

1 199 7037

На правах рукописи

БЫКОВ Андрей Александрович

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР И ПАРАМЕТРОВ  
СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ С ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ

Выполнен на кафедре Автономные информационные и управляющие системы

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации (в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

МОСКВА, 2012

2  
Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана на кафедре «Автономные информационные и управляющие системы»

Научный руководитель - **Шахтарин Борис Ильич**,  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки и техники РФ,  
лауреат Государственной премии СССР

Официальные оппоненты: д.т.н., с.н.с. Тихомиров Николай Михайлович  
к.т.н., с.н.с. Голубев Сергей Владимирович

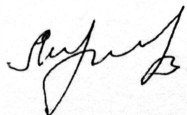
Ведущая организация: ФГУП НПП «Дельта»

Защита состоится «15» мая 2012 г. в 14:30  
на заседании Диссертационного совета Д 212.141.02 при  
Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана,  
по адресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманская, д.5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского  
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан «28» сентября 2012 г.

Учёный секретарь  
диссертационного Совета



к.т.н. доц. Муратов И.В.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1997054

Вызов А.А. Обоснование рац

-053-

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность диссертации

Особенностью современных устройств радиоавтоматики, передачи и обработки информации является необходимость выполнения жестких требований к таким характеристикам, как стабильность частоты и фазы колебаний в широком диапазоне частот, быстрая перестройка и высокая чистота спектральных составляющих на выходе передатчика. В радиосвязи и радионавигации это связано с проблемами электромагнитной совместимости средств передачи информации, рационального использования радиодиапазона, а также устойчивости к преднамеренным помехам.

Практическая реализация современных требований к аппаратуре невозможна без применения устройств стабилизации и синтеза частот (СЧ). От показателей СЧ существенно зависит эффективность и качество функционирования всей информационной системы в целом, ее потенциальные характеристики.

Основной задачей при создании современных СЧ является решение проблемы по преодолению трех противоречивых требований: широкодиапазонности, скорости перестройки, чистоте спектра формируемых сигналов. Эти требования актуальны для аппаратуры систем различного назначения.

Основные достижения в области синтеза частот в России представлены в работах В.А. Левина, В.Н. Малиновского, Н.М. Тихомирова, С.К. Романова, Л.А. Белова, Б.И. Шахтарина, Г.Н. Прохладина и др. Научные школы Московского энергетического института и Воронежского концерна «Созвездие» добились значительных успехов в области синтеза стабильных частот. За рубежом синтезаторы частот исследовали Р.Е. Бест, В.Ф. Кроуп, Д.С. Кэнди, Д. Кёсслер и др.

До настоящего времени отсутствуют научно обоснованные способы проектирования, исследования и оптимизации характеристик СЧ и его параметров, ориентированные на повышение его динамических характеристик, которые бы в полной мере учитывали возможности систем автоподстройки, влияние шумов СЧ и позволяли бы проводить расчет и оптимизацию структур синтезаторов частот и, в частности, импульсно фазовой автоподстройки (ИФАП), предназначенных для функционирования в системах передачи и обработки информации, радионавигации, радиолокации и др.

Поэтому настоящая диссертация, посвященная исследованию элементов СЧ, их взаимодействию, разработке рекомендаций по проектированию СЧ является актуальной.

**Целью** исследования диссертации является обоснование рациональных структур и параметров синтезаторов частоты с фазовой автоподстройкой частоты (в синтезаторах частот косвенного синтеза).

**Задачи, решаемые в диссертации.** Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. Разработка алгоритма расчета параметров кольца ИФАП, входящего в структуру СЧ.
2. Разработка имитационных моделей частотных фазовых детекторов (ЧФД) с токовой подкачкой (ТП).
3. Разработка имитационных моделей сигма дельта модуляторов (СДМ).
4. Разработка лабораторных макетов синтезаторов частот.

**Объектом исследования** в диссертации являются структуры и параметры синтезаторов частот, а **предметом исследования** - синтезаторы частот с рациональной структурой и параметрами элементов кольца импульсно-фазовой автоподстройки.

**Методика исследований.** Решение поставленных задач осуществлялось с использованием методов: системного анализа, теории нелинейных систем, теории колебаний, теории автоматического управления, теории обработки сигналов.

