

На правах рукописи



Якименко Кирилл Александрович

**ГИБРИДНЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ ЧАСТОТ С НИЗКИМ УРОВНЕМ
ФАЗОВЫХ ШУМОВ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2018

Работа выполнена на кафедре радиотехники Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Научный руководитель: **Ромашов Владимир Викторович,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром.

Официальные оппоненты: **Ямпурин Николай Петрович,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и технологии радиоэлектронных средств Арзамасского политехнического института (филиала) ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», г. Арзамас.

Прохоров Иван Сергеевич,
кандидат технических наук, начальник лабораторного сектора ОАО «Владимирское конструкторское бюро радиосвязи», г. Владимир.

Ведущая организация: АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов», г. Муром.

Защита диссертации состоится «5» июня 2018 года в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ.

Тел./факс: (4922) 479960

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу:
600000, Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, каф. РТ и РС.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан 30 марта 2018 г.

Ученый секретарь совета
доктор технических наук, профессор



А. Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Синтезаторы частот – это важнейшие элементы практически любой радиосистемы. Наиболее распространенными в настоящее время являются *прямой метод* синтеза частот (в свою очередь разделяющийся на прямой аналоговый и прямой цифровой) и *косвенный метод* синтеза частот. Синтезаторы прямого аналогового метода синтеза обеспечивают малый шаг и высокую скорость перестройки частоты, но наряду с этим имеют значительные массогабаритные показатели. В выходном сигнале синтезаторов косвенного метода синтеза (на основе систем фазовой автоподстройки частоты – ФАПЧ) практически отсутствуют дискретные побочные составляющие спектра (ПСС), но такие синтезаторы имеют относительно большой шаг перестройки частоты, уменьшение которого ведет к росту фазовых шумов. С 1970-х годов широко распространяются синтезаторы прямого цифрового метода синтеза – цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС). Данные синтезаторы обеспечивают очень малый шаг перестройки частоты; но их максимальная выходная частота на сегодняшний день не превышает 1500 МГц, и спектр содержит большое количество дискретных ПСС (образы, гармоники и субгармоники основной частоты, а также негармонические составляющие). Вопросам исследования и развития методов синтеза частот посвятили работы отечественные ученые: Ю.И. Алехин, Л.А. Белов, Ю.К. Богатырев, В.Н. Кочемасов, В.Н. Кулешов, В.А. Левин, В.Н. Попов, В.В. Ромашов, А.В. Рыжков, И.В. Рябов, Д.Н. Шапиро, В.В. Шахгильдян, Н.П. Ямпурин и др.; а также зарубежные исследователи: A. Chenakin, V.F. Kroupa, D.B. Leeson, V. Manassevich, U.L. Rohde, J. Vankka и др.

Существенно снизить влияние недостатков вышеназванных синтезаторов позволяет гибридный метод синтеза. Суть данного метода заключается в том, что синтезатор частот, построенный по одному из методов синтеза, совершенствуется путем введения в его структуру элементов из синтезаторов частот, построенных по другому методу синтеза. Вследствие этого влияние недостатков, присущих одним синтезаторам, снижается за счет достоинств других. Одними из наиболее

перспективных являются гибридные синтезаторы частот на основе косвенного метода синтеза (ФАПЧ) и прямого цифрового метода синтеза (цифровых вычислительных синтезаторов), обеспечивающие малый шаг перестройки частоты и широкий диапазон выходных частот. Тем не менее, их уровень фазовых шумов значителен, поскольку является прямо пропорциональным квадрату коэффициента деления в цепи обратной связи.

Уровень фазовых шумов выходного сигнала синтезаторов частот оценивается спектральной плотностью мощности (СПМ) фазовых шумов $S(F)$ в зависимости от частоты отстройки F . Для теоретического исследования шумовых характеристик используются математические модели СПМ фазовых шумов, представленные в виде степенных полиномов. Такие модели разработаны D.B. Leeson, V.F. Kroupa, E. Drucker, A.B. Рыжковым, В.Н. Кулешовым, В.В. Ромашовым и другими авторами для генераторов частот, синтезаторов на основе ФАПЧ и их составных звеньев: фазовых дискриминаторов, умножителей и делителей частот, усилителей и смесителей, а также для цифровых вычислительных синтезаторов и некоторых частных случаев гибридных синтезаторов частот.

Однако экспериментально подтвержденные математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов гибридных синтезаторов частот практически отсутствуют, в связи с этим результатов теоретического анализа шумовых характеристик с целью определения возможности снижения уровня фазовых шумов таких синтезаторов частот в литературе представлено недостаточно.

Целью диссертационной работы является снижение уровня фазовых шумов гибридных синтезаторов частот на основе ФАПЧ и цифровых вычислительных синтезаторов.

Поставленная цель предполагает решение следующих задач:

1. Разработать и экспериментально подтвердить математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов гибридных синтезаторов на основе ФАПЧ и цифровых вычислительных синтезаторов, исследовать с их

помощью возможности снижения уровня фазовых шумов гибридных синтезаторов;

2. Предложить схемы гибридных синтезаторов частот на основе ФАПЧ и цифровых вычислительных синтезаторов с пониженным уровнем фазовых шумов.

3. Разработать и экспериментально подтвердить математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов гибридных синтезаторов с пониженным уровнем фазовых шумов.

4. Разработать алгоритмы частотного планирования предложенных гибридных синтезаторов, обеспечивающие выбор параметров синтезаторов для достижения наименьшего уровня фазовых шумов выходного сигнала. На основе предложенных алгоритмов автоматизировать проектирование гибридных синтезаторов частот, моделирование, сравнение и исследование их шумовых характеристик.

Объект исследования – гибридные синтезаторы частот.

