 и 9.

В роли частотно-фазового детектора и делителя частоты можно применить интегральную микросхему синтезатора *ADF4153*[4]. Для дробного нониусного ТП так же потребуются два дополнительных делителя *MC12026A* с управляемым коэффициентом деления. ПГ в данных кольцах — *ROS-1000C* с диапазоном перестройки частот 985,2 МГц — 1012,4 МГц ( $\Delta f_{ПГ} = 27,2$  МГц) под действием управляющего напряжения от 0 до 5 В.

Следующим шагом вычисляем наибольшее значение приведенной к частоте сравнения полосы перестройки ПГ:  $K_{ПГ} = \Delta f_{ПГ}/N = 136$  кГц — в случае делителя частоты и  $K_{ПГн} = \Delta f_{ПГ}/L = 3,4$  МГц в случае нониусного ТП.

ПГ в кольце ИФАП выполняет роль интегратора и коэффициент передачи  $K_{ПГ}/(j\omega)$ . Произведём расчёт частоты единичного усиления ПГ с учётом коэффициента передачи ЧФД в кольце без нониуса:  $f_{1Г} = \Delta f_{ПГ} / 2\pi N = 22$  кГц; с нониусом:  $f_{1Гн} = \Delta f_{ПГ} / 2\pi L = 541$  кГц.

Определение желаемой частоты единичного усиления кольца ( $f_{ИФАП}$ ) производим по графику уровня шумов ПГ и приведённых уровней шумов ОГ при двух разных конструкциях ТП (см. рис. 4). Как следует из графика,  $f_{ИФАП} = 2,1$  кГц;  $f_{ИФАПн} = 47,2$  кГц. Для подавления всплеска побочных спектральных составляющих на границах окна прозрачности и повышения удобства расчётов можно принять данные частоты на величинах  $f_{ИФАП} = 3$  кГц;  $f_{ИФАПн} = 50$  кГц.

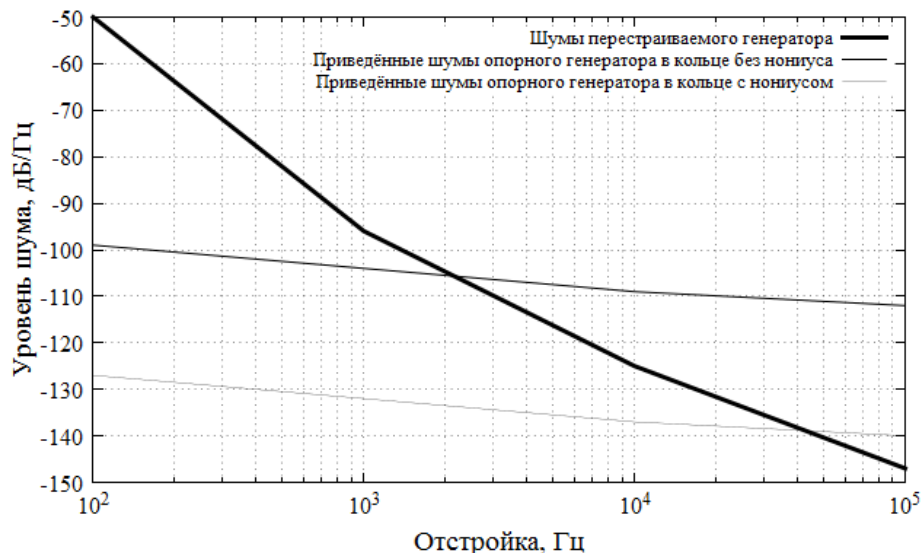


Рис. 4: сравнение уровня шумов генераторов.

Кольцо ИФАП с ЧФД является системой автоматического регулирования с (квази)астизмом по фазе, поэтому требуется обеспечить устойчивость замкнутого кольца и низкую колебательность переходного процесса при включении. С этой целью в окрестностях точки пересечения графика коэффициента передачи разомкнутого кольца ( $f_{ИФАП}$ ) с осью абсцисс наклон характеристики должен составлять  $-20$  дБ/дек, что достигается добавлением изодромного звена. Так как наклон должен составлять  $-20$  децибелл на декаду, несложно найти частоту излома характеристики изодромного звена  $f_i$ , она отстоит на декаду от  $f_{ИФАП} = 3$  кГц, т. е. излом должен происходить на частоте  $0,3$  кГц для кольца с делителем частоты;  $f_{ин} = 5$  кГц для кольца с нониусным ТП.

