

## ФАЗОВЫЕ ШУМЫ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ

Елена Михайловна ДОБЫЧИНА родилась в городе Москве. Доцент МАИ. Кандидат технических наук, доцент. Основные научные интересы — в области интеллектуальных антенных решеток. Автор более 20 научных трудов.

Elena M. DOBYCHINA, Ph.D., was born in Moscow. She is an Associate Professor at the MAI. Her research interests include smart antenna arrays. She has published more than 20 technical papers.

*Проведен анализ шумовых характеристик синтезаторов сетки частот с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ). Представлены результаты моделирования шумовых процессов и способ понижения уровня фазовых шумов на выходе синтезатора с помощью разработанной программы.*

*An analysis is carried out for phase noise characteristics of frequency synthesizers with phase locked-loops. Simulation results are presented for noise processes as well as a technique to decrease the phase noise level for the frequency synthesizer output.*

**Ключевые слова:** синтезатор сетки частот, фазовая автоподстройка частоты, фазовый шум, фильтр низких частот.

**Key words:** frequency spectrum synthesizer, phase lock, phase noise, low-pass filter.

### Введение

Синтезаторы сетки частот (ССЧ) находят в последние годы все большее применение в современных радиотехнических системах, таких, как мобильные средства связи, прецизионные измерительные устройства, системы радиолокации и радионавигации. Основной тенденцией развития ССЧ в указанных областях является повышение выходных частот (десятки гигагерц) и уменьшение шага сетки частот (единицы герц). Поэтому вопросы минимизации уровня фазовых шумов в ССЧ становятся особенно актуальными.

Анализ фазовых шумов в ССЧ проводится практически во всех работах, посвященных синтезу частот [1–9]. В [1, 2] рассмотрены теоретические аспекты возникновения и прохождения фазовых шумов во всех существующих видах синтезаторов. Там же показано, что возможность оптимизации уровня фазовых шумов при заданных отстройках от

несущей частоты существует в ССЧ с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ). В [3, 4] представлены шумовые модели генератора, управляемого напряжением (ГУН), а также опорного генератора (ОГ). Однако эти модели не являются достаточно точными и при сравнительном расчете дают существенно заниженные уровни фазовых шумов при малых отстройках от несущей частоты по сравнению с классической моделью [1]. Поэтому в работах последних лет [5, 6] подчеркивается, что для источников гармонических колебаний с высокими требованиями к спектральной чистоте сигнала необходимо учитывать, что фазовые флуктуации при различных частотных отстройках порождаются различными физическими причинами и имеют разные границы. Их положение и протяженность для того или иного выполнения источника колебаний зависят от режима его работы и других факторов.

*Цель настоящей статьи* — представление результатов расчета спектральной плотности мощно-

сти фазовых шумов ГУН и ОГ с учетом влияния различных факторов при разных отстройках от несущей частоты, а также передаточной функции петли ФАПЧ с простейшими фильтрами нижних частот (ФНЧ) и минимизация фазовых шумов ГУН и ОГ на выходе ССЧ с петлей ФАПЧ.

Любое электрическое колебание содержит составляющие фазовой (или частотной) модуляции случайного характера. Шумы возникают в различных элементах устройств: в резисторах, конденсаторах, диодах и транзисторах. В зависимости от режима работы элементов уровни соответствующих шумов могут меняться [1].

Шумы дробового эффекта характеризуются гауссовским распределением амплитуды, поскольку вызваны очень большим числом независимых составляющих. Переменное напряжение, вызванное беспорядочным тепловым движением свободных электронов в объеме проводника, является тепловым шумом. Тепловые шумы также описываются гауссовским распределением амплитуды. Низкочастотные (1/f)-шумы — третий часто встречающийся вид с гауссовским распределением, известные также под названием избыточных или шумов фликкер-эффекта. Шумы этого вида связаны с контактными и поверхностными неоднородностями в полупроводниках и вызваны, по-видимому, флуктуациями проводимости среды, через которую протекает ток [1].

В синтезе частот широко используются петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Обычно петля ФАПЧ используется в качестве фильтра, подавляющего фазовые шумы. Функциональная схема петли ФАПЧ представлена на рис.1, где  $K_{ФД}$ ,  $K_{ФНЧ}$ ,  $K_{ГУН}$  — коэффициенты передачи фазового детектора (ФД), фильтра нижних частот (ФНЧ), генератора, управляемого напряжением (ГУН) соответственно;  $K(j\omega)$  — спектральный коэффициент передачи ФНЧ;  $\omega = 2\pi f$  — мгновенная циклическая частота колебаний;  $f$  — частота колебаний;  $\varphi_{оп.ш.}$ ,  $\varphi_{оп.ш.}$ ,  $\varphi_{зун.ш.}$ ,  $\varphi_{вых}$  — фазы опорного колебания, шумов опорного колебаний, шумов ГУН и выходного колебания соответственно.

Примем, что  $K_{ФД} = K_{ФНЧ} = K_{ГУН} = 1$ ,  $K(j\omega) = 1$ , что соответствует кольцу ФАПЧ первого порядка.