Предмет исследования – шумовые характеристики гибридных синтезаторов частот.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы спектрального анализа, методы математического моделирования и описания систем радиоавтоматики, методы экспериментального исследования и компьютерного моделирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– разработаны и экспериментально подтверждены математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов гибридных синтезаторов частот на основе ФАПЧ и цифровых вычислительных синтезаторов, отличающиеся тем, что в них учитываются шумовые характеристики цифровых вычислительных синтезаторов;

– впервые предложено использовать копии спектра основной частоты цифрового вычислительного синтезатора в гибридных синтезаторах частот с целью снижения уровня фазовых шумов, и разработаны структурные схемы таких гибридных синтезаторов;

– впервые разработаны и экспериментально подтверждены математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов гибридных синтезаторов, использующих копии спектра основной частоты цифрового вычислительного синтезатора;

– разработаны алгоритмы частотного планирования предлагаемых гибридных синтезаторов, позволяющие определять комбинации параметров данных синтезаторов для формирования заданных выходных частот и производить выбор тех параметров, которые обеспечивают наименьший уровень фазовых шумов выходного сигнала.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

– разработанные и экспериментально подтвержденные математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов гибридных синтезаторов позволяют на стадии проектирования провести оценку шумовых характеристик разрабатываемых устройств;

– предложенная схема гетеродина на основе гибридного синтезатора, использующего копии спектра основной частоты цифрового вычислительного синтезатора, обеспечивает малый шаг перестройки частоты (доли Гц), широкий диапазон выходных частот (до 10 октав) и низкий уровень фазовых шумов (выигрыш до 18 дБ перед малошумящими гетеродинами современных анализаторов спектра);

– предложенные алгоритмы и модели шумовых характеристик использованы при разработке программного комплекса, позволяющего провести частотное планирование гибридных синтезаторов частот на основе ФАПЧ и цифровых вычислительных синтезаторов, моделирование, сравнение и исследование их шумовых характеристик.

Степень достоверности результатов работы обеспечивается применением апробированной методики анализа шумовых характеристик. Предложенные модели спектральной плотности мощности фазовых шумов гибридных

синтезаторов адекватны характеристикам реальных устройств, полученным в результате натуральных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные и экспериментально подтвержденные математические модели шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе ФАПЧ и цифровых вычислительных синтезаторов позволяют теоретически оценивать уровень фазовых шумов таких синтезаторов для любых опорных и выходных частот.

2. Применение копий спектра основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов в гибридных синтезаторах частот позволяет уменьшить коэффициент деления в цепи обратной связи петли ФАПЧ и, тем самым, снизить уровень фазовых шумов гибридных синтезаторов на 10–18 дБ.

3. Предложенные алгоритмы частотного планирования разработанных гибридных синтезаторов, позволяют определять комбинации параметров данных синтезаторов для формирования заданных выходных частот и производить выбор тех параметров, которые обеспечивают наименьший уровень фазовых шумов выходного сигнала.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: V–IX Всероссийских научных Зворыкинских чтениях (Муром, 2013–2017); Всероссийской конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2014 г.); 24-ой Международной IEEE Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2014 г.); III Всероссийской конференции «Радиолокационная техника: устройства, станции, системы РЛС-2015» (Муром, 2015 г.); XI-ой и XII-ой международных научных конференциях «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (Суздаль, 2015 г., 2017 г.); XI-ой Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи (Омск, 2015 г.); X-ой Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2016 г.); XV-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2016 г.);

VII-ой Всероссийской конференции «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (Москва, 2017 г.).

Публикации. По тематике исследований опубликовано 30 работ, из них 6 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ; 4 статьи в рецензируемых научных журналах; 3 публикации в сборниках трудов, индексируемых Scopus; 14 тезисов докладов на Международных и Всероссийских научно-практических конференциях. Получен патент на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в исследования по НИОКР при разработке формирователей сигналов радиосистем на АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов» (концерн ВКО «Алмаз-Антей»); внедрены в учебный процесс кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» при проведении занятий по курсу «Цифровые синтезаторы частот»; использованы при выполнении гранта администрации Владимирской области (2015 г.) и гранта РФФИ №16-37-00299 мол_а (2016-2017 гг.), в которых автор является руководителем.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложения. Общий объем работы составляет 158 страниц машинописного текста, включая 67 рисунков и 19 таблиц. Список литературы содержит 145 наименований, в том числе 30 работ автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы. Сформулированы цель и задачи работы. Обоснована актуальность цели, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе проведен обзор отечественной и зарубежной литературы, посвященной методам синтеза частот, выявлены достоинства и недостатки современных синтезаторов частот, построенных по данным методам. Определено,

что наиболее активно в современных радиосистемах используются гибридные синтезаторы на основе цифровых вычислительных синтезаторов и прямого аналогового метода синтеза, а также гибридные синтезаторы на основе ФАПЧ и цифровых вычислительных синтезаторов, которые (в зависимости от расположения ЦВС в структуре системы ФАПЧ) делятся на: синтезаторы с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ, синтезаторы с ЦВС в цепи обратной связи ФАПЧ, синтезаторы с ЦВС в качестве генератора подставки ФАПЧ и синтезаторы на основе ЦВС и двухкольцевой ФАПЧ.

Рассмотрена методика математического моделирования спектральной плотности мощности фазовых шумов синтезаторов частот. Из литературы определены математические модели шумовых характеристик: генераторов опорных частот $S_{ГОЧ}(F)$, цифровых вычислительных синтезаторов $S_{ЦВС}(F)$, а также звеньев системы ФАПЧ (фазовых дискриминаторов $S_{ФД}(F)$, генераторов, управляемых напряжением $S_{ГУН}(F)$, петлевых ФНЧ $S_{ФНЧ}(F)$, умножителей частот $S_{УЧ}(F)$, делителей частот $S_{ДЧ}(F)$, смесителей частот $S_{СМ}(F)$, усилителей $S_{У}(F)$).