#### **Научная новизна результатов:**

1. Разработан алгоритм расчета параметров для обеспечения стабильной работы ИФАП. По этому алгоритму получены параметры СЧ-ИФАП.
2. Предложены математические и имитационные модели, описывающие работу СЧ с использованием устройства ЧФД с ТП, позволяющие находить динамические характеристики СЧ.
3. Предложены математические и имитационные модели СДМ, позволяющие исследовать их динамические и спектральные характеристики.
4. Разработаны и созданы лабораторные макеты синтезаторов частот, использующих в своей структуре ЧФД, СДМ, и кольцевые фильтры порядка не ниже второго.
5. В результате получены новые экспериментальные данные, характеризующие СЧ-ИФАП и подтверждающие результаты проведенных теоретических исследований.

#### **Практическая ценность диссертации:**

1. Разработанные в диссертации математические и имитационные модели и алгоритмы СЧ, позволяют рассчитывать основные динамические и спектральные характеристики СЧ и осуществлять рациональный выбор структур и параметров СЧ. Созданные автором программы, модели и алгоритмы апробированы в МГТУ им. Н.Э. Баумана, Институте криптографии, связи и информатики Академии ФСБ России, Санкт – Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения, а также в ОАО “Концерн “Созвездие”.
2. Разработаны имитационные модели СЧ, что позволило рационализировать структуру СЧ и рассчитать его параметры с учетом малого шага перестройки по частоте при высокой спектральной чистоте генерируемого сигнала.
3. На основании материалов диссертации реализованы лабораторные макеты СЧ на двух ИМС отечественного (КН1015ПЛ15) и зарубежного (SKY72300) производства.

4. По материалам диссертации спроектирована и разработана установка, на которой проводится лабораторные работы по курсу «Статистическая радиотехника».
5. Предложенные и развитые в диссертации алгоритмы, имитационные и полунатурные модели могут быть использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах для рационализации структур и оптимизации параметров как СЧ различного назначения в целом, так и отдельных его узлов (СДМ, ЧФД, кольцевых фильтров).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математические и имитационные модели СДМ, ЧФД, кольцевых фильтров и СЧ.
2. Динамические и спектральные характеристики СЧ и его элементов.
3. Алгоритм расчета параметров СЧ гарантирующих стабильную работу ИФАП.
4. Экспериментальные установки СЧ.
5. Экспериментальные данные синтезаторов частот, разработанных с использованием ЧФД, СДМ и без них.

**Достоверность полученных результатов** определяется корректностью использования математического аппарата теории автоматического управления при разработке математических моделей. Основные результаты, полученные в данной диссертации путем математического и имитационного моделирования, проверены экспериментально с использованием макетных приборных устройств.

**Внедрение результатов работы:**

Результаты исследований использованы:

1. НИР [Синхронизация в радиосвязи и навигации, 2007 г., ГР 01200710182], проводимая на кафедре «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им Н.Э. Баумана, а также НИР «КЕДР 5» Рук. Темы Борзов А.А. [и др.] ГР 012-009-648-25.-раздел 2.4.-М.:2010, о чем свидетельствует акт о внедрении.

Результаты исследований внедрены:

1. В опытно - конструкторские работы, проводимые организацией ОАО «Концерн «Созвездие», о чем свидетельствует акт о внедрении.
2. В учебный процесс:
  - a. В учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана, в частности в учебное пособие [1], о чем свидетельствует акт о внедрении.
  - b. В учебный процесс кафедры «Радиоэлектронные системы» Института криптографии, связи и информатики Академии ФСБ России, о чем свидетельствует акт о внедрении.
  - c. В учебный процесс ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», о чем свидетельствует акт о внедрении.
3. Лабораторные работы на кафедре «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им Н.Э. Баумана в (форме действующей

лабораторной установки).

**Апробация работы.** Полученные автором научные результаты докладывались на 61-ой научной сессии Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С.Попова (НТОРЭС им. Попова) посвященному дню радио (16,17 мая 2006 г. г. Москва), а также на семинарах кафедры СМ5 МГТУ им. Н.Э.Баумана, и «Санкт-Петербургского Государственного университета аэрокосмического приборостроения».

### **Публикации**

Основные результаты диссертации изложены и опубликованы в 9 статьях по перечню ВАК и в 1 тезисе доклада.

### **Объём и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (61 наименование), приложения и изложена на 152 листах машинописного текста, включая 50 рисунков.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** дана общая характеристика диссертации: обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования, кратко изложено содержание работы, приведены основные положения, выносимую на защиту.

