

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ШУМОВ СИСТЕМЫ ФАПЧ СО СМЕСИТЕЛЕМ В ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Проведен математический анализ шумовых свойств системы ФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи. Получены выражения для расчета спектральной плотности мощности фазовых шумов выходного сигнала. Приведены рассчитанные шумовые характеристики выходного сигнала такой системы с конкретными параметрами.

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

### Введение

**Постановка проблемы и анализ публикаций.** Цифровые синтезаторы частот (ЦСЧ) и цифровые синтезаторы сигналов (ЦСС) находят в последние годы все большее применение в современных радиотехнических системах, таких, как мобильные средства связи, прецизионные измерительные устройства, системы радиолокации и радионавигации. В настоящее время для формирования различного вида сигналов широко используют метод косвенного синтеза на основе системы ФАПЧ. Особенно часто в виду ряда хороших качеств применяют систему импульсно фазовой автоподстройки частоты ИФАПЧ. Основными схемами ИФАПЧ являются системы: с делителями частоты, со смесителями в цепи обратной связи, двухкольцевая ИФАПЧ.

Помимо паразитных спектральных составляющих в сигнале, одним из важных параметров синтезаторов сигналов является уровень шума выходного сигнала, оцениваемый спектральной плотностью мощности (СПМ) фазовых шумов. Исследованию СПМ фазовых шумов ИФАПЧ с делителями частоты посвящено большое количество работ, например, [1–7]. Вопросы анализа фазовых шумов в ИФАПЧ со смесителем частот в обратной связи кроме [3] практически мало, где проводились.

**Целью статьи** является получение соотношения и анализ СПМ фазовых шумов системы ИФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи.

### Основной материал

Обобщенная структурная схема однокольцевой системы ИФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи приведена на рис. 1. На схеме приняты следующие обозначения: ДФКД – делитель частоты с фиксированным коэффициентом деления  $N_1$ , определяющего шаг изменения выходной частоты  $\Delta f = f_{\text{Гоч}}/N_1$ ; ДПКД – делитель частоты с переменным коэффициентом деления  $N_2 = n_2 + m$ , задает

значение частоты выходного сигнала, при  $N_2 = n_2 \cdot 20 = N_1$  синтезируется минимальная частота,  $m$  – целое число; УЧ – умножитель частоты с коэффициентом умножения  $N_3 = n_2 \cdot 20(n_2 - 1)$ ; ФД – фазовый детектор; ФНЧ – фильтр нижних частот; ГУН – генератор, управляемый напряжением.

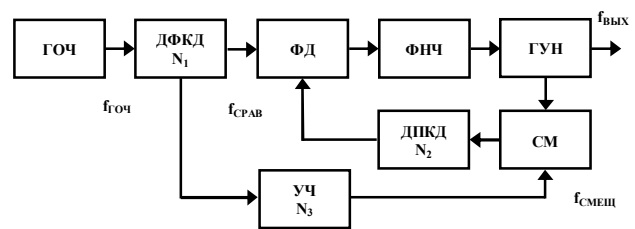


Рис. 1. Структурная схема однокольцевой ИФАПЧ со смесителем

Из ряда источников известно, что основной вклад в уровень СПМ фазовых шумов выходного сигнала системы ИФАПЧ вносит фазовый детектор [3, 7]. В схеме со смесителем делитель с переменным коэффициентом деления имеет коэффициент деления  $N_2$  в  $n_2$  раза меньше, чем в схеме ИФАПЧ с делителями частоты, поэтому уменьшаются и внешние шумы. Однако при формировании сетки частот с мелким шагом коэффициент деления ДПКД и в этой схеме может оказаться еще достаточно высоким. При этом частота смещения  $f_{\text{смещ}}$  колебания, подаваемого на смеситель, выбирается из условия

$$f_{\text{смещ}} = N_3 f_{\text{срав}}, \text{ а } n_3 = n_2(n_2 - 1).$$

В ряде случаев, когда необходимо получить маленький уровень шума, вместо умножителя частоты, в качестве генератора смещения для смесителя используют отдельный высококачественный генератор.

