

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХКОЛЬЦЕВОЙ СИСТЕМЫ ИФАПЧ С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ ВНУТРИ КОЛЬЦА

Рассмотрена двухкольцевая система фазовой автоподстройки частоты. Получены выражения для модели спектральной плотности мощности фазовых шумов такой системы. Приведены результаты моделирования шумовых характеристик двухкольцевой ИФАПЧ для выбранных параметров синтезируемых сигналов.

**Ключевые слова:** фазовые шумы, ФАПЧ, спектральная плотность мощности.

### Введение

Среди существующих методов получения сетки частот можно выделить [1 – 6]:

1) метод прямого цифрового или аналогового синтеза, основанный на преобразовании ряда опорных частот с последующим выделением нужной частоты при помощи фильтров;

2) метод активного косвенного синтеза, основанный на сравнении выходной частоты с некоторой стабильной частотой и последующей подстройкой выходной частоты по сигналу рассогласования при помощи кольца автоподстройки;

3) метод комбинированного синтеза, объединяющий в себе пассивные и активные методы синтеза.

Несомненным достоинством активного косвенного синтеза с использованием колец ИФАПЧ является возможность формирования сигналов в СВЧ диапазоне [1, 2, 4].

В [1] выделяется три основных направления построения систем синтеза СВЧ. Первое - использование отработанных и освоенных в производстве синтезаторов метровых волн с последующим умножением частоты выходного колебания в СВЧ диапазон. Однако при умножении частоты повышается уровень паразитных спектральных составляющих спектра. Вторым, широко распространенным направлением является перенос частоты синтезатора метровых или дециметровых волн в диапазон СВЧ путем суммирования частоты его выходных колебаний с колебаниями одного или нескольких высокостабильных СВЧ генераторов. К третьему направлению относится использование СВЧ генератора, подстраиваемого по частоте выходным колебанием синтезатора с переносом частоты в кольцо ИФАПЧ. Последнее направление нашло широкое применение при проектировании многокольцевых синтезаторов частот.

Одной из важных характеристик таких систем являются шумовые характеристики, определяемые спектральной плотностью мощности (СПМ) фазовых шумов [1]. Задачи анализа таких характеристик

для простейших однокольцевых систем ИФАПЧ с делителем или смесителем в цепи обратной связи решались в ряде публикаций [7, 8].

Применение многокольцевых систем позволяет существенно уменьшить уровень фазовых шумов [1]. Однако увеличение количества колец приводит к возрастанию сложности всего устройства, поэтому наиболее часто для систем синтеза сигналов ограничиваются применением двухкольцевых систем ИФАПЧ. Достаточно подробного анализа шумовых характеристик таких систем до настоящего времени в печати не встречалось.

**Целью статьи** является получение модели СПМ фазовых шумов двухкольцевой системы ИФАПЧ, анализ и сравнение полученных результатов моделирования с подобными характеристиками однокольцевых систем ФАПЧ.

### Основной материал

Структура многокольцевого (двухкольцевого) синтезатора сигналов на основе колец ИФАПЧ представлена на рис. 1.

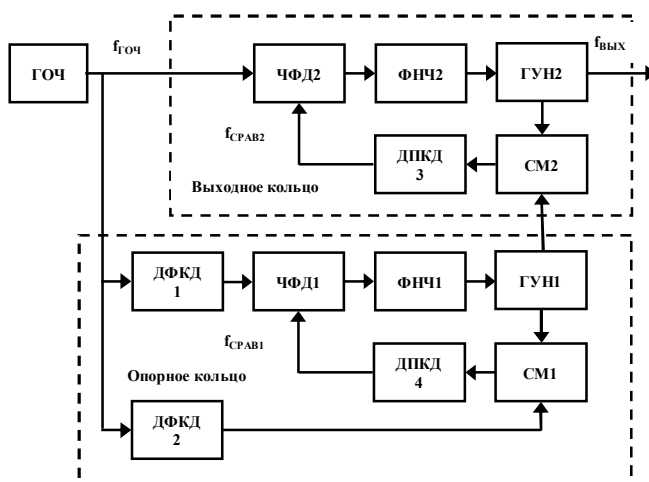


Рис. 1. Структурная схема двухкольцевой ИФАПЧ со смесителем

Здесь сокращенно применены обозначения: ГОЧ – генератор опорной частоты, ДФКД – делитель

ли с фиксированными коэффициентами деления  $N_1, N_2$ , ДПКД – делители частоты с переменным коэффициентом деления  $N_3, N_4$ , ЧФД – частотно-фазовые детекторы, ГУН – генераторы, управляемые напряжением, СМ – смесители частоты.