**В первой главе** на основании анализа процессов, проходящих в системах импульсно – фазовой автоподстройки (ИФАП) была решена задача рационального выбора структуры СЧ, отвечающей поставленным требованиям, таким как:

- широкодиапазонность (диапазон рабочих частот 1,5...10000 МГц);
- минимальный шаг сетки частот (10 Гц для КВ диапазона и 2,5 кГц для УКВ диапазона);
- высокое быстродействие (скорость перестройки по частоте 50...100 мкс)
- жесткие требования по чистоте спектральных составляющих и фазовой стабильности несущей (уровень фазовых шумов при расстройке 1 кГц от несущей 70 дБн/Гц, при расстройке 100 кГц – 110 дБн/Гц).
- минимальные энергопотребление, масса, габариты.

Для этого из существующих в настоящее время методов получения дискретного множества частот был выбран метод активного косвенного синтеза. Показано, что преимуществом синтезаторов с фазовой автоподстройкой является высокая стабильность выходной частоты, низкий уровень шумовой полосы в выходном тракте.

Для анализа времени перестройки по частоте, в главе 1 вводится и обосновывается параметр быстродействия системы как время переключения между коэффициентами деления ДПКД.

Установлено, что существуют две основные группы способов повышения быстродействия СЧ:

- первая группа способов основана на увеличении частоты сравнения (частоты дискретизации в системе ИФАП) за счет использования нескольких

колец ИФАП или применении делителей частоты с ДПКД при сохранении заданного шага сетки частот;

- вторая группа основана на изменении характеристик канала управления частотой сигнала УГ и реализации благоприятных фазовых соотношений на входе сравнивающего устройства при сохранении равенства частоты сравнения в детекторе и шага сетки частот.

Показано, что переход к построению синтезаторов на основе многокольцевых структур сопряжен со сложностями схемотехнической реализации. В диссертации отдается предпочтение СЧ ИФАП с ДПКД, что отвечает требованиям, предъявляемым к СЧ с точки зрения массогабаритных показателей и энергопотребления.

Показано, что существенный вклад на время перестройки по частотной сетке (быстродействие СЧ) оказывает тип фазового детектора (ФД). В диссертации отдается предпочтение частотно – фазовым детекторам (ЧФД) с токовой подкачкой (ТП).

Однако, как показано в работе, схемам СЧ с ДПКД присущи серьезные недостатки – появление в спектре выходного сигнала побочных спектральных составляющих помех дробности (ПД). Поэтому, в качестве наиболее эффективным способом компенсации ПД в диссертации отдается предпочтение использованию СДМ в схемах делителей частоты.

Таким образом, обосновано, что рациональная структура СЧ должна содержать: одно кольцо системы ИФАП, ДПКД, СДМ, ЧФД с ТП.

Одна из рассматриваемых в диссертации структур СЧ с СДМ представлена в виде блок- схемы на рис. 1.

Во второй главе объектом исследования является кольцо ИФАП с ЧФД (рис.2).

Для рассматриваемой модели получены передаточные функции замкнутой и разомкнутой систем. Определены основные параметры модели ИФАП, такие как:

1. опорная частота -  $\omega_n$  ;
2. коэффициент демпфирования (затухания) -  $\xi$  ;
3. емкостной показатель -  $m$

Выбор параметров системы для стабилизации частотных характеристик кольца ИФАП проводился по следующему алгоритму:

1) определялись частотные границы фазового детектора - выше опорной частоты, с тем, чтобы не допустить передискретизации.

Для этого в работе исследовано влияние нелинейности ЧФД на стабильность системы ИФАП. Выявлены граничные условия, при котором ЧФД не вносит дополнительных искажений в систему ИФАП. Так, при максимальной частотной полосе слежения системы ИФАП  $\omega_n = 100 \text{ рад/с}$ , частотный показатель ЧФД должен быть равен  $T_p = 0.01$  .

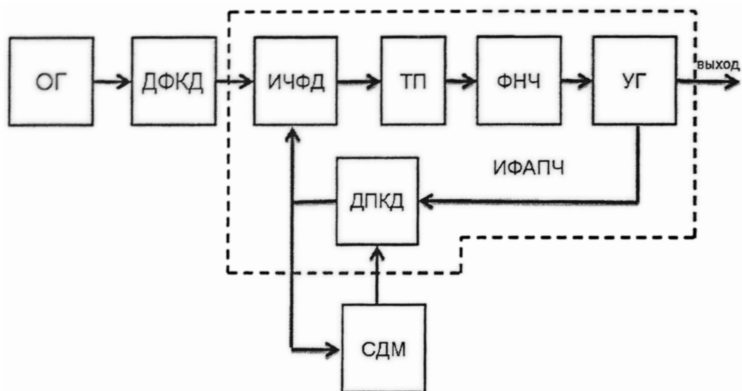


Рис.1 Блок схема СЧ с СДМ:

ОГ – опорный генератор; ДФКП – делитель с фиксированным коэффициентом деления; ИЧФД – импульсно частотный фазовый детектор; ТП – токовая подкачка; ФНЧ – фильтр нижних частот; УГ – управляемый генератор; ДПКП – делитель с дробно – переменным коэффициентом деления, СДМ – сигма дельта модулятор; ИФАП – кольцо импульсно – фазовой автоподстройки (пунктирная линия).