Тогда модуль коэффициента передачи замкнутого кольца ФАПЧ по фазовым шумам опорного колебания

$$K_{оп.ш.} = \sqrt{\frac{1}{1 + \omega^2}}. \quad (1)$$

Аналогично для фазовых шумов ГУН

$$K_{зун.ш.} = \sqrt{\frac{\omega^2}{1 + \omega^2}}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что петля ФАПЧ представляет собой ФНЧ для шумов опорного генератора и фильтр верхних частот (ФВЧ) для шумов ГУН.

Спектр фазовых шумов генераторов представлен на рис. 2 [1], где  $S_{\varphi}(f_m)$  — спектральная плотность мощности фазовых шумов, выраженная в радианах в квадрате на герц ширины полосы частот, или в децибелах относительно  $1 \text{ рад}^2/\text{Гц}$ ;  $f_m$  — частота анализа, равная отстройке от несущей частоты, Гц;  $Q$  — нагруженная добротность резонансного контура генератора;  $\alpha$  — константа, определяющая уровень низкочастотных (1/f) флуктуаций;  $f_{\alpha}$  — отстройка от несущей частоты, при которой уровень низкочастотных шумов равен уровню аддитивных шумов;  $F_T$  — эффективный коэффициент шума усилителя-ограничителя, установленного в петле обратной связи генератора;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура;  $P_S$  — максимально возможная мощность колебаний генератора;  $B_T$  — ширина полосы частот генератора по уровню половинной мощности.

На частотах анализа меньше  $f_{\alpha}$  преобладают низкочастотные шумы фликкер-эффекта. На частотах анализа выше  $f_{\alpha}$  преобладают аддитивные шумы с равномерным распределением, и наклон

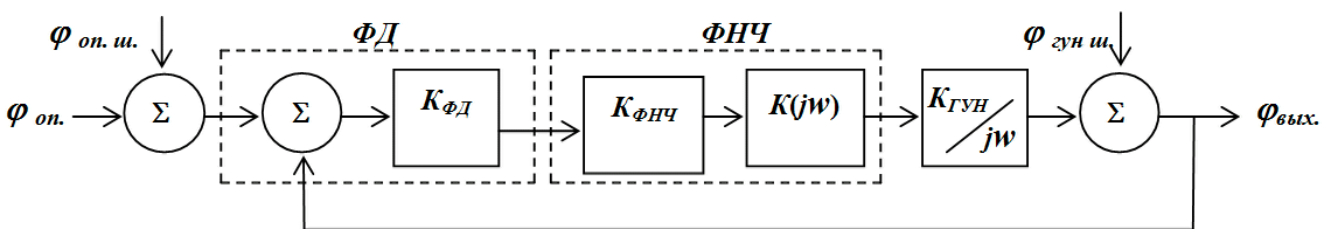


Рис. 1. Схема петли ФАПЧ с фазовыми шумами

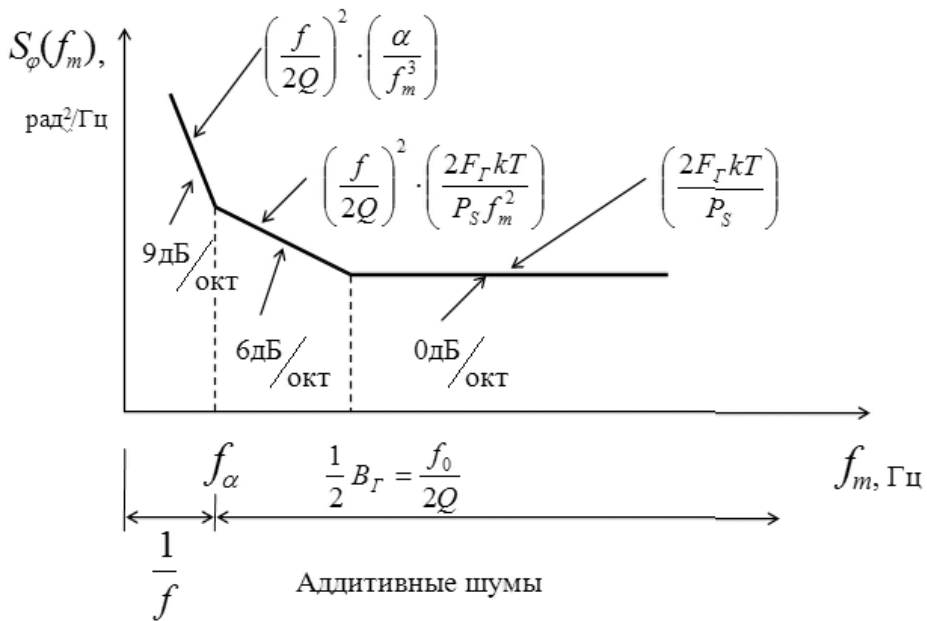


Рис. 2. Спектральная плотность мощности фазовых шумов

кривой изменяется с 9 до 6, а затем — до 0 дБ на октаву соответственно.