С целью сокращения коэффициента деления в многокольцевых синтезаторах сигналов используется перенос частоты ГУН в область низких частот. Транспонирование частоты ГУН осуществляется за счет смесителя и фильтра нижних частот, необходимого для фильтрации побочных составляющих. Выбирая частотный план, можно добиться небольшого числа паразитных спектральных составляющих в спектре формируемого сигнала. Как правило, это достигается при формировании сигналов с близкими частотами в кольцах ИФАПЧ и реализации нижнего преобразования. В структуре многокольцевых синтезаторов сигналов можно выделить опорные кольца и выходное кольцо. Опорное кольцо ИФАПЧ служит для формирования сетки частот с шагом  $m\Delta f$ , имеет небольшой коэффициент деления  $N_4$  и частоту ГУН1, равную частоте ГОЧ  $f_{ГУН1} = f_{ГОЧ}$ . С помощью выходного кольца ИФАПЧ сетка частот переносится в СВЧ диапазон без изменения шага  $m\Delta f$ . Так как частота сравнения этого кольца соизмерима с частотой ГОЧ, коэффициент умножения второго кольца  $N_3$  можно сделать небольшим, тем самым, ослабив влияние собственных шумов ЧФД на чистоту спектра выходного сигнала синтезатора.

На рис. 2 представлена функциональная схема, в соответствии со структурной схемой рис. 1, с указанием внешних и внутренних источников шумов.

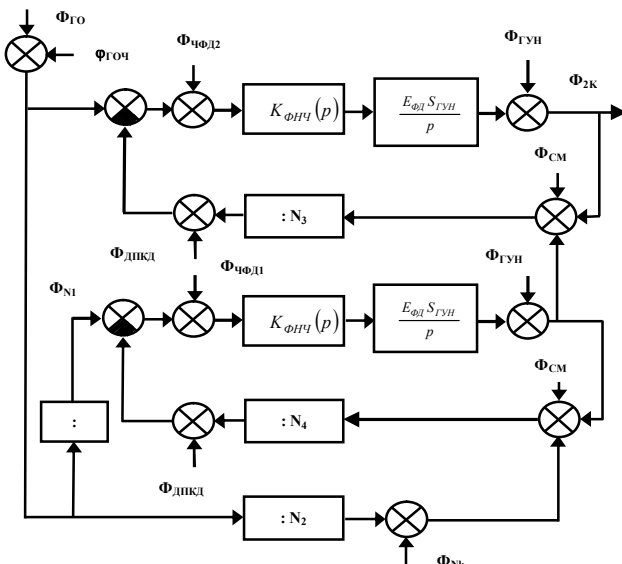


Рис.2. Функциональная схема двухкольцевого синтезатора сигналов с источниками шумов всех функциональных узлов

Здесь приняты обозначения:  $\Phi_{ГОЧ}$  – флуктуации фазы ГОЧ,  $\Phi_{N1}, \Phi_{N2}$ , – флуктуации фазы ДФКД1 и ДФКД2 кратностью  $N_1, N_2$ ,  $\Phi_{ДПКД3}, \Phi_{ДПКД4}$

флуктуации фазы ДПКД3 и ДПКД4 кратностью  $N_3, N_4$ ,  $\Phi_{ЧФД1}, \Phi_{ЧФД2}$  – эквивалентные флуктуации ФД1, ФД2,  $\Phi_{ГУН1}, \Phi_{ГУН2}$  – флуктуации фазы ГУН1, ГУН2,  $\Phi_{СМ1}, \Phi_{СМ2}$  – шумы смесителей СМ1, СМ2.