Структурной схеме ИФАПЧ со смесителем, приведенной на рис. 1 соответствует эквивалентная схема на рис. 2, в которой все действующие источники шума заменены двумя:

$$\Phi_1 = \frac{1}{N_1} \Phi_{\text{ГОЧ}} + \Phi_{\text{ДПКД}} + \Phi_{\text{ФД}} + \Phi_{\text{ФНЧ}} - \Phi_{\text{ДПКД}} - \frac{1}{N_2} \Phi_{\text{СМ}} + \frac{1}{N_2} \Phi_{\text{УЧ}}, \quad (1)$$

$$+ \frac{N_3}{N_2} \left( \frac{1}{N_1} \Phi_{\text{ГОЧ}} + \Phi_{\text{ДФКД}} \right) \quad (2)$$

$$\Phi_2 = \Phi_{\text{ГУН}},$$

где  $\Phi_{\text{ГОЧ}}$  – флуктуации фазы ГОЧ;  $\Phi_{\text{ДФКД}}$  – флуктуации фазы ДФКД кратностью  $N_1$ ;  $\Phi_{\text{ФД}}$  – эквивалентные флуктуации ФД;  $\Phi_{\text{ФНЧ}}$  – шумы ФНЧ;  $\Phi_{\text{ГУН}}$  – флуктуации фазы ГУН;  $\Phi_{\text{ДПКД}}$  – флуктуации фазы ДПКД кратностью  $N_2$ ;  $\Phi_{\text{УЧ}}$  – флуктуации фазы УЧ с коэффициентом умножения  $N_3$ ;  $\Phi_{\text{СМ}}$  – шумы смесителя.

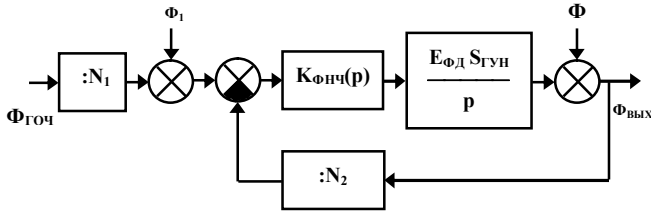


Рис. 2. Эквивалентная схема ИФАПЧ со смесителем и ДПКД в обратной связи и источниками шумов приведенным к двум источникам

Отсюда следует, что результирующие флуктуации фазы колебания на выходе приведенной схемы определяются соотношением

$$\Phi_{\text{ВЫХ}} = H_{31}(p) N_2 \Phi_1 + H_{32}(p) \Phi_2, \quad (3)$$

где  $H_{31}(p) = \frac{H(p)}{1+H(p)}$  – передаточная функция замкнутого кольца ИФАПЧ по внешним шумам;

$H_{32}(p) = \frac{1}{1+H(p)}$  – передаточная функция замкнутого кольца ИФАПЧ по внутренним шумам;

$H(p) = K_{\text{ФНЧ}}(p) \frac{S_{\text{ГУН}} E_{\text{ФД}}}{p} \cdot \frac{1}{N_2}$  – передаточная функция разомкнутого кольца ИФАПЧ;  $K_0 = S_{\text{ГУН}} E_{\text{ФД}}$  – коэффициент усиления разомкнутой системы;  $p$  – оператор.