Так как наклон должен составлять  $-20$  децибелл на декаду, несложно найти частоту излома характеристики изодромного звена  $f_i$ , она отстоит на декаду от  $f_{ИФАП} = 3$  кГц, т. е. излом должен происходить на частоте  $0,3$  кГц, или  $f_{ин} = 5$  кГц.

Поскольку известны частоты  $f_i$  и  $f_{ИФАП}$ , можно найти точку пересечения графика характеристики кольца ИФАП без компенсирующего звена с осью абсцисс (см. рис. 5). Эта

точка находится по середине между  $f_{и}$  и  $f_{иФАП}$ , следовательно, её положение — среднее пропорциональное этих двух точек:  $f_{(2)} = \sqrt{f_{и} \cdot f_{иФАП}} \approx 0,95 \text{ кГц}$ ;  $f_{(2)н} = 15,8 \text{ кГц}$ .

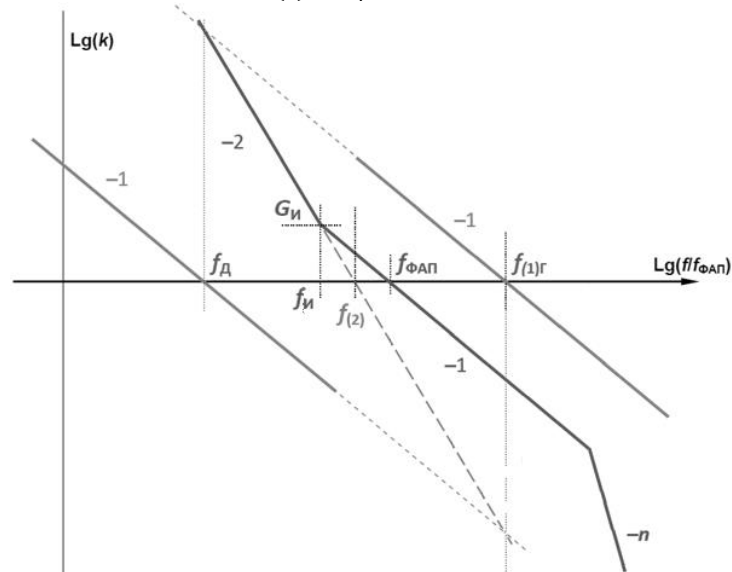


Рис. 5. Обеспечение стабильности кольца ИФАП.

Следующий шаг - расчёт частоты работы ЧФД.  $f_{д}$  и  $f_{(2)}$  одновременно находится и по середине между  $f_{1Г}$  и  $f_{д}$ , следовательно, частота может быть найдена так:  $f_{д} = f_{(2)}^2 / f_{(1)Г} = 41 \text{ Гц}$ ; аналогично,  $f_{дн} = 462 \text{ Гц}$ .

Если известна частота работы детектора, то можно найти ёмкость изодромного звена:

$$C_{и} = \frac{I_{д}}{2\pi E_{д} f_{д}}$$

Ток  $I_{д}$  и напряжение  $E_{д}$  на ИМС ADF4153 можно изменять, зададим следующие величины:  $I_{д} = 1,88 \text{ мА}$ ,  $E_{д} = 3,3 \text{ В}$ . Тогда, учитывая номиналы серийно выпускаемых конденсаторов,  $C_{и} = 2,2 \text{ мкФ}$ ;  $C_{ин} = 0,196 \text{ мкФ}$ .

Расчёт сопротивления в изодромном звене может быть выполнен по формуле:  $R_{и} = (2\pi f_{и} C_{и})^{-1}$ .  $R_{и} = 240 \text{ Ом}$ ;  $R_{ин} = 1,6 \text{ кОм}$ .