На основе функциональной схемы рис. 2 запишем выражения для фазовых флуктуаций выходного сигнала второго кольца ИФАПЧ:

$$\Phi_{2К} = [\Phi_{ГОЧ} + \Phi_{ЧФД2} - \Phi_{N3} - 1/N_3 \times (\Phi_{СМ2} - \Phi_{1К})] H_{31\_2}(p) + \Phi_{ГУН2} H_{32\_2}(p), \quad (1)$$

где флуктуации фазы выходного сигнала первого кольца ИФАПЧ определяются как

$$\Phi_{1К} = [(1/N_1 + 1/(N_2 N_4)) \Phi_{ГОЧ} + \Phi_{N1} + \Phi_{ЧФД} - \Phi_{ДФКД} - \frac{1}{N_4} \Phi_{СМ1}] \cdot H_{31\_1}(p) + \Phi_{ГУН1} H_{32\_1}(p); \quad (2)$$

$$H_{31\_1}(p) = \frac{H_1(p) N_4}{1 + H_1(p)} \quad \text{и} \quad H_{31\_2}(p) = \frac{H_2(p) N_1}{1 + H_2(p)} -$$

передаточные функции замкнутых первого и второго колец ИФАПЧ по внешним шумам,

$$H_{32\_1}(p) = \frac{1}{1 + H_1(p)} \quad \text{и} \quad H_{32\_2}(p) = \frac{1}{1 + H_2(p)} -$$

передаточные функции замкнутых первого и второго колец ИФАПЧ по внутренним шумам,

$$H_1(p) = K_{ФНЧ}(p) \frac{S_{ГУН} E_{ФД}}{p} \cdot \frac{1}{N_4} \quad \text{и}$$

$$H_2(p) = K_{ФНЧ}(p) \frac{S_{ГУН} E_{ФД}}{p} \cdot \frac{1}{N_3} -$$

передаточные функции разомкнутых первого и второго колец ИФАПЧ.

Согласно выражениям (1) и (2), СПМ фазовых шумов формируемого сигнала двухкольцевой ИФАПЧ имеет вид:

$$S_{2К}(F) = [S_{ГОЧ}(F) + S_{ЧФД2}(F) + S_{ДПКД3}(F) + [(1/N_3^2) \cdot (S_{СМ2}(F) + S_{1К}(F))] \cdot |H_{31\_2}(F)|^2 + S_{ГУН2}(F) \cdot |H_{32\_2}(F)|^2, \quad (3)$$

где  $S_{1К}(F) = [(1/N_1 + 1/(N_4 N_2))^2 \cdot S_{ГОЧ}(F) + S_{ДФКД1}(F) + S_{ЧФД1}(F) + S_{ДПКД4}(F) + S_{СМ1}(F) / N_4^2] \times |H_{31\_1}(F)|^2 + S_{ГУН1}(F) \cdot |H_{32\_1}(F)|^2 -$

СПМ фазовых шумов первого кольца ИФАПЧ.

При расчете СПМ фазовых шумов двухкольцевой ИФАПЧ, воспользуемся из [1, 9, 10] моделями СПМ фазовых шумов входящих в нее звеньев.

В качестве ФНЧ системы ИФАПЧ используем пропорционально-интегрирующий фильтр второго порядка [11, 12], как наиболее часто применяемого в таких случаях. Его передаточная функция имеет следующий вид:

$$K_{ФНЧ}(F) = \frac{1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{1 + pT_1}{p(1 + pT_2)},$$

где  $T_1 = C_1 R_1$ ,  $T_2 = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$  - постоянные вре-

мени фильтра;  $C_1, C_2, R_1$  - номиналы элементов фильтра. Расчет его параметров производился исходя из параметров системы ИФАПЧ по соотношениям из [13].

Для моделирования СПМ фазовых шумов по приведенным выше выражениям необходимо рассчитать коэффициенты  $N$  делителей, которые бы обеспечили значения выходных частот первого ГУН<sub>1</sub> ( $f_{ГУН1}$ ) и второго ГУН<sub>2</sub> ( $f_{ГУН2}$ ) с требуемым шагом частоты ( $\Delta f$ ). Коэффициент  $N_1$  определяет шаг сетки синтезируемой частоты, равной частоте сравнения первого ЧФД<sub>1</sub> кольца ИФАПЧ и поэтому он равен  $N_1 = f_{ГОЧ}/\Delta f$ . Разностная частота на выходе смесителя СМ<sub>1</sub> при условии что  $f_{ГУН1} = f_{ГОЧ}$  будет равна  $f_{СМ1} = f_{ГУН1} - f_{ГОЧ}/N_2 = f_{ГОЧ} \times (N_2 - 1)/N_2$ . Минимальное значение коэффициента ДПКД4 равно  $N_4 = n_{40} = f_{СМ}/\Delta f = N_1 \times (N_2 - 1)/N_2$ . Коэффициент деления  $N_2$  выбирается из обеспечения целочисленного значения коэффициента  $n_{40}$ . Поскольку второе кольцо ИФАПЧ работает на частоте сравнения, равной частоте ГОЧ, то коэффициент деления ДПКД3 необходимо выбирать  $N_3 = f_{ГУН2}/f_{ГОЧ}$ .