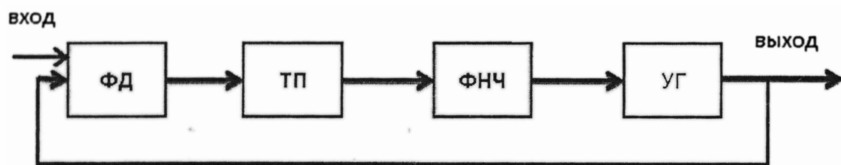


Рис. 2. Блок схема кольца ИФАП:

ФД – фазовый детектор; ТП – токовая подкачка; ФНЧ – фильтр нижних частот; УГ – управляемый генератор

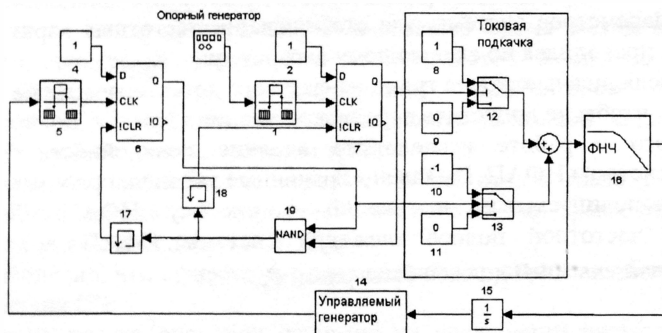


Рис. 3. Имитационная модель ИФАП в среде Simulink

2) Определялись максимально допустимые значения передаточной функции ИФАП и вычислялись емкостной показатель  $m$  совместно с коэффициентом затухания  $\xi$ .

Для этого в диссертационной работе исследовано влияние параметров затухания и емкостного показателя на передаточную функцию ИФАП. Выявлено, что на стабильность работы ИФАП опорная частота  $\omega_n$  оказывает наименьшее влияние по сравнению с параметрами затухания и емкостного показателя. Так при значениях  $m=0.035$  и  $\xi=10$ , система сохраняет стабильное состояние.

3) Определялась опорная частота  $\omega_n$  согласно проектируемому изделию.

4) При помощи разработанной имитационной модели (рис. 3) подтверждалась правильность выбранных параметров.

В главе 2 также рассматривается нелинейная модель ИФАП в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} dy &= -\alpha_0^2[c_0 y + (1 - a c_0)g(x)]dt + f(t)dt - \alpha_0^2(1 - a c_0)\sqrt{\frac{2}{r_t}}dw, \\ dx &= [y - a g(x)]dt - a\sqrt{\frac{2}{r_t}}dw, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\xi = \frac{a}{2\alpha_0}$  - коэффициент демпфирования;  $m = c_0$  - емкостной

показатель;  $\gamma_0 = \frac{v}{\Omega^2}$  - относительная скорость поиска по частоте;  $\beta = \frac{\Omega_0}{\Omega}$  - относительное фазовое рассогласование;  $r$  - отношение сигнал/шум ОСШ;  $w_t$  - стандартный винеровский процесс;  $x(t)$  - разность фаз,  $f(t) = \gamma_0(1 + c_0\alpha_0^2 t) + c_0\alpha_0^2\beta$ .

Модель рассматривалась для двух вариантов фазового детектора:

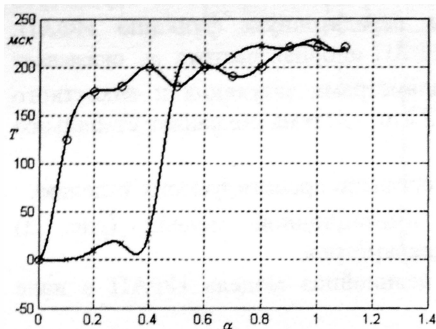
1.  $g(x) = \sin(x)$  - непрерывный фазовый детектор без токовой подкачки (ТП);
2.  $g(x) = \text{sign}(\sin(x))$  - ЧФД с ТП.