В соответствии с выводами по первой главе актуальными представляются задачи исследования возможностей снижения уровня фазовых шумов гибридных синтезаторов частот на основе ФАПЧ и цифровых вычислительных синтезаторов и разработки схем гибридных синтезаторов с пониженным уровнем фазовых шумов.

Во второй главе составлены эквивалентные схемы основных типов гибридных синтезаторов частот (ГСЧ) со всеми источниками фазовых шумов. На основе схем разработаны математические модели шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе ФАПЧ и цифровых вычислительных синтезаторов:

– *гибридного синтезатора частот с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ:*

$$S_{ГСЧ\text{ ог}}(F) = [S_{ГОЧ}(F)K_{ЦВС}^2 + S_{ЦВС}(F) + S_{ФД}(F) + S_{ФНЧ}(F) + S_{ДЧ2}(F)] \cdot |H_{310Г}(j2\pi F)|^2 + S_{ГУН}(F) \cdot |H_{320Г}(j2\pi F)|^2, \quad (1)$$

где $H_{310Г}(j2\pi F) = N_{20Г} \left(\frac{H_{10Г}(j2\pi F)}{1 + H_{10Г}(j2\pi F)} \right)$ – передаточная функция кольца ФАПЧ по

внешним шумам, $H_{320Г}(j2\pi F) = \frac{1}{1 + H_{10Г}(j2\pi F)}$ – передаточная функция кольца

ФАПЧ по внутренним шумам (далее определяется аналогично для других схем),

$H_{10Г}(j2\pi F) = \frac{1}{N_{20Г}} \left(\frac{F_{ФНЧ}(j2\pi F) s_{ФД} s_{ГУН}}{j2\pi F} \right)$ – передаточная функция разомкнутого

кольца ФАПЧ, $F_{ФНЧ}(j2\pi F)$ – передаточная функция ФНЧ,

$s_{ФД}$ – крутизна дискриминационной характеристики ФД, $s_{ГУН}$ – крутизна

регулирующей характеристики ГУН, $N_{20Г}$ – коэффициент деления делителя в

цепи обратной связи гибридного синтезатора, $K_{ЦВС}$ – коэффициент передачи

цифрового вычислительного синтезатора;

– гибридного синтезатора частот с ЦВС в цепи обратной связи ФАПЧ:

$$S_{ГСЧ\text{ }ОС}(F) = \left[\frac{S_{ГОЧ}(F)}{N_{10С}^2} + S_{ДЧ1}(F) + S_{ФД}(F) + S_{ФНЧ}(F) + S_{ЦВС}(F) + \right. \\ \left. + S_{ДЧ2}(F) \right] \cdot |H_{310С}(j2\pi F)|^2 + S_{ГУН}(F) \cdot |H_{320С}(j2\pi F)|^2, \quad (2)$$

где $H_{310С}(j2\pi F) = \frac{N_{20С}}{K_{ЦВС}} \left(\frac{H_{10С}(j2\pi F)}{1 + H_{10С}(j2\pi F)} \right)$, $H_{10С}(j2\pi F) = \frac{K_{ЦВС}}{N_{20С}} \left(\frac{F_{ФНЧ}(j2\pi F) s_{ФД} s_{ГУН}}{j2\pi F} \right)$,

$N_{10С}$, $N_{20С}$ – коэффициенты деления делителей гибридного синтезатора;

– гибридного синтезатора частот с ЦВС в качестве генератора подставки

ФАПЧ:

$$S_{ГСЧ\text{ }ГП}(F) = \left[\frac{S_{ГОЧ}(F)}{N_{1ГП}^2} + S_{ДЧ1}(F) + S_{ФД}(F) + S_{ФНЧ}(F) + S_{ДЧ2}(F) + \frac{1}{N_{2ГП}^2} \cdot [S_{СМ} + \right. \\ \left. + K_{ЦВС}^2 \cdot (S_{ГОЧ}(F) \cdot n_1^2 + S_{УЧ}(F)) + S_{ЦВС}(F) \right] \cdot |H_{31ГП}(j2\pi F)|^2 + S_{ГУН}(F) \cdot |H_{32ГП}(j2\pi F)|^2, \quad (3)$$

где $H_{31ГП}(j2\pi F) = N_{2ГП} N_{3ГП} \left(\frac{H_{1ГП}(j2\pi F)}{1 + H_{1ГП}(j2\pi F)} \right)$, $H_{1ГП}(j2\pi F) = \frac{1}{N_{2ГП} N_{3ГП}} \left(\frac{F_{ФНЧ}(j2\pi F) s_{ФД} s_{ГУН}}{j2\pi F} \right)$,

$N_{1ГП}$, $N_{2ГП}$, $N_{3ГП}$ – коэффициенты деления делителей гибридного синтезатора;

– гибридного синтезатора частот на основе ЦВС и двухкольцевой ФАПЧ:

$$S_{ГСЧ ДК}(F) = \left[\frac{S_{ГОЧ}(F)}{N_{1ДК}^2} + S_{ДЧ1}(F) + S_{ФД1}(F) + S_{ФНЧ1}(F) + S_{ДЧ2}(F) + \right. \\ \left. + \frac{1}{N_{2ДК}^2} (S_{СМ}(F) + S_{2К}(F)) \right] \cdot |H_{311}(j2\pi F)|^2 + S_{ГВН1}(F) \cdot |H_{321}(j2\pi F)|^2, \quad (4)$$

где $S_{2К}(F) = \left[(S_{ГОЧ}(F) + S_{ДЧ1}(F)) \cdot n_{1ДК}^2 + S_{ВЧ}(F) \right] \cdot K_{ЦВС}^2 + S_{ЦВС}(F) + S_{ФД2}(F) + S_{ФНЧ2}(F) + S_{ДЧ3} \cdot |H_{312}(j2\pi F)|^2 + S_{ГВН2}(F) \cdot |H_{322}(j2\pi F)|^2$ – математическая модель шумовых характеристик второго кольца ФАПЧ, $N_{1ДК}$, $N_{2ДК}$, $N_{3ДК}$ – коэффициенты деления делителей частоты гибридного синтезатора.