Далее используя спектральные плотности мощности фазовых флуктуаций элементов схемы, рассчитаем шумовые свойства системы ИФАПЧ. Полагая, что уровень шумов намного меньше мощности полезного сигнала и они не коррелированы между собой, их спектральные плотности можно суммировать. Таким образом, спектральная плотность мощности фазовых шумов выходного сиг-

нала системы ИФАПЧ со смесителем определяется выражением

$$S_{\Phi_{\text{ИФАПЧ}}}(F) = \left[ \frac{S_{\text{ГОЧ}}(F)}{N_1^2} + S_{\text{ДФКД}}(F) + \frac{S_{\text{ФД}}(F) + S_{\text{ФНЧ}}(F)}{E_{\text{ФД}}^2} + S_{\text{ДПКД}}(F) + \frac{S_{\text{СМ}}(F)}{N_2^2} + \frac{S_{\text{УЧ}}(F)}{N_2^2} + \left( \frac{N_3}{N_2} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_{\text{ГОЧ}}(F)}{N_1^2} + S_{\text{ДФКД}}(F) \right) \right] \times \times N_2^2 |H_{31}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2,$$

где буквой  $S$  обозначены СПМ фазовых шумов соответствующих звеньев на рис. 2, выражения для которых взяты из [2 – 4, 6].

В системе ИФАПЧ часто используется ФНЧ второго порядка с передаточной функцией

$K_{\text{ФНЧ}}(p) = \frac{pT_2 + 1}{p(pT_1 + 1)}$ , постоянные времени, для которой рассчитываются через частоту среза ФНЧ  $F_{\text{ср}}$  по формулам

$$T_1 = \frac{M}{(M-1)2\pi F_{\text{ср}}}, \quad T_2 = \frac{M}{(M+1)2\pi F_{\text{ср}}},$$

где  $F_{\text{ср}} = \frac{f_{\text{срав}}}{2 \cdot 10^{\gamma/20}}$  – определяется через частоту

сравнения,  $\gamma$  – запас ЛАЧХ по усилению в децибелах (обычно 3...5),  $M$  – показатель колебательности, связан с запасом по фазе соотношением [8]:

$$\cos \Theta = \frac{\sqrt{M^2 - 1}}{M}.$$

Расчет фазовых шумов системы ИФАПЧ было проведено при следующих параметрах: частота генератора опорных частот 25МГц, частота ГУН 125МГц, запас ЛАЧХ по усилению  $\gamma = 3\text{дБ}$ , показатель колебательности  $M = \sqrt{2}$ .

На рис. 3 приведены полученные зависимости СПМ фазовых шумов для различных коэффициентов деления  $N_1$ .

Из полученных зависимостей видно, что наименьший уровень фазовых шумов имеет система ИФАПЧ с максимальной частотой сравнения, равной частоте ГОЧ (при  $N_1=1$ ). При этом коэффициент деления ДПКД  $N_2 = 5$ , т.е. минимальный при данных условиях, поэтому и уменьшается до минимума вклад внутренних шумов. Остальные шумовые зависимости находятся между СПМ фазовых шумов ГОЧ и ГУН.

Для сравнения на рис. 4 показаны зависимости СПМ фазовых шумов с делителем частоты в обратной связи с аналогичными коэффициентами деления  $N_1$ .

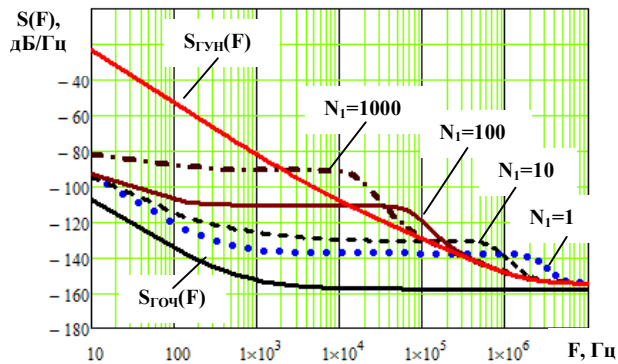


Рис. 3. СПМ фазовых шумов выходного сигнала системы ИФАПЧ со смесителем для ФНЧ второго порядка и коэффициентом деления ДФКД  $N_1 = 1, 10, 100, 1000$ ;  $N_2 = 5$