На рис. 3 приведены шумовые характеристики, полученные в результате моделирования двухкольцевой ИФАПЧ при следующих значениях частот:  $f_{ГОЧ} = f_{ГУН1} = 25$  МГц,  $f_{ГУН2} = 3000$  МГц и шаге частот  $\Delta f = 1$  МГц (а),  $\Delta f = 0,1$  МГц (б),  $\Delta f = 0,01$  МГц (в). Полосы пропускания ФНЧ первого и второго колец выбирались в соответствии с коэффициентами деления в обратной связи ИФАПЧ. Видно, (рис.3а) что определяющими шумами являются шумы второго кольца ИФАПЧ. При уменьшении шага сетки частот (рис. 3 б, в) начинают расти шумы первого кольца ИФАПЧ. Это связано с ростом коэффициента умножения петли ИФАПЧ первого кольца. И уже при уменьшении шага по частоте с  $\Delta f = 0,1$  МГц и ниже приводит к тому, что резко возрастают СПМ фазовых шумов в полосе ФНЧ и применение двухкольцевых ИФАПЧ становится неприемлемым.

Для сравнения проведем исследование поведения фазовых шумов при других параметрах системы ИФАПЧ. Так, на рис. 4 приведены СПМ фазовых шумов полученные для частоты  $f_{ГОЧ} = 100$  МГц, частота первого кольца  $f_{ГУН1} = 25$  МГц, второго  $\Delta f_{ГУН2} = 3000$  МГц при шаге синтезируемой частоты  $\Delta f = 1$  МГц. При этом коэффициенты деления в первом и втором кольце составили  $N_4 = 5$  и  $N_3 = 30$ , что в четыре раза меньше чем в первом случае. И как следствие, это видно из рисунка, фазовые шумы при этом уменьшились на 10 дБ/Гц и в первом и во втором определяющими шумами являются шумы второго кольца ИФАПЧ.

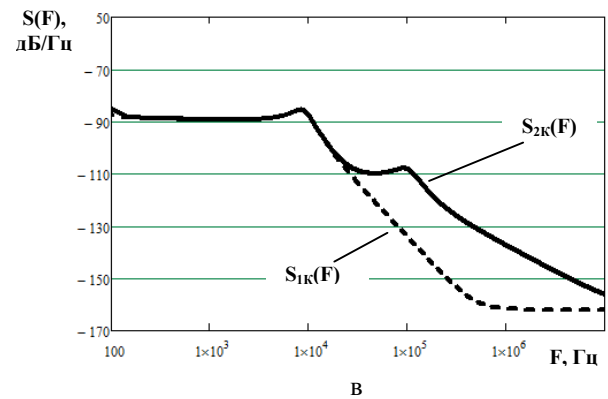
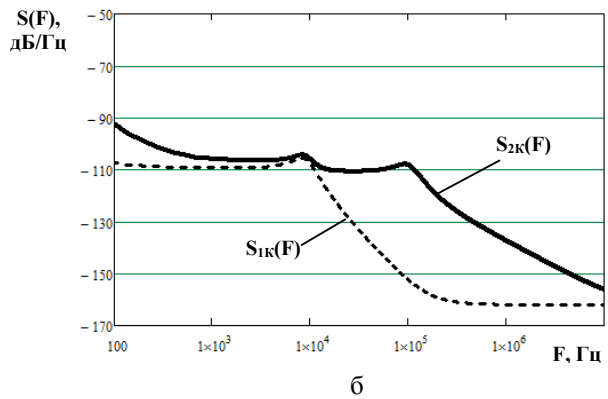
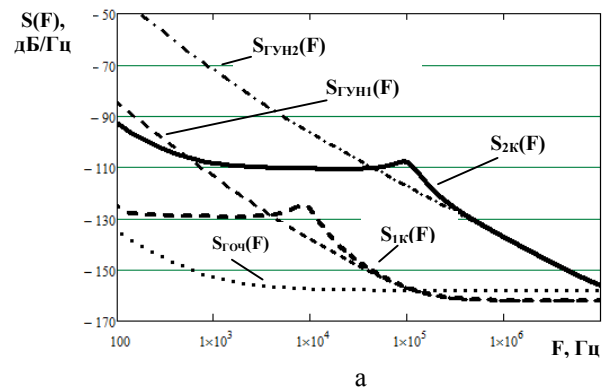