Для каждого гибридного синтезатора по разработанным моделям было проведено исследование вкладов звеньев в результирующие уровни спектральной плотности мощности фазовых шумов, определены звенья, вносящие наибольший вклад. На рисунке 1 представлены результаты сравнения шумовых характеристик гибридных синтезаторов для аналогичных значений частот ($f_{ГОЧ} = 100$ МГц, $f_{СР} = 10$ МГц, $f_{ВЫХ} = 3100$ МГц), в соответствии с которыми наибольшим уровнем фазовых шумов обладает гибридный синтезатор частот с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ за счет большого значения коэффициента деления в

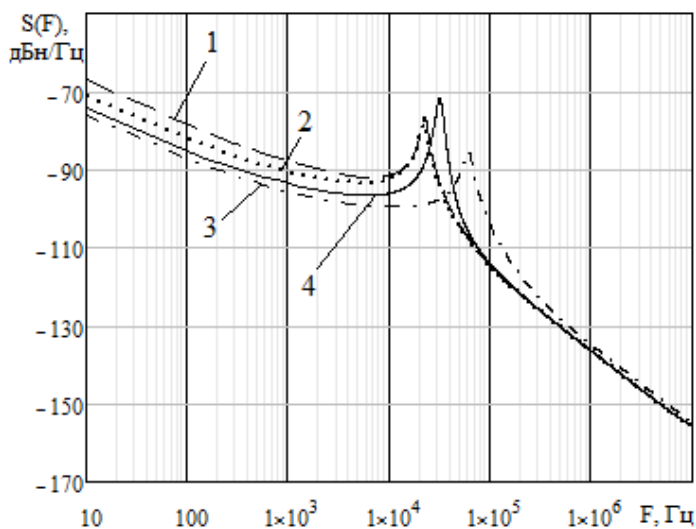


Рисунок 1 – Сравнение СПМ фазовых шумов гибридных синтезаторов частот на основе ФАПЧ и ЦВС (1 – ГСЧ с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ; 2 – ГСЧ частот с ЦВС в цепи обратной связи ФАПЧ; 3 – ГСЧ с ЦВС в качестве генератора подставки ФАПЧ;

цепи обратной связи ($N_{2ОГ} = 310$). Уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов гибридного синтезатора частот с ЦВС в цепи обратной связи ФАПЧ меньше (несмотря на такое же значение эквивалентного коэффициента деления $N_{2ОС}/K_{ЦВС}=310$), из-за того что ЦВС вносит меньший вклад в результирующий уровень СПМ фазовых шумов. Минимальным коэффициентом деления в цепи

обратной связи ($N_{2ДК} = 154$) обладает гибридный синтезатор частот на основе ЦВС и двухкольцевой ФАПЧ, тем не менее, уровень его шумов больше, чем уровень шумов гибридного синтезатора с ЦВС в качестве генератора подставки ФАПЧ ($N_{2ПП} = 170$), поскольку второе кольцо ФАПЧ, логически представляющееся как умножитель выходной частоты ЦВС, вносит существенный вклад в результирующий уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов.

Сделан вывод, что для того, чтобы снизить уровень фазовых шумов гибридного синтезатора частот на основе ФАПЧ и цифровых вычислительных синтезаторов, необходимо уменьшить коэффициент деления в цепи обратной связи за счет увеличения выходной частоты цифрового вычислительного синтезатора до значения, соизмеримого с выходной частотой гибридного синтезатора. При этом цифровой вычислительный синтезатор с увеличенной частотой не должен вносить существенный вклад в результирующий уровень фазовых шумов выходного сигнала гибридного синтезатора.

Разработан экспериментальный стенд на современных микросхемах ADF4113HV (ФАПЧ с импульсным частотно-фазовым детектором) и AD9910 (ЦВС), на котором были реализованы рассматриваемые гибридные синтезаторы частот. На рисунках 2, 3 представлены результаты моделирования шумовых характеристик гибридных синтезаторов по (1), (2) и их сравнение с экспериментально полученными шумовыми характеристиками (при $f_{CP} = 1$ МГц;

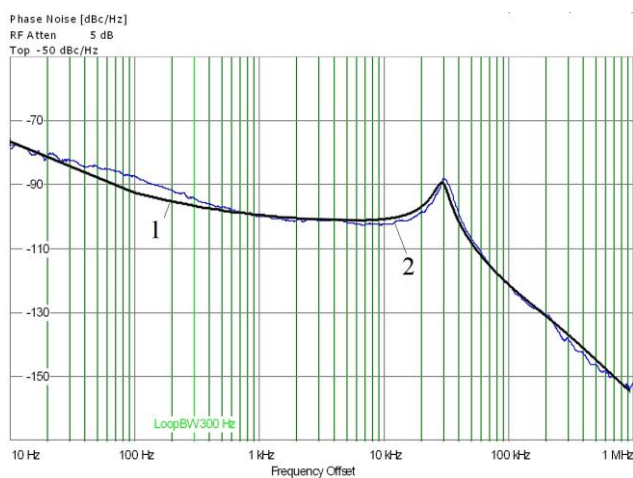


Рисунок 2 – СПМ фазовых шумов ГСЧ с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ (1 – модель (1), 2 – эксперимент)