В ГУН с электронной перестройкой частоты фазовые шумы, обусловленные электронно-перестраиваемым реактивным элементом (варикапом), могут не только преобладать, но и превысить уровень шумов на 20—40 дБ по сравнению с шумами того же генератора, не содержащего электронно-перестраиваемой реактивности. На практике в ГУН используют варикапы с высокой добротностью.

Для исследования фазовых шумов генераторов была написана программа. На первом этапе исследований с помощью программы можно построить спектральную плотность мощности фазовых шумов для различных видов генераторов. На рис. 3 изображен спектр фазовых шумов ГУН, построенный с помощью программы. В левой части рисунка находятся «окна», в которые при работе с программой вводятся исходные данные. Эти данные соответствуют модели, изображенной на рис. 2, программа позволяет задавать любые параметры генератора, находящиеся в «окнах», например произвольно менять рабочую частоту  $f_0$ , а также выбирать пределы изменения частоты анализа  $f_m$ . На рис. 3 фазовые шумы ГУН построены для рабочих частот 250, 450 и 1900 МГц. Уровень фазовых шумов увеличивается на 5 дБ при изменении частоты с 250 МГц на 450 МГц и на 12 дБ при изменении частоты с 450 МГц на 1900 МГц.

Параметр  $f_\alpha$  — отстройка от несущей частоты, при которой уровень низкочастотных шумов равен уровню аддитивных шумов — в рассматриваемой модели оказывает существенное влияние на уровень

фазовых шумов. Обычно этот параметр приводится в справочных материалах как величина постоянная для определенного типа генераторов [1]. На рис. 4 изображены спектры фазовых шумов для трех типов генераторов: 1 —  $f_\alpha = 10^3$  — УКВ-кварцевый генератор; 2 —  $f_\alpha = 10^4$  — кварцевый генератор на 5 МГц; 3 —  $f_\alpha = 10^5$  — СВЧ-генератор с электронной перестройкой (ГУН); изменение характера спектра вызывается различным уровнем дробовых и фликкер-шумов в этих генераторах.

Вообще исследование параметра  $f_\alpha$  для различных генераторов является очень интересной задачей и частично может быть проведено с использованием этой программы.

В качестве опорных генераторов синтезаторов сетки частот обычно используются кварцевые генераторы (ОКГ). Высокая стабильность частоты в этих генераторах обеспечивается высоким уровнем добротности  $Q$  кварцевого резонатора. Спектры фазовых шумов ОКГ для трех значений добротности  $Q$  представлены на рис. 5, где параметр  $f_\alpha = 10^3$  [1], рабочая частота 12 МГц. При увеличении добротности в 10 раз уровень фазовых шумов снижается на 20 дБ. Программа позволяет проводить расчет со значением добротности  $10^6$ . Однако нельзя забывать о том, что генераторы с высокой добротностью стоят дороже генераторов с меньшей добротностью.

На втором этапе исследований с помощью программы можно моделировать фазовые шумы петли ФАПЧ второго порядка, возможно включение

**Исследование фазовых шумов в активных синтезаторах частоты (Форма №1)**

Исходные данные:

Размерность

$f_0$   ГГц

$Q$

$\alpha$   дБ/Гц

начать построение с:

$f_m$   Гц

закончить построение в:

$f_m$   МГц

$F_T$   дБ

$K_T$   дБМ/Гц

$P_s$   дБМ

$f_\alpha$   Гц

Параметры осей:

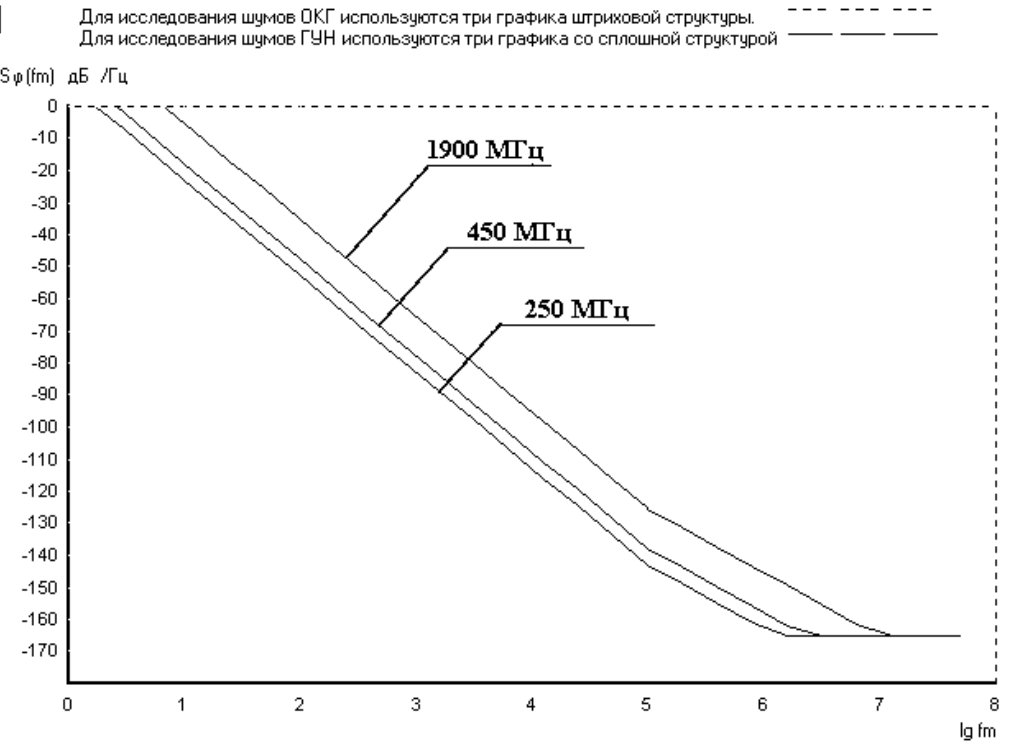
**Ось X:**

Min  Max

**Ось Y:**

Max  Min

Убрать график:



- 

Рис. 3. Фазовые шумы ГУН

Исходные данные:

Размерность

$f_0$   МГц

$Q$

$\alpha$   дБ/Гц

начать построение с:

$f_m$   Гц

закончить построение в:

$f_m$   МГц

$F_T$   дБ

$K_T$   дБМ/Гц

$P_s$   дБМ

$f_\alpha$   Гц

Параметры осей:

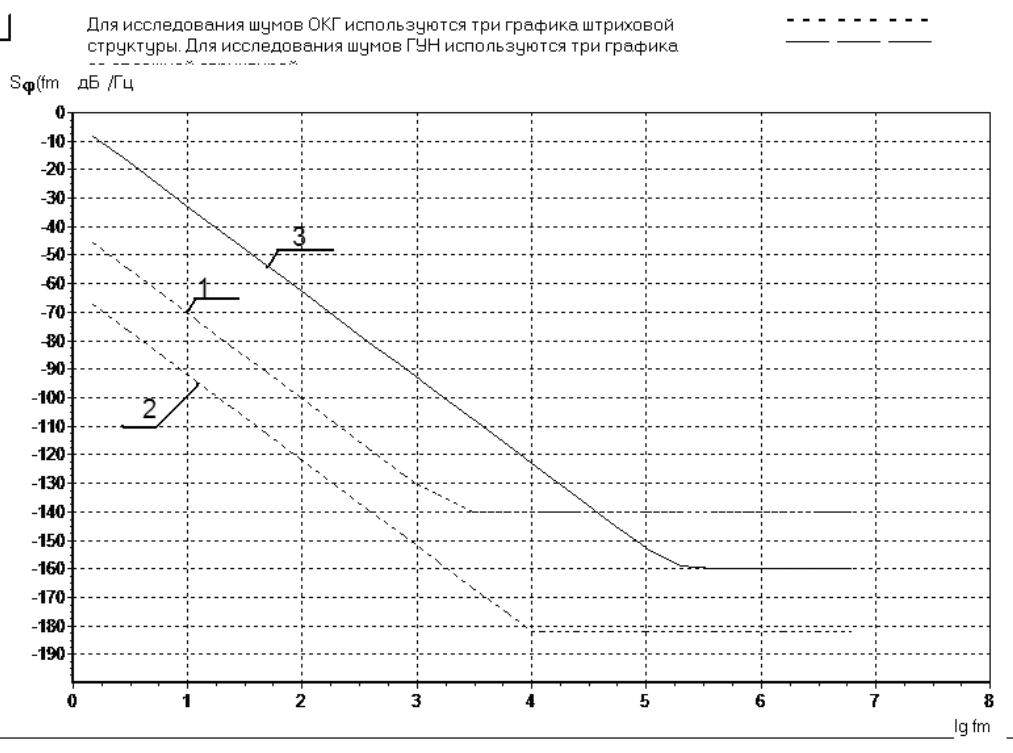
**Ось X:**

Min  Max

**Ось Y:**

Max  Min

Убрать график:



- 

Рис. 4. Фазовые шумы генераторов с различными  $f_\alpha$

Исследование фазовых шумов в активных синтезаторах частоты (Форма №1)

Исходные данные:

Размерность  
 $f_0$   МГц  
 $Q$   x100  
 $\alpha$   дБ/Гц

начать построение с:  
 $f_m$   Гц  
 закончить построение в:  
 $f_m$   МГц

$F_T$   дБ  
 $K_T$   дБМ/Гц  
 $P_S$   дБМ  
 $f_\alpha$   Гц

Параметры осей:  
 Ось X:  
 Min  Max   
 Ось Y:  
 Max  Min

Убрать график:

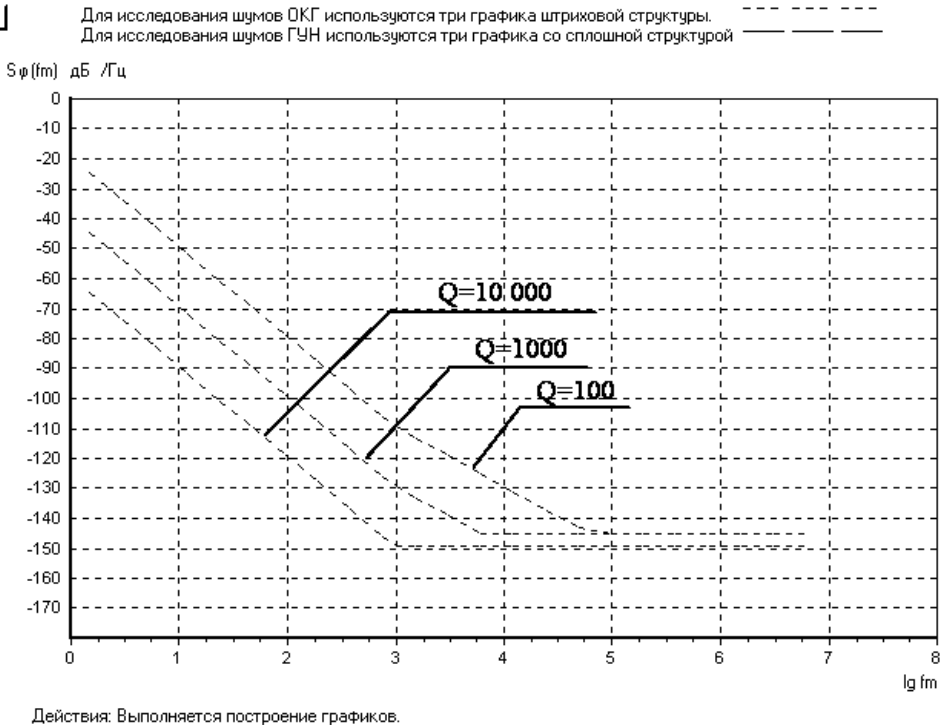
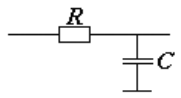