Рис. 3. СПМ фазовых шумов двухкольцевой ИФАПЧ для шага сетки частот  $\Delta f = 1$  МГц (а),  $\Delta f = 0,1$  МГц (б) и  $\Delta f = 0,01$  МГц (в)

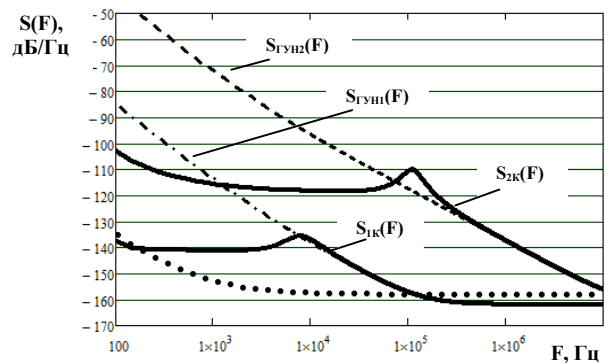


Рис. 4. СПМ фазовых шумов двухкольцевой ИФАПЧ для шага сетки частот  $\Delta f = 1$  МГц при  $f_{ГОЧ} = 100$  МГц,  $f_{ГУН1} = 25$  МГц,  $f_{ГУН2} = 3000$  МГц

На рис. 5 приведенные шумовые характеристики двухкольцевой ИФАПЧ для значений:  $f_{Гоч} = f_{Гун1} = 100$  МГц,  $f_{Гун2} = 3000$  МГц при шаге частот  $\Delta f = 1$  МГц (а) и  $\Delta f = 0,1$  МГц (б).

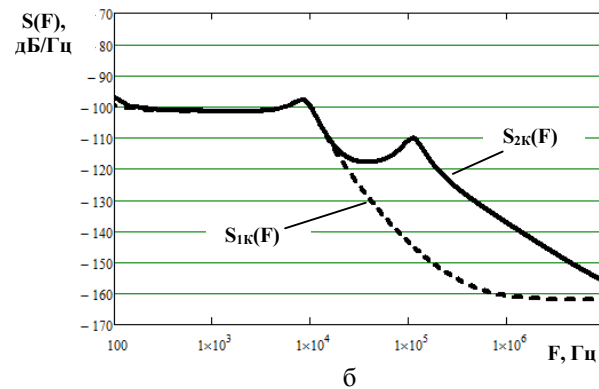
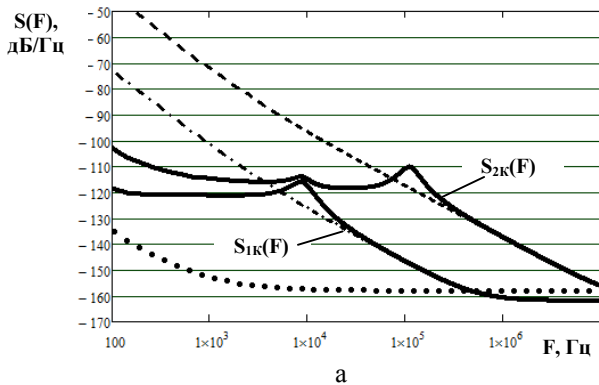


Рис. 5. СПМ фазовых шумов двухкольцевой ИФАПЧ для шага сетки частот  $\Delta f = 1$  МГц (а) и  $\Delta f = 0,1$  МГц (б)

Видно, что в этом случае шумы первого кольца существенно возросли из-за увеличения коэффициента умножения петли ФАПЧ первого кольца (в 10 раз увеличился коэффициент  $N_4 = 50$ ). Поэтому при таких параметрах колец ИФАПЧ уменьшение шага сетки формируемых частот ниже 1 МГц неприемлемо.

На рис. 6 приведено сравнение шумовых характеристик двухкольцевой ИФАПЧ с характеристиками однокольцевых ИФАПЧ с делителем частоты  $S_{дч}(F)$  и смесителем  $S_{см}(F)$  в кольце обратной связи, рассчитанными по моделям из [7, 8] при аналогичных параметрах ИФАПЧ.