В данной модели учтено воздействие случайных процессов, возникающих в системе ИФАП. В модель заложена возможность учитывать линейную скорость поиска по частоте. Проведено математическое моделирование и получены графические результаты, описывающие работу ИФАП в режимах захвата, стационарного режима и режима биения.

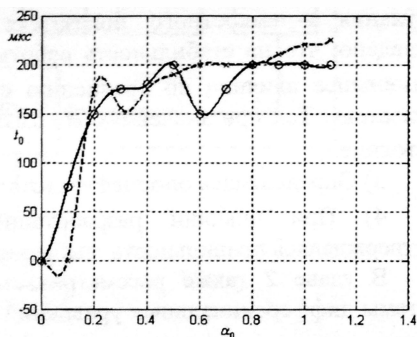
Получены результаты, характеризующие зависимости времени слежения и времени захвата (переходного процесса) от параметров кольца ИФАП (рис. 4 и 5).

На рисунке 4 штриховой линией показан результат действия токовой подкачки. Как видно из рис. 4, время переходного процесса при  $\alpha_0 > 0.6$  не превышает 250 мкс.

Проводился анализ работы системы ФАП, как в области устойчивой работы, так и в области неустойчивой работы. Особое внимание уделялось также анализу работы системы ФАП в пограничных областях.

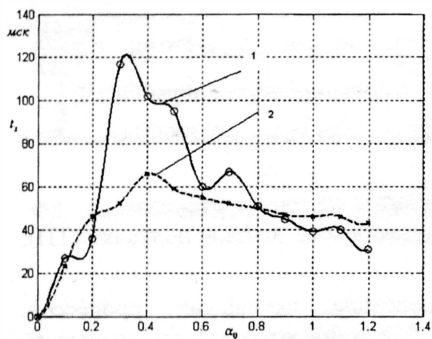


а)

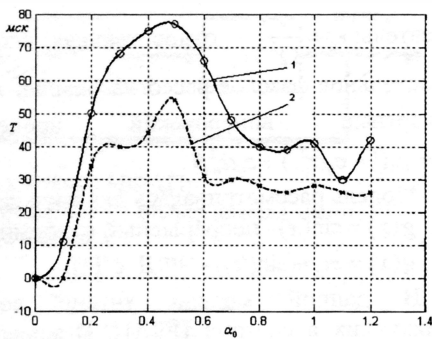


б)

Рис. 4. Зависимость времени переходного процесса (слежения) от параметра ФНЧ  $\alpha_0$  а) при значении параметра  $\alpha=0,1$ ; б) при значении параметра  $\alpha=0,4$ .



а)



б)

Рис. 5 Зависимость времени захвата от параметра ФНЧ  $\alpha_0$   
а) при значении параметра  $\alpha=0,1$ ; б) при значении параметра  $\alpha=0,4$   
1- с токовой подкачкой; 2- без токовой подкачки.

Как видно из рис. 4 и 5 применение токовой подкачки в структуре ФД значительно уменьшает время захвата порядка 20% , и увеличивает время слежения за частотой порядка 5%. Из рис. 5 видно, что время захвата максимально при  $\alpha_0 \in (0.2; 0.4)$  при  $\alpha=0.1$  и при  $\alpha_0 \in (0.4; 0.6)$  при  $\alpha=0.4$ .

В третьей главе объектом исследования являются сигма-дельта модуляторы. Математические модели сигма дельта модуляторов первого, второго и третьего порядков для анализа их частотных свойств и спектральных характеристик выходных сигналов рассматривались в виде систем дифференциальных уравнений.

Для СДМ порядка  $n$  математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dx_n(t)}{dt} &= u(t) - Mth \frac{px_0(t-\tau)}{M}; \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dx_0(t)}{dt} &= x_n(t) - Mth \frac{px_0(t-\tau)}{M}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $u(t)$  - входной анализируемый сигнал,  $M$  – уровень порогового значения дискретизатора,  $p$ - угол наклона кривой,  $\tau$  - время задержки входного сигнала.

Также были получены имитационные модели вышеуказанных модуляторов в среде Matlab Simulink (рис. 6).