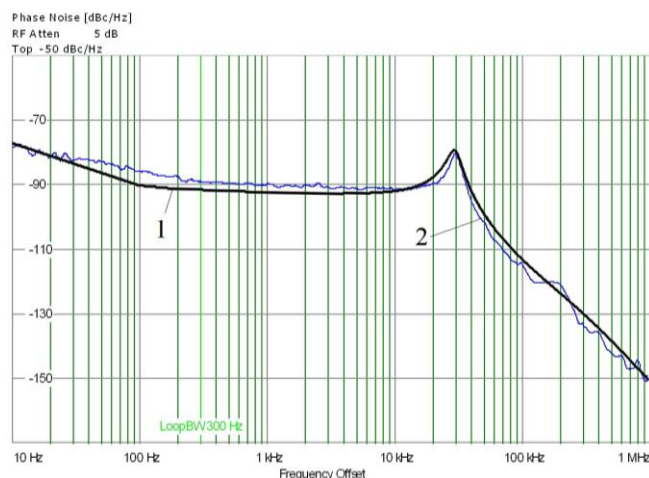


Рисунок 3 – СПМ фазовых шумов ГСЧ с ЦВС в цепи обратной связи ФАПЧ (1 – модель (2), 2 – эксперимент)

$f_{ВЫХ} = 300$ МГц). Как видно из рисунков, разработанные математические модели шумовых характеристик позволяют проводить моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот с точностью до 4 дБ.

В третьей главе для снижения уровня фазовых шумов гибридных синтезаторов частот на основе ФАПЧ и цифровых вычислительных синтезаторов предлагается использовать копии спектра (образы, от англ. – images) основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов

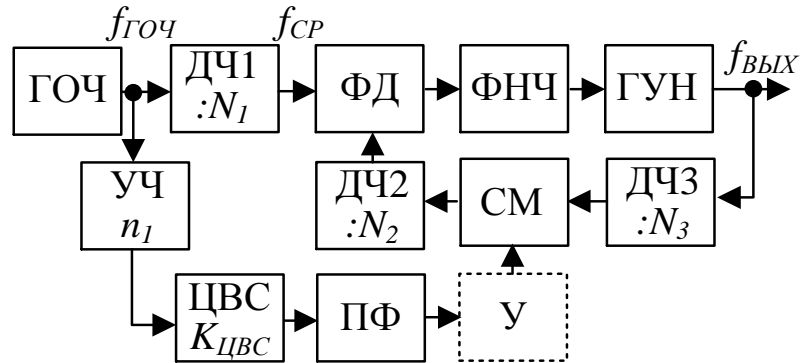


Рисунок 4 – Структурная схема ГСЧ, использующего образы основной частоты ЦВС (ГОЧ – генератор опорной частоты, ЦВС – цифровой вычислительный синтезатор, ФД – фазовый дискриминатор, ГУН – генератор, управляемый напряжением, ДЧ1, ДЧ2, ДЧ3 – делители частоты, УЧ – умножитель частоты, СМ – смеситель, У – усилитель)

синтезаторов (дискретные побочные составляющие спектра выходного сигнала ЦВС, проявляющиеся как результат преобразования цифрового сигнала в синусоиду) с частотами $f_{ОБР} = |n \cdot f_T + f_{ЦВС}|$, где f_T – тактовая частота ЦВС, $f_{ЦВС}$ – основная частота ЦВС, $n = -n_{max}, \dots -2, -1, 1, 2, \dots n_{max}$ – номер образа.

Разработана обобщенная схема гибридного синтезатора, использующего образы основной частоты цифрового вычислительного синтезатора (рисунок 4). Сигнал с частотой требуемого образа выделяется в полосовом фильтре ПФ и усиливается в усилителе У. Применение образов позволяет существенно увеличить выходную частоту ЦВС и, тем самым, уменьшить коэффициент деления в цепи обратной связи. Выходная частота гибридного синтезатора определяется

$$f_{ВЫХ} = f_{ГОЧ} N_3 \left(\frac{N_2}{N_1} + n_1 (n + K_{ЦВС}) \right). \quad (5)$$

Разработана математическая модель шумовых характеристик гибридного синтезатора, использующего образы основной частоты ЦВС:

$$S_{ГСЧобр}(F) = \left[\frac{S_{ГОЧ}(F)}{N_1^2} + S_{ДЧ1}(F) + S_{ФД}(F) + S_{ФНЧ}(F) + S_{ДЧ2}(F) + \frac{1}{N_2^2} \cdot [S_{СМ} + \right. \\ \left. + (n + K_{ЦВС}) \cdot (S_{ГОЧ}(F) \cdot n_1^2 + S_{УЧ}(F)) + S_{ЦВСобр}(F) + S_{ПФ}(F) + S_{У}(F) \right] \times \\ \times |H_{31}(j2\pi F)|^2 + S_{ГУН}(F) \cdot |H_{32}(j2\pi F)|^2, \quad (6)$$

$$\text{где } H_{31}(j2\pi F) = \frac{H_1(j2\pi F)N_2N_3}{1 + H_1(j2\pi F)}, \quad H_1(j2\pi F) = \frac{1}{N_2N_3} \left(\frac{F_{ФНЧ}(j2\pi F)s_{ФД}S_{ГУН}}{j2\pi F} \right).$$

Разработаны алгоритмы частотного планирования гибридного синтезатора, использующего образы основной частоты ЦВС, которые на основе заданных значений опорной и выходной частот (или диапазона выходных частот) позволяют рассчитать все комбинации параметров гибридного синтезатора (номера образов, коэффициенты деления и умножения и соответствующие им коэффициенты передачи ЦВС) для формирования заданных частот и выбрать те параметры, при которых гибридный синтезатор обеспечивает наименьший уровень фазовых шумов выходного сигнала. Этапы алгоритма частотного планирования для формирования одночастотного сигнала:

1. Задаются исходные значения: частота ГОЧ (опорная частота) $f_{ГОЧ}$; частота сравнения в ФД $f_{СР}$; выходная частота гибридного синтезатора $f_{ГСЧ}$.