Фазовые шумы в полосе пропускания ФНЧ однокольцевой системы со смесителем на 10 дБ/Гц меньше, чем системы с делителем частоты, а уровень шумов двухкольцевой системы примерно на 15 дБ/Гц и 25 дБ/Гц меньше уровня шумов однокольцевых систем со смесителем и делителем соответственно. С уменьшением шага синтезируемых частот синтезатора влияние СПМ фазовых шумов ЧФД однокольцевых ИФАПЧ существенно возрастает из-за увеличения коэффициента умножения петли ФАПЧ. Значения СПМ фазовых шумов с меньшим шагом сетки частот для однокольцевых и двухкольцевой ИФАПЧ приведены на рис. 7.

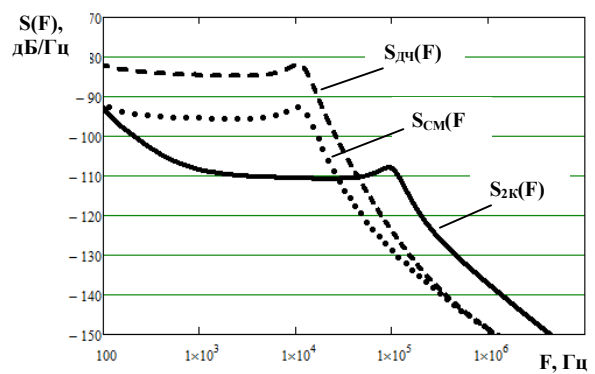


Рис. 6. Сравнение шумовых характеристик однокольцевых и двухкольцевой ИФАПЧ для шага сетки частот  $\Delta f = 1$  МГц при  $f_{Гоч} = f_{Гун1} = 25$  МГц,  $f_{Гун2} = 3000$  МГц

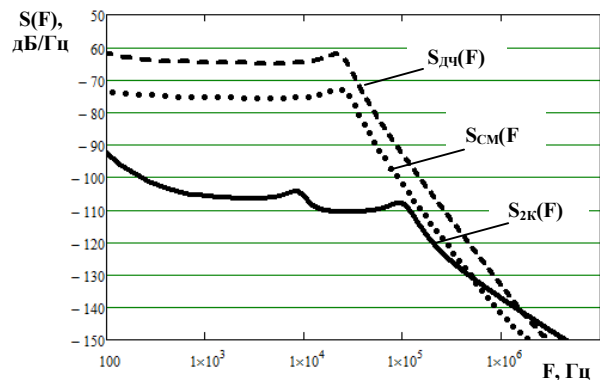


Рис. 7. Сравнение шумовых характеристик однокольцевых и двухкольцевой ИФАПЧ для шага сетки частот  $\Delta f = 0,1$  МГц

Фазовые шумы двухкольцевой ИФАПЧ остаются почти на том же уровне, т.е. практически не зависят от шага синтезируемой частоты. Напротив, шумы однокольцевых ИФАПЧ в этом случае существенно (почти на 35 – 40 дБ/Гц) превышают шумы двухкольцевой системы.

Дальнейшее уменьшение шага синтезируемой частоты (рис. 8) приводит к тому, что применение

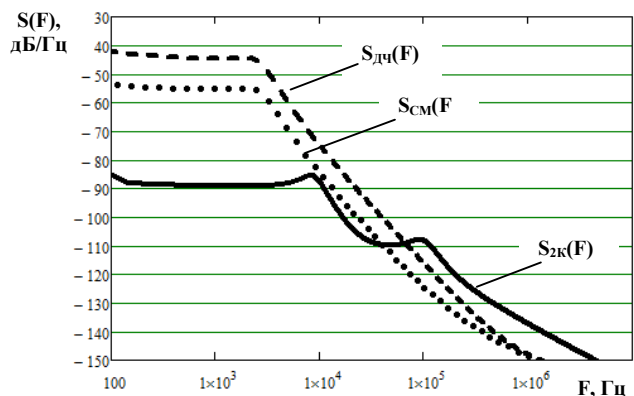


Рис. 8. Сравнение шумовых характеристик однокольцевых и двухкольцевой ИФАПЧ для шага сетки частот  $\Delta f = 0,01$  МГц

однокольцевых ИФАПЧ становится неприемлемым ввиду высокого уровня спектральной плотности мощности фазовых шумов.

В двухкольцевой ИФАПЧ фазовые шумы возрастают в полосе пропускания первого кольца ФАПЧ и практически остаются неизменными в полосе пропускания второго кольца.