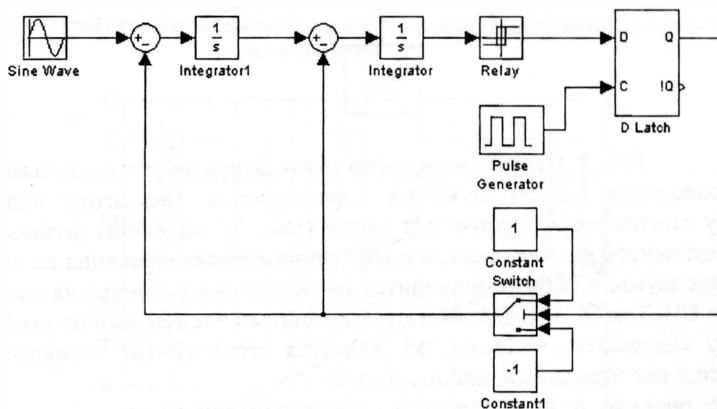


Рис. 6. Имитационная модель СДМ второго порядка в среде Matlab Simulink

Проведено математическое и имитационное моделирование работы устройств при гармоническом и постоянном входном воздействии. Полученные результаты характеризует СДМ, как устройство, переносящее шум из области низких частот в область высоких, а при постоянном входном воздействии, как устройство формирования дробности частот в выходном спектре сигнала.

Проведенные исследования показали, что применение принципов сигма дельта модуляции в структуре делителя частоты СЧ, дает возможность эффективной реализации синтезаторов с дробным коэффициентом деления. Для того чтобы увеличить дробность (уменьшить шаг сетки частот) использовались

СДМ более высоких порядков (2-го и 3-го). Наблюдалось двукратное увеличение дробности на каждый порядок СДМ. Однако, как показали исследования, это приводит к появлению в спектре выходного сигнала паразитной шумовой составляющей - около 15 дБ на каждый порядок СДМ.

Поэтому из рассмотренных моделей наиболее оптимальным модулятором по отношению к чистоте спектра выходного сигнала (без паразитных составляющих) для использования в СЧ является СДМ первого порядка.

В четвертой главе исследуются шумовые характеристики анализируемых синтезаторов частот. На рисунке 7 приведена структурная схема рассматриваемого синтезатора.

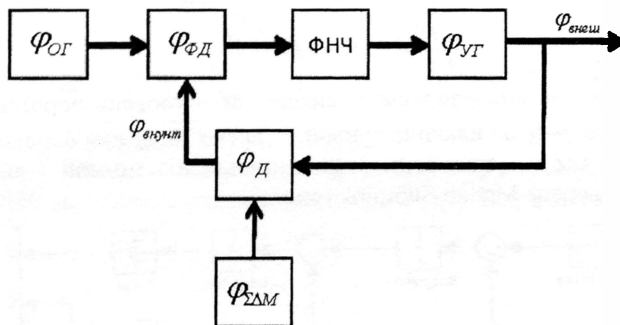


Рис. 7. Структурная схема синтезатора частот по шумам

Проводился анализ шумовых характеристик элементов, входящих в структуру синтезаторов частот. На схеме (рис. 7) выделены фазовые шумы, которые относятся и к внешним, и к внутренним. Классификация на внешние и внутренние шумы в работе приводится на основании размещения элементов в структуре СЧ. Так ОГ и СДМ, являются внешними элементами не входящими в структуру синтезатора частоты; УГ является структурным элементом СЧ, и размещается как отдельный, внешний узел.

На рисунке 8 представлены спектральные шумовые характеристики, элементов, входящих в структурную схему СЧ без учета СДМ. Как видно из рисунка 8, основным шумящим элементом является опорный генератор (ОГ).

В главе 4 также отдельно рассматривается СЧ с использованием СДМ. Для данного синтезатора проводился анализ уровня шума. На рисунке 9 представлен спектр шумов с учетом СДМ.

Как видно из рисунка 9, основным вклад вносит шум, формируемый в СДМ, что характерно выделяется всплесками в области высоких частот. Из сравнения результатов, представленных на рисунке 8, сделан вывод, что шум, формируемый в СДМ, на несколько порядков превышает уровень шума ОГ. Всплески в области высоких частот вызывают существенное паразитное отклонение фазы выходного сигнала синтезатора.

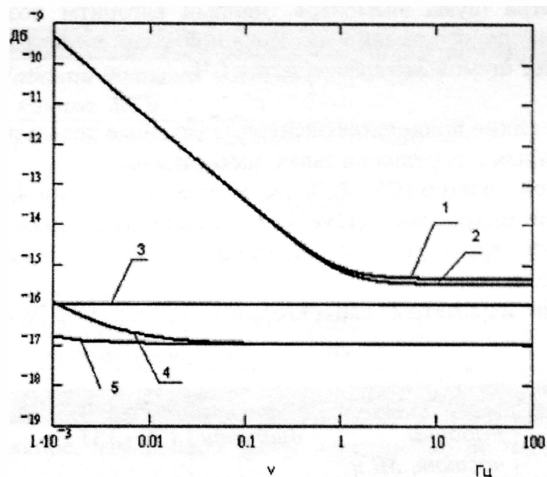


Рис. 8. Спектральные шумовые характеристики элементов:

1-Общая спектральная характеристика шумов; 2- спектральная характеристика опорного генератора; 3- спектральная характеристика делителя частоты; 4 – спектральная характеристика управляемого генератора; 5 – спектральная характеристика непрерывного фазового детектора

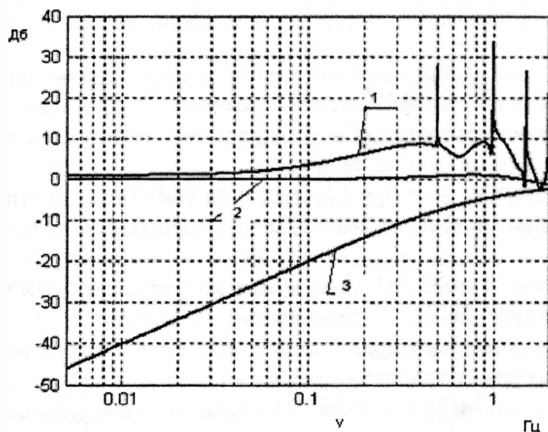


Рис. 9. 1- Итоговый фазовый шум СЧ с учетом сигма дельта модулятора; 2 – итоговый фазовый шум замкнутой системы ФАП; 3 – итоговый фазовый шум разомкнутой системы ФАП

В 4 главе рекомендуется учитывать влияние шумов, вносимых СДМ, при инженерной разработке СЧ с ДПКД на базе СДМ. Показано что шумами, возникающими в остальных, внешних элементах, можно пренебрегать, в силу их низкого уровня (порядка -150 Дб).

Для более точного расчета шумовых характеристик СЧ, предлагается использовать алгоритм расчета ПОФ и ПОЧ, на основе кусочно-линейных

участков спектра шума элементов. Данный алгоритм позволил определить уровень шума непосредственно для заданной полосы частот, что существенно упрощает расчет шумовых характеристик СЧ.

В пятой главе приводятся экспериментальные результаты, лабораторных СЧ, разработанных для решения задач диссертации.

Первый синтезатор (СЧ №1), рассмотренный в данной главе, реализован на интегральной микросхеме (ИМС) отечественного производства КН1015ПЛ5 и имеет в своей структуре делитель частоты с ДПКД, управляемый внешним сдвиговым регистром.

Основные параметры лабораторного макета СЧ №1 представлены в таблице 1.

Таблица 1

| № | Параметр                         | Значение          |
|---|----------------------------------|-------------------|
| 1 | Рабочий диапазон частот, МГц     | 129 - 131         |
| 2 | Минимальный шаг частотной сетки  | 1кГц              |
| 3 | Частота опорного генератора, МГц | (500 Гц) - 3.5МГц |
| 4 | Время перестройки, мс            | 20                |
| 5 | Ток потребления, мА              | 50                |

Представленный лабораторный макет имеет аналоговый интерфейс управления: установка коэффициента деления, установка частоты ОГ, установка центральной частоты УГ. ДПКД выполнен на цифровых элементах. Синтезатор имеет один выходной канал.

Уровень фазовых шумов при отстройке на 100 кГц от несущей составляет – 110 дБ/Гц. Минимальное, измеренное время перестройки по частотной сетки, составляет 200мкс.

Второй синтезатор (СЧ №2) реализован на импортной ИМС SKY72300 и имеет в своей структуре ДПКД, управляемый СДМ.

Представленный лабораторный макет является синтезатором частоты с цифровым управлением. Управление режимами работы СЧ выполнено на базе микроконтроллера ATMEGA 8535. Установка коэффициента деления производится непосредственно через регистр управления синтезатора частоты. Для управления работой СЧ предусмотрены дополнительные переключатели.

Синтезатор имеет два выходных канала, продублированных на несколько выходов.

Основные параметры лабораторного макета СЧ №2 представлены в таблице 2.

Таблица 2

| № | Параметр                                   | Значение  |
|---|--------------------------------------------|-----------|
| 1 | Рабочий диапазон частот 1 канала, МГц      | 150 - 280 |
| 2 | Рабочий диапазон частот 2 – го канала, МГц | 200 - 380 |
| 2 | Минимальный шаг частотной сетки            | 200Гц     |
| 3 | Частота опорного генератора, МГц           | 5         |
| 4 | Время перестройки, мкс                     | 200       |
| 5 | Ток потребления, мА                        | 100       |

Уровень фазовых шумов при отстройке на 100кГц от несущей составляет -80дБ/Гц. Минимальное, измеренное время перестройки по частотной сетки, составляет 100мкс.