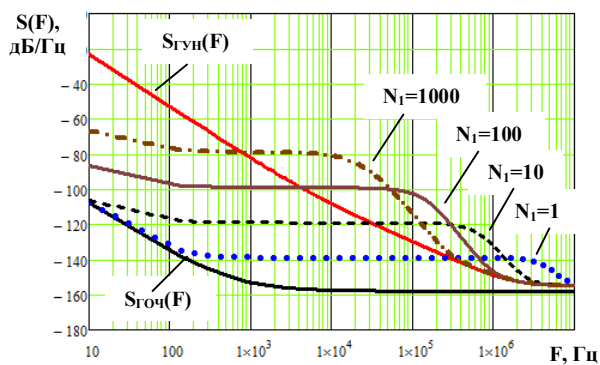


Рис. 4. СПМ фазовых шумов выходного сигнала системы ИФАПЧ с делителем для ФНЧ второго порядка и коэффициентом деления ДФКД  $N_1 = 1, 10, 100, 1000$

Сравнение аналогичных зависимостей СПМ фазовых шумов рис. 3 и 4 показывает, что ИФАПЧ со смесителем имеет примерно на 10 дБ/Гц меньший уровень СПМ шумов. Это достигается за счет меньшего коэффициента деления частоты в цепи обратной связи  $N_2$ .

## Выводы

Полученные соотношения для теоретического исследования шумов ИФАПЧ со смесителем позво-

ляют рассчитывать СПМ фазовых шумов для различных ее параметров и сравнивать с другими системами ИФАПЧ.

В связи со сложностью реализации большого коэффициента умножения в умножителе частоты рекомендуется использовать вместо умножителя высококачественный генератор для преобразования частот в смесителе.

## Список литературы

1. Манасевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование: пер. с англ. под ред. А.С. Галина / В. Манасевич. – М.: Связь, 1979. – 384 с.
2. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis / V.F. Kroupa. – John Wiley & Sons, Ltd, 2003, ISBN: 0-470-84866-9 – 320 p.
3. Рыжков А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
4. Кандырин Н.П. Фазовые шумы кварцевых генераторов и генераторов, управляемых напряжением / Н.П. Кандырин // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – №2(15). – С. 127-129.
5. Никитин Ю. Генераторы, управляемые напряжением, компании SYNERGY для радиочастотных синтезаторов / Ю. Никитин // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. – 2005. – №5. – С. 66-68.
6. 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.: ХУ ПС, 2014. – Вып. №2(39). – С. 70-73.
7. Drucker Erik. Model PLL Dynamics and Phase-Noise Performance / Erik Drucker // Microwaves & RF. – 2000. – №2. – P. 35-42.
8. Бессекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бессекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 768 с.

Поступила в редколлегию 3.09.2014

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ ШУМІВ СИСТЕМИ ФАПЧ ІЗ ЗМІШУВАЧЕМ В ЛАНЦЮЗІ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ

М.П. Кандирін

Проведений математичний аналіз шумових властивостей системи ФАПЧ із змішувачем в ланцюзі зворотного зв'язку. Отримані вирази для розрахунку спектральної щільності потужності фазових шумів вихідного сигналу. Приведені розраховані шумові характеристики вихідного сигналу такої системи з конкретними параметрами.

**Ключові слова:** фазові шуми, ФАПЧ, спектральна щільність потужності.

## PHASE NOISES RESEARCH OF PHASE-LOCKED LOOP FREQUENCY CONTROL SYSTEM WITH MIXER IN FEED-BACK CIRCUIT

N.P. Kandyrin

Mathematical analysis of noisiness phase-locked loop frequency control system with mixer in feed back circuit is conducted. Expressions for calculation power spectral density phase noises of output signal are given. The calculated noise characteristics of output signal in such system with concrete parameters are cited.

**Keywords:** phase noises, PLL, power spectral density.