2. Рассчитывается значение коэффициента деления ДЧ1 $N_1 = f_{ГОЧ} / f_{СР}$.

3. Рассчитывается коэффициент N_3 (значение увеличивается $N_3 = 1, 2 \dots$ до выполнения условия: $f_{ГСЧ} \leq N_3 f_{ГОЧ} n_1 (n_{max} + K_{ЦВС max})$).

4. По (5) рассчитываются значения выходной частоты гибридного синтезатора при всех возможных целочисленных значениях

коэффициента умножения $n_1 = 1 \dots trunc\left(\frac{f_{Г max}}{f_{ГОЧ}}\right)$, коэффициента деления

$N_2 = 1 \dots trunc\left(\frac{f_{ГУН} - f_{ГОЧ} K_{ЦВС min}}{f_{СР}}\right)$, значениях номеров образов n и

коэффициента передачи ЦВС $K_{ЦВС}$ ($trunc(\)$ – это функция выделения целой части числа).

Для каждого рассчитанного значения $f_{ВВЛХ}$ выполняется проверка $f_{ВВЛХ} = f_{ГСЧ}$, при «истинности» которой, значения n_1 , N_2 , n , $K_{ЦВС}$ записываются в массив данных Par . Массив данных Par представляет собой набор комбинаций параметров, при установке любой из которых гибридный синтезатор будет формировать сигнал с заданной частотой.

5. Параметры из массива Par поочередно подставляются в модель (6), и рассчитываются значения спектральной плотности мощности фазовых шумов для заданных значений отстроек от несущей (F_1, F_2, \dots, F_j). Получившиеся значения и параметры, при которых они были рассчитаны, записываются в массив SGS .

6. В массиве SGS происходит сравнение значений спектральной плотности мощности фазовых шумов и выбор наименьших значений с соответствующими им параметрами. Конец алгоритма.

На рисунке 5 представлено сравнение результатов моделирования по (3) и (6), а также экспериментально полученных шумовых характеристик гибридного синтезатора с ЦВС в качестве генератора подставки ФАПЧ и гибридного синтезатора, использующего образы основной частоты ЦВС с разными номерами, реализованных на стенде (описанном в главе 2). Применение образов с номерами до $n = -3$ обеспечивает малое значение коэффициента деления (до $N_2 = 25$), что приводит к выигрышу по уровню фазовых шумов перед гибридным синтезатором с ЦВС в качестве генератора

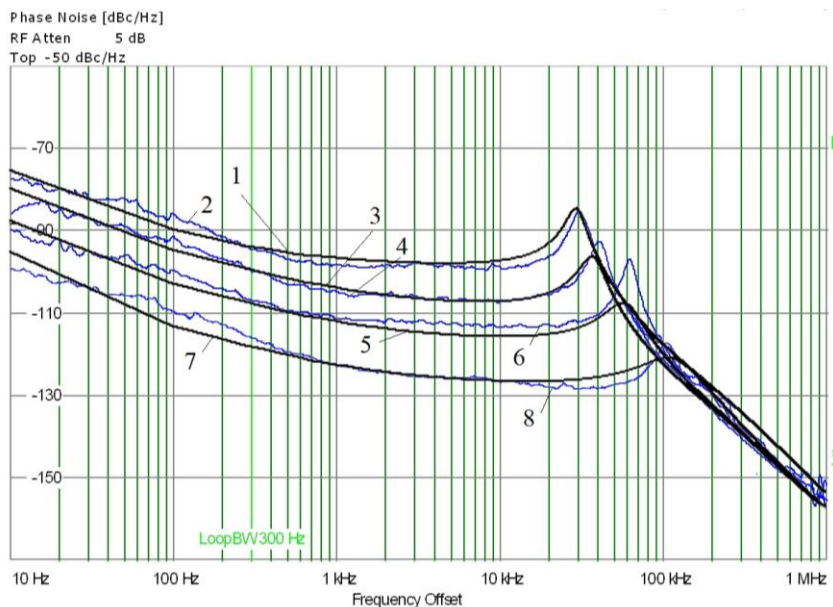


Рисунок 5 – СПМ фазовых шумов ГСЧ с ЦВС в качестве генератора подставки (1 – модель (3), 2 – эксперимент) и ГСЧ, использующего образы основной частоты ЦВС при $n = 1$ (3 – модель (6), 4 – эксперимент), при $n = 2$ (5 – модель (6), 6 – эксперимент), при $n = -3$ (7 – модель (6), 8 – эксперимент)

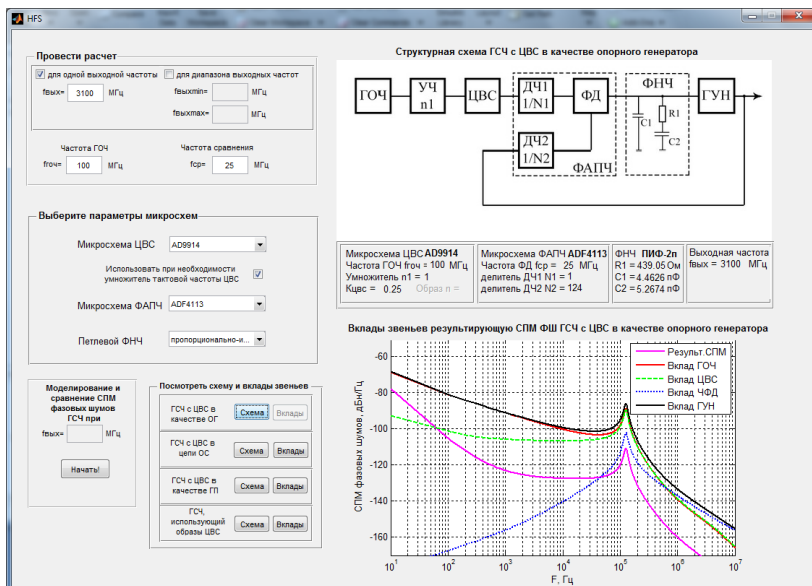


Рисунок 6 – Графический интерфейс программного комплекса

подставки до 25 дБ.