## Выводы

Полученные соотношения для теоретического исследования шумов двухкольцевой ИФАПЧ позволяют рассчитывать СПМ фазовых шумов для различных ее параметров и сравнивать с другими системами ИФАПЧ.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что однокольцевые системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты с делителями и смесителями в цепи обратной связи могут применяться только при небольших значениях коэффициента деления частоты в цепи обратной связи. Малый коэффициент деления не позволяет формировать мелкий шаг сетки частот из-за возрастания уровня фазовых шумов пропорционально квадрату этого коэффициента.

Двухкольцевая система импульсно-фазовой автоподстройки частоты позволяет формировать сетку частот с шагом в десятки раз меньшим, чем однокольцевые системы, при этом имеет существенно меньший уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов (на 30–40 дБ/Гц).

## Список литературы

1. Рыжков А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
2. Романов С.К. Системы импульсно-фазовой автоподстройки в устройствах синтеза и стабилизации частот / С.К. Романов, Н.М. Тихомиров, А.В. Леньшин – М.: Радио и связь, 2010. – 328 с.
3. Романов С.К. Формирование ЧМ сигналов в синтезаторах с автоподстройкой / С.К. Романов, Н.М. Тихомиров, А.В. Леньшин – М.: Радио и связь, 2004. – 210 с.
4. Левин В.А. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки частоты / В.А. Левин, В.Н. Малиновский, С.К. Романов – М.: Радио и связь. 1989. – 232 с.
5. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации. Изд. 2-е / В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховкин и др.; Под ред. В.В. Шахгильдяна – М.: Связь, 1989. – 320 с.
6. Шахгильдян В.В. Перспективные направления развития динамической теории дискретных систем фазовой синхронизации для устройств синтеза и стабилизации частот / В.В. Шахгильдян, А.В. Пестряков // Электро-связь. – 1993. – № 11. – С. 38 – 42.
7. Кандырин Н.П. Исследование фазовых шумов системы ФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 8 (124). – С. 30 – 32.
8. Кандырин Н.П. Перспективы использования комбинированных формирователей на основе ФАПЧ и ЦСС для формирования СВЧ сигналов. Фазовые шумы системы ФАПЧ / Н.П. Кандырин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 2(39). – С. 70 – 73.
9. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis / V.F. Kroupa. – John Wiley & Sons, Ltd, 2003. – 320 p. – ISBN: 0-470-84866-9
10. Drucker E. Model PLL Dynamics and Phase-Noise Performance / Erik Drucker // Microwaves & RF. – 2000. – № 2. – P. 35 – 42.
11. Голуб В. Несколько слов о системе ФАПЧ / В. Голуб // Компоненты и технологии: научно-технический журнал. – 2003. – № 8. – С. 34 – 39.
12. Кен Холладей. Проектирование ФАПЧ по полосе пропускания [Электронный ресурс] / Кен Холладей; пер. Ю. Потапова. – EDN, 2000. – Режим доступа к материалу: <http://www.chipinf.ru/literature/chipnews/200009/40.html>.
13. Direct Digital Synthesizer AD9910 [Электронный ресурс]. – Режим доступа к материалу: : <http://www.analog.cjm.ru/rfif-componetnts/direct-digital-synthesis-dds/ad9910/products/product.html>.

Поступила в редколлегию 12.11.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ШУМОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОХКІЛЬЦЕВОЇ СИСТЕМИ ІФАПЧ З ПЕРЕТВОРЕННЯМ ЧАСТОТИ УСЕРЕДИНІ КІЛЬЦЯ

М.П. Кандирін

Розглянута двохкільцева система фазового автопідстроювання частоти. Отримані вираження для моделі спектральної щільності потужності фазових шумів такої системи. Приведені результати моделювання шумових характеристик двохкільцевої ІФАПЧ для вибраних параметрів сигналів, що синтезуються.

**Ключові слова:** двохкільцева ІФАПЧ, однокільцева ІФАПЧ, спектральна щільність потужності фазових шумів.

## NOISE DESCRIPTIONS OF TWOCIRCULAR SYSTEM PLL WITH TRANSFORMATION OF FREQUENCY INTO RING

N.P. Kandyrin

The two-ring system of Phase Lock Loops is considered. Expressions for model of spectral density of power of phase noises of such system are received. Results of simulation of noise performances of two-ring PLL for the selected parameters of synthesizable signals are given.

**Keywords:** two-ring PLL, one-ring PLL, spectral density of power of phase noises.