Для эффективного подавления частоты ОГ применим петлевой ФНЧ второго порядка. Гарантированное подавление частоты ОГ будет достигаться при подавлении частоты в два раза ниже, т.е. при подавлении частоты 2,5 МГц. При эквивалентном сопротивлении ЧФД  $R_{ф} = 1800 \text{ Ом}$ ,  $C_{ф} = 1/2\pi f R \approx 3,3 \text{ нФ}$ . Следующее звено фильтра можно посчитать из следующего соображения:  $R_{ф2} = 5R_{ф} = 9 \text{ кОм}$ ,  $C_{ф2} = 1/5 C_{ф} \approx 0,047 \text{ нФ}$ .

Пьедестал шумов кольца ИФАП может быть найден по формуле:

$$D_{ФАП} = \Phi_{БАЗ} + 10\lg F_c + 20\lg N,$$

где  $\Phi_{БАЗ}$  — фундаментальные шумы ИМС (для ADF4153: -220 дБн/Гц),  $F_c$  — частота сравнения в ЧФД: 5 МГц,  $N$  — мин. коэффициент деления (200 и 8). Подставив все числа в формулу, получаем значение -106 дБн/Гц для кольца с делителем частоты и -135 дБн/Гц для кольца с дробным нониусом в ТП.

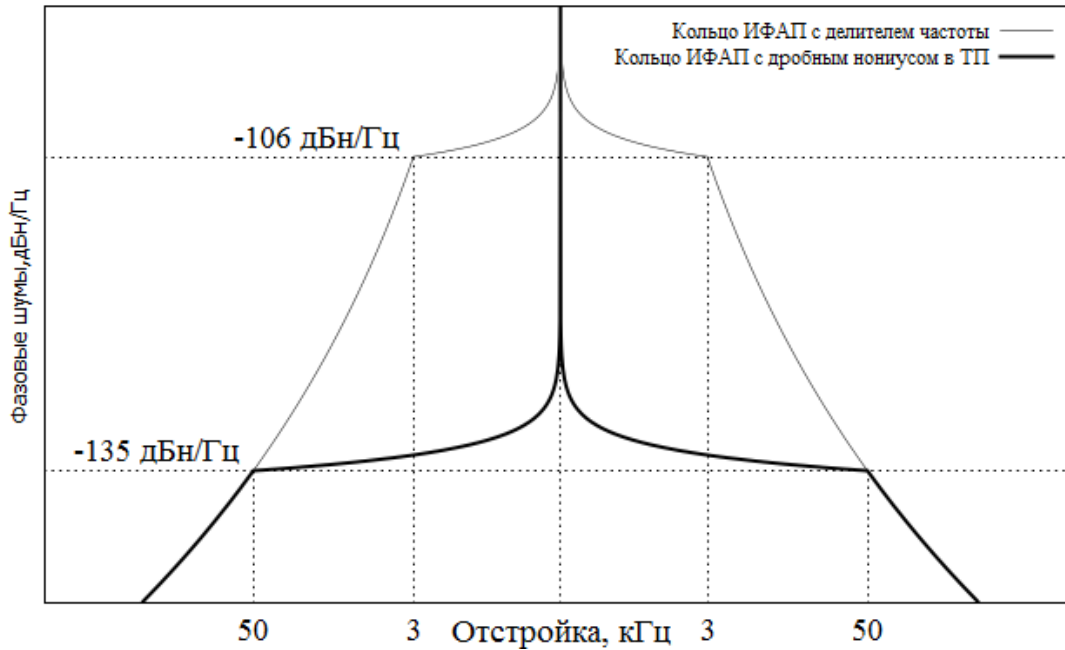


Рис. 6. Сравнение спектральных линий колец ИФАП

Следует заметить, что это предельно возможные результаты для колец ИФАП в данном исполнении, так как при расчёте не учитывался уровень технических шумов элементной базы.

#### Библиографический список

1. Никитин Ю. А. Построение тракта приведения активного синтезатора частот. // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 3 С. 19–26.
2. Sadowski B. A self-offset phase-locked loop // Microwave journal 2008 Vol. 51 №4 P. 116-124.
3. Никитин Ю. А. Схемотехника современных микроволновых синтезаторов частот. Часть 2: учебное пособие. Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2015.
4. ADF4153 Fractional-N Frequency Synthesizer: техническая спецификация [Электронный ресурс] // URL: [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4153.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4153.pdf)