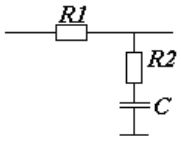
Рис. 5. Фазовые шумы ОКГ

Выбор фильтра

Исходные данные:  
 Интегратор  
 $C$   нФ  
 $R1$   кОм



Проп. интегратор  
 $C$   нФ  
 $R1$   Ом  
 $R2$   Ом



Параметры осей:  
 Ось X:  
 Min  Max   
 Ось Y:  
 Max  Min

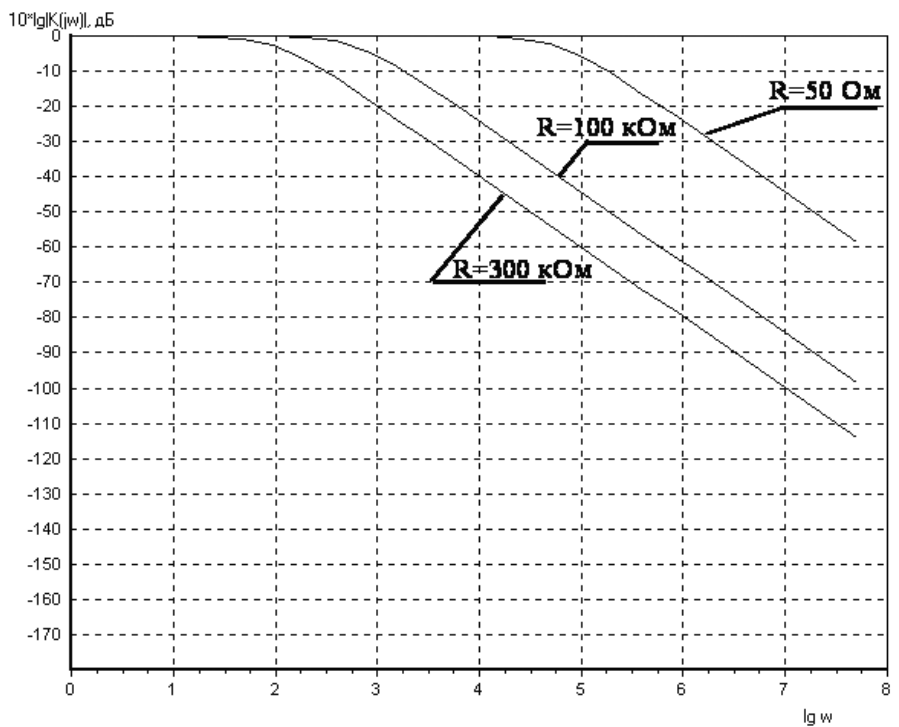


Рис. 6. Передаточная функция ИФ

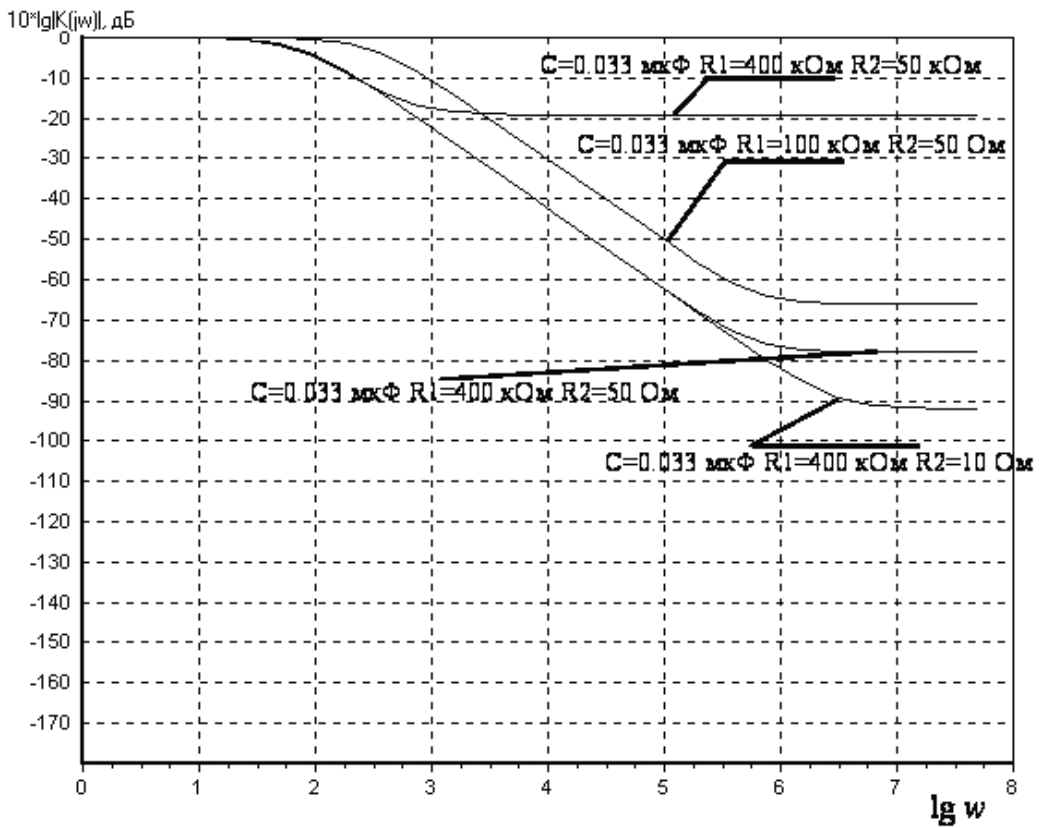


Рис. 7. Передаточная функция ПИФ

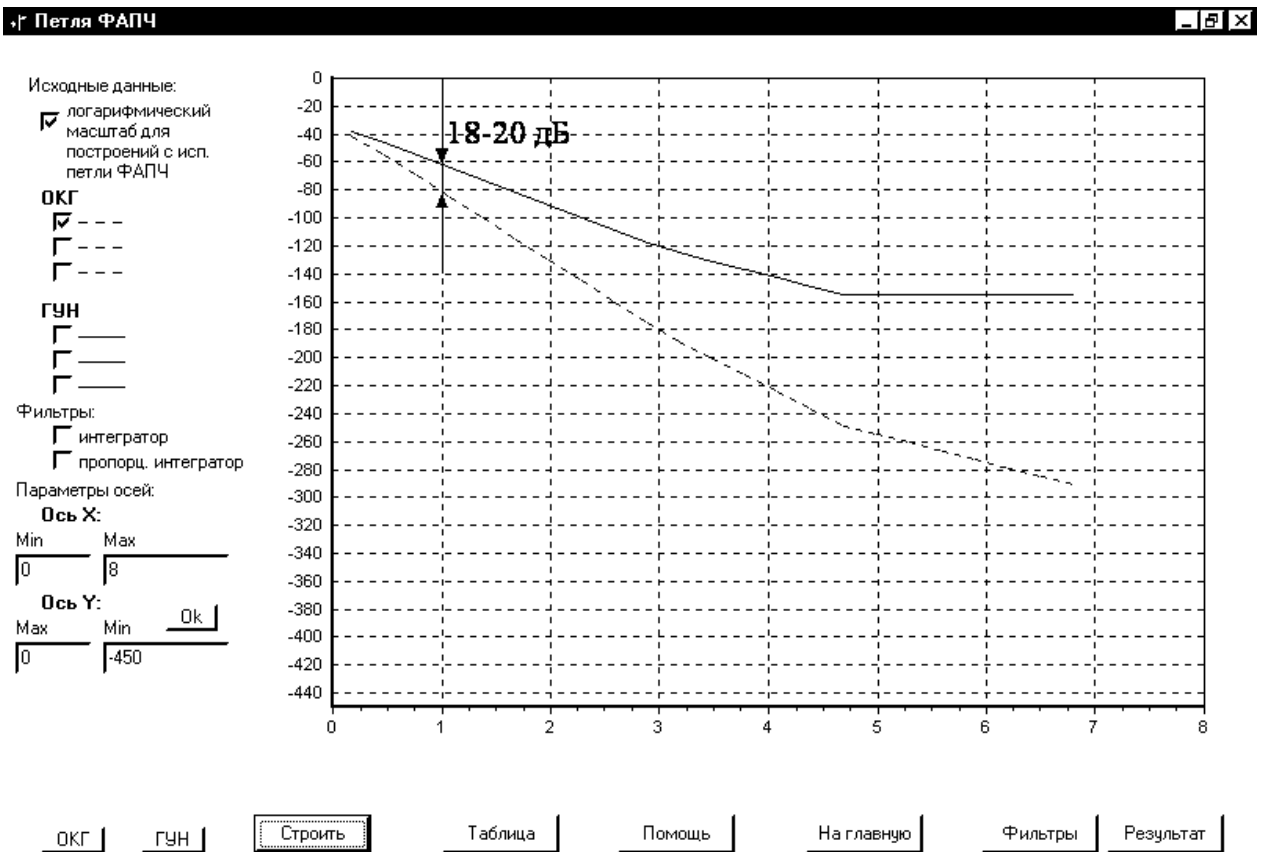


Рис. 8. Влияние петли ФАПЧ на фазовые шумы ОКГ

после ФД двух видов ФНЧ: ИФ — интегрирующего фильтра и ПИФ — пропорционально-интегрирующего фильтра. На рис. 6 и рис. 7 представлены результаты расчета передаточных функций ИФ и ПИФ соответственно. В левой части рис.6 виден фрагмент экрана компьютера, где изображены электрические схемы ИФ и ПИФ, а также «окна» для ввода параметров фильтров; в правой части видны графики, иллюстрирующие влияние сопротивления  $R$  на полосу пропускания ИФ. На рис. 7 изображены передаточные функции ПИФ для разных значений емкости  $C$  и сопротивлений  $R1, R2$ .

Проведем исследование фазовых шумов ОКГ с петлей ФАПЧ 2-го порядка (с интегрирующим фильтром). На рис. 8 изображены два графика: спектр фазовых шумов опорного генератора со следующими параметрами:  $f_\alpha = 10^3$  Гц;  $Q = 10^4$ ;  $f_0 = 10$  МГц;  $\alpha = -125$  дБ/Гц;  $P_S = 7$  дБм;