В четвертой главе на основе результатов, полученных во второй и третьей главах, разработан программный комплекс, позволяющий на основании введенных исходных данных провести структурное проектирование гибридных

синтезаторов частот и моделирование их шумовых характеристик. Программный комплекс состоит из следующих модулей: графический интерфейс (рисунок 6); подпрограмма расчета параметров гибридных синтезаторов (расчет коэффициентов деления и петлевых фильтров); подпрограмма моделирования СПМ фазовых шумов гибридных синтезаторов (использует пополняемую базу данных параметров и моделей шумовых характеристик современных интегральных микросхем, моделирует вклады звеньев и проводит сравнение шумовых характеристик гибридных синтезаторов); подпрограмма определения параметров, при которых гибридные синтезаторы обеспечивают наименьший уровень фазовых шумов.

Представлены результаты проектирования с помощью программного комплекса широкодиапазонного малошумящего гетеродина на основе разработанного гибридного синтезатора, использующего образы основной частоты ЦВС. На рисунке 7 представлены диапазоны частот, формируемые гетеродином для разных номеров образов в зависимости от n_1 при обеспечении коэффициента деления в цепи обратной связи, равного единице. С помощью разработанных во второй главе моделей проведено моделирование шумовых характеристик малошумящих гетеродинов анализаторов спектра СК4-БЕЛАН 32 и СК4-БЕЛАН 240, построенных на гибридных синтезаторах на основе двух ЦВС

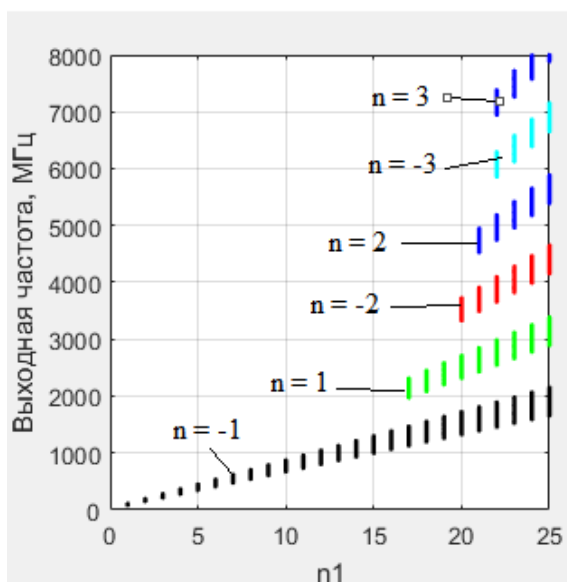


Рисунок 7 – Диапазоны, формируемые разработанным гетеродином при разных номерах образов в зависимости от n_1

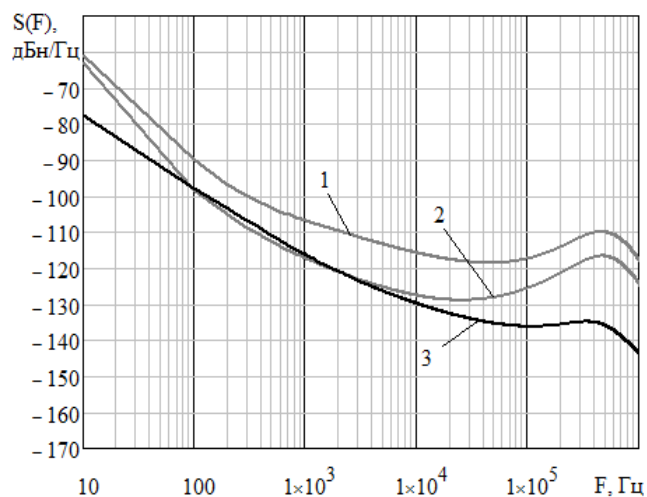


Рисунок 8 – СПМ фазовых шумов гетеродинов при $f_{ВЫХ} = 4521,4$ МГц (1 – анализатор спектра СК4-БЕЛАН 32, 2 – анализатор спектра СК4-БЕЛАН 240, 3 – ГСЧ, использующий образы основной частоты ЦВС)

и двухкольцевой ФАПЧ. Показано, что разработанный гетеродин имеет выигрыш до 18 дБ по уровню фазовых шумов (рисунок 8). Это объясняется применением в структуре гетеродинов анализаторов спектра двухкольцевых систем ФАПЧ с разными цепями подставки, за счет чего вносятся существенные вклады в результирующие уровни фазовых шумов.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработаны и экспериментально подтверждены математические модели шумовых характеристик 4-х типов гибридных синтезаторов на основе ФАПЧ и цифровых вычислительных синтезаторов.

2. Разработана и исследована обобщенная структурная схема гибридного синтезатора с пониженным, за счет использования образов основной частоты ЦВС, уровнем фазовых шумов. Проведено моделирование и экспериментальное исследование шумовых характеристик разработанной схемы.

3. Разработаны алгоритмы частотного планирования предлагаемых гибридных синтезаторов, позволяющие определять комбинации параметров данных синтезаторов для формирования заданных выходных частот и производить выбор тех параметров, которые обеспечивают наименьший уровень фазовых шумов выходного сигнала.

4. На основе разработанных математических моделей и алгоритмов разработан программный комплекс для частотного планирования и структурного проектирования гибридных синтезаторов, моделирования и сравнения их шумовых характеристик.