Оба синтезатора имеют в своей структуре систему ИФАП с ЧФД и кольцевым фильтром второго порядка.

На основании полученных результатов был проведен сравнительный анализ двух рассмотренных ИМС и сделаны следующие выводы:

1. Синтезатор, построенный на основе ИМС SKY72300, имеет меньшее энергопотребление по сравнению с синтезатором на основе КН1015ПЛ15.
2. Синтезатор, построенный на основе ИМС КН1015ПЛ15, имеет более чистую спектральную составляющую выходного сигнала.

### Основные результаты и выводы

1. Исходя из цели и задач диссертации был осуществлен выбор рациональной структуры СЧ-ИФАП, которая должна включать в себя: одно кольцо системы ИФАП (для упрощения схемной реализации и улучшения массо – габаритных показателей), фильтр нижних частот второго порядка в кольце ФАП (для уменьшения эффекта неустойчивости фазы), ДПКД (для упрощения схемной реализации и возможности создания сетки частот), СДМ 1-го порядка (для управления ДПКД, выполнения оптимального критерия: мелкий шаг сетки частот/ отсутствие помех дробности в спектре передаваемого сигнала, а также улучшения массо-габаритных характеристик СЧ), ЧФД (детектор с токовой подкачкой, для сокращения времени переходных процессов).

2. Выбраны рациональные параметры СЧ-ИФАП, оптимизация которых проводилась по критериям: минимизации времени переходных процессов, условий существования устойчивых режимов работы, отсутствия передискретизации, минимизации шумового вклада составляющих СЧ устройств, улучшения точностных характеристик частотного диапазона (создания более мелкой сетки частот).

3. Сделан вывод о наибольшем вкладе СДМ в шумовую характеристику СЧ-ИФАП.

4. В процессе проведенных исследований, с использованием Matlab Simulink, создан ряд имитационных моделей, таких как: модель токового детектора, модель сигма-дельта модулятора, модель кольца ФАП с токовым детектором, модель СЧ с СДМ в цепи обратной связи.

5. Проведенное полунатурное моделирование подтвердило правильность аналитических выводов и выводов, сделанных путем анализа математических и имитационных моделей.

**Основные результаты диссертации представлены в следующих работах:**

1. Синтезаторы частот: Учебное пособие / Б.И. Шахтарин [и др.] М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 153с.
2. Зайцев А.В., Быков А.А., Трифонов Н.М. Синтезатор частот косвенного синтеза // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана, Приборостроение, 2006. №4. С. 72- 81.
3. Шахтарин Б.И., Быков А.А. Сигма дельта модулятор // Научный вестник МГТУ ГА, 2010. № 158. С. 156 – 161.
4. Быков А.А., Сидоркина Ю.А., Ковальчук А.А. Применение сигма-дельта модуляторов в дробных синтезаторах частоты // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Приборостроение, 2011. №2. С. 52-61.
5. Шахтарин Б.И., Быков А.А., Ковальчук А.А. Анализ сигма – дельта модулятора // Наука и образование: Электронное научное издание, 2012. №1.
6. Шахтарин Б.И. Быков А.А. Рабочие характеристики приемников ЧМ сигналов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Приборостроение, 2007. №3. С. 43-51.
7. Шумовые характеристики синтезаторов частот: Отчет по теме «Синхронизация в радиосвязи и радионавигации» СМ-2-285 / НИИ СМ. МГТУ. Руководитель темы Б.И. Шахтарин Исполнители Быков А.А. [и др.] ГР 01.200710182, М., 2007. 285с.
8. Рязанова М.А., Иванов А.А., Быков А.А. Статистический анализ дискретной системы синхронизации 2-го порядка в условиях комбинированных воздействий // Научный Вестник МГТУ ГА. 2007. №117. С.160 – 169.
9. Трифонов Н.М., Быков А.А. Модель фазовой автоподстройки в форме расширенного фильтра Калмана // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана, Приборостроение, 2006. №1. С. 50- 57.
10. Шахтарин Б.И., Кобылкина П.И., Быков А.А. Извлечение информации из хаотического сигнала с использованием методов реконструкции динамических систем // 61-ая научная сессия, посвященная Дню радио: Сборник трудов; В 2 т. Москва, 2006. Т.2. С.353 – 355.