$F_T = 12$  дБ;  $k \cdot T = -174$  дБм/Гц — сплошная линия и спектр фазовых шумов опорного генератора с петлей ФАПЧ 2-го порядка (параметры ИФ  $C = 33$  нФ,  $R = 10$  кОм) — пунктирная линия. Петля ФАПЧ для опорного генератора представляет собой фильтр нижних частот, на частоте анализа 10 Гц ослабление шумов составляет 20 дБ, а на частоте анализа 100 кГц — 100 дБ.

По отношению к шумам ГУН петля ФАПЧ ведет себя как фильтр верхних частот. На рис. 9 изображены два графика: спектр фазовых шумов ГУН со следующими параметрами:  $f_\alpha = 10^5$  Гц;  $Q = 10^2$ ;  $f_0 = 900$  МГц;  $\alpha = -85$  дБ/Гц;  $P_S = 7$  дБм;  $F_T = 32$  дБ;  $k \cdot T = -174$  дБм/Гц — без фильтра и спектр фазовых шумов ГУН с петлей ФАПЧ 2-го порядка (параметры ИФ  $C = 33$  нФ,  $R = 2$  Ом) — с ИФ. На частоте анализа 100 Гц ослабление шумов составляет 30 дБ, а на частоте анализа 100 кГц — 0 дБ. Результаты подавления шумов ГУН не так существенны, как у ОКГ, так как для существенного подавления шумов ГУН петля ФАПЧ должна обладать довольно широкой полосой, однако частоты выше 300 Гц используется, например, в радиотелефоне для передачи речи. Повышение полосы пропускания петли ФАПЧ приведет к снижению уровня фазовых шумов, однако, приведет к подавлению полезного сигнала, расположенного в области 300 Гц.

Представленная шумовая модель ССЧ с ФАПЧ не учитывает ряд факторов, также влияющих на уровень фазовых шумов выходного колебания синтезатора. В статье не конкретизируется тип фазового детектора (ФД), и представленная модель не

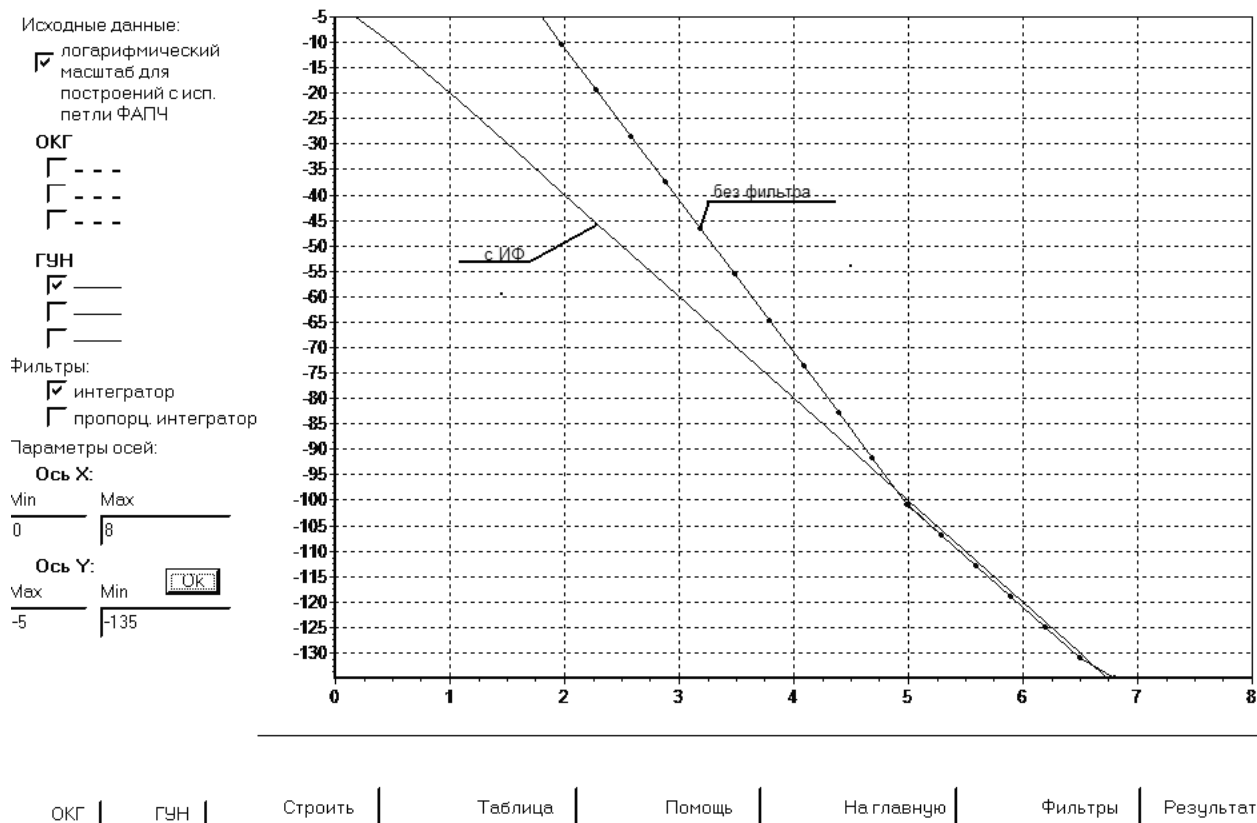


Рис. 9. Влияние петли ФАПЧ на фазовые шумы ГУН

учитывает шумов, вносимых этим очень важным для работы системы устройством. В настоящее время вопросы выбора того или иного типа дискриминатора, а также расчет фазовых шумов, присущих каждому из них, уже рассмотрены в литературе [1, 2, 4, 6, 8]. Кроме того, современные ССЧ строятся на основе цифрового кольца ФАПЧ (ЦФАПЧ), содержащего, кроме ОКГ, ФНЧ и ГУН, как минимум импульсно-фазовый детектор (ИФД) и делитель с переменным коэффициентом деления (ДПКД), управляемый микропроцессором. Эти элементы также вносят свой вклад в уровень выходных фазовых шумов ССЧ [1, 2, 7, 8]. Однако методики расчета этих шумов хорошо известны: после конкретизации схемы ССЧ они, как правило, добавляются к тем шумам, которые рассчитаны в данной статье, причем результирующий спектр может значительно изменяться на разных участках отстройке от несущей частоты.

## Выводы

В современных устройствах все чаще стали применяться интегральные синтезаторы частот с ФАПЧ [7, 8]. Это микросхемы, включающие в себя все элементы ЦФАПЧ, кроме ОКГ, ФНЧ и ГУН, например, MB15F78UL, причем ГУН выполняется также в виде микросхемы [9]. Появились интегральные синтезаторы, включающие в себя также и ГУН-ADF4360-7. Обычно в паспорте таких синтезаторов представлены подробные шумовые характеристики. Поэтому на долю разработчика синтезатора приходится только грамотный выбор ОКГ и разработка ФНЧ, при этом шумы ГУН заменяют-

ся шумами интегрального синтезатора. Таким образом, представленная в статье модель для расчета шумов ССЧ является актуальной и может иметь практическое значение для разработчиков радиотехнических систем.

## Библиографический список

1. Манассевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование. — М.: Связь, 1979.
2. Шапиро Д.Н., Паин А.А. Основы теории синтеза частот.- М.: Радио и связь, 1981.
3. Kroupa V.F. Noise Properties of PLL Systems.- IEEE Trans. Comm., vol. COM-30, No.10, pp.2244-2252, Oct.1982.
4. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике связи. — М.: Радио и связь, 1991.
5. Белов Л.А. Синтезаторы частот и сигналов. — М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002.
6. Романюк В.А. Синтезаторы частот на основе автогенераторов с ФАПЧ. — М.: МИЭТ, 2005.
7. Белов Л.А. Синтезаторы стабильных частот // ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ. 2004. №3. С. 38-44.
8. Никитин Ю., Дмитриев С. Частотный метод анализа характеристик синтезаторов частот с импульсно-фазовой автоподстройкой частоты Analog Devices. Ч. 3. Расчет фильтрации помех кольцом АФАП // Компоненты и технологии. 2003. №5. С.3-62.
9. Никитин Ю. Генераторы, управляемые напряжением, компании SYNERGY для радиочастотных синтезаторов // ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ. 2005. №5. С. 66-68.

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 12.02.2009