5. Был разработан гетеродин для современных радиосистем, при относительно простой архитектуре способный формировать широкий диапазон выходных частот (до 10 октав) с малым шагом перестройки (доли Гц) и уровнем фазовых шумов на 10–18 дБ ниже лучших гетеродинов современных анализаторов спектра.

Полученные результаты соответствуют поставленным задачам и свидетельствуют о достижении поставленной цели исследования.

В приложении приведены фото экспериментального стенда, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, патент на полезную модель, акты внедрений результатов диссертации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Ромашов, В.В. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на интегральных микросхемах / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.А. Якименко, А.Н. Коровин // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – №1. – С. 10-15.

2. Ромашов, В.В. Применение образов основной частоты ЦВС в гибридных синтезаторах частот / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.К. Храмов, К.А. Якименко // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – №3. – С. 19-24.

3. Ромашов, В.В. Исследование шумовых характеристик гибридного синтезатора частот на основе однокольцевой ИФАПЧ со смесителем и цифрового вычислительного синтезатора / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.А. Якименко // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – №4. – С. 23-29.

4. Ромашов, В.В. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.К. Храмов, А.Н. Докторов,

К.А. Якименко // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – №1. – С. 5-20.

5. Ромашов, В.В. Разработка математического аппарата для частотного планирования гибридных синтезаторов частот / В.В. Ромашов, К.А. Якименко // Проектирование и технология электронных средств. – 2016. – №3. – С. 3-9.

6. Ромашов, В.В. Экспериментальное исследование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза / В.В. Ромашов, К.А. Якименко, А.Н. Докторов, Л.В. Ромашова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2017. – №1. – С. 6-17.

Статьи в других изданиях

7. Romashov, V.V. The use of images of DDS in the hybrid frequency synthesizers / V.V. Romashov, L.V. Romashova, K.K. Khramov, K.A. Yakimenko // CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. – Russia, Crimea, Sevastopol. – September 7-13, 2014. – DOI: 10.1109/CRIMICO.2014.6959404. – Pp. 302-303. (Сборник индексируется в Scopus)

8. Romashov, V.V. The hybrid frequency synthesizer based on DDS and two-loop PLL / V.V. Romashov, K.K. Khramov, K.A. Yakimenko // CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. – Russia, Crimea, Sevastopol. – September 7-13, 2014. – DOI: 10.1109/CRIMICO.2014.6959400. – Pp. 294-295. (Сборник индексируется в Scopus)

9. Romashov, V.V. Modelling and comparing of phase noise curves of hybrid synthesizers / V.V. Romashov, K.A. Yakimenko // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015. – Omsk State Technical University. Russia, Omsk. May 21-23, 2015. – DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147198. – Pp. 714–719. (Сборник индексируется в Scopus)

10. Якименко, К.А. Моделирование гибридного синтезатора частот, использующего образы основной частоты цифрового вычислительного синтезатора, в программе Multisim / К.А. Якименко // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2015. – Вып.17. – С. 17-21.

11. Ромашов, В.В. Исследование шумовых характеристик гибридного синтезатора частот на основе цифрового вычислительного синтезатора и двухкольцевой ИФАПЧ / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.А. Якименко // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2014. – №1. – С. 18-24.

12. Якименко, К.А. Проектирование гибридного синтезатора с использованием образов основной частоты цифрового вычислительного синтезатора / К.А. Якименко // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2014. – №1. – С. 29-34.

13. Якименко, К.А. Исследование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза / К.А. Якименко // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2017. – №1. – С. 9-15.

Тезисы докладов на конференциях

14. Якименко, К.А. Аппроксимация шумовых характеристик генераторов R&S®SMA100A и ROS-1800+ / К.А. Якименко // Научный потенциал молодежи – будущее России. V Всероссийские научные Зворыкинские чтения. Сб. тез. докладов. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ. – 2013. – С. 338-339.

15. Якименко, К.А. Моделирование шумовых характеристик микросхем ФАПЧ фирмы AnalogDevices / К.А. Якименко // Научный потенциал молодежи – будущее России. V Всероссийские научные Зворыкинские чтения. Сб. тез. докладов. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ. – 2013. – С. 336-337.

16. Якименко, К.А. Моделирование шумовых характеристик ЖИГ-генераторов / К.А. Якименко // Научный потенциал молодежи – будущее России. VI Всероссийские научные Зворыкинские чтения. Сб. тез. докладов. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ. – 2014. – С. 441-442.

17. Якименко, К.А. Реализация гибридного синтезатора частот, использующего образы основной частоты ЦВС, на интегральных микросхемах / К.А. Якименко // Научный потенциал молодежи – будущее России. VI Всероссийские научные Зворыкинские чтения. Сб. тез. докладов. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ. – 2014. – С. 443-444.

18. Якименко, К.А. Моделирование и сравнение шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот [Электронный ресурс] / К.А. Якименко, В.В.

Ромашов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: СФУ. – 2014. – С. 76-81. – Режим доступа: http://efir.sfu-kras.ru/wp-content/uploads/download/Сборник_СПР-2014.pdf.

19. Якименко, К.А. Моделирование шумовых характеристик генераторов с резонаторами на поверхностных акустических волнах / К.А. Якименко // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России: VII Всероссийские научные Зворыкинские чтения. Сб. тез. докладов. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ. – 2015. – С. 229-230.

20. Ромашов, В.В. Математическая модель шумовых характеристик гибридного синтезатора частот, реализованного на современных интегральных микросхемах / В.В. Ромашов, К.А. Якименко // Радиолокационная техника: устройства, станции, системы РЛС–2015. Тезисы докладов Третьей Всероссийской научно-практической конференции АО «МЗ РИП». – Муром. – 9-10 июня 2015. – С. 33-34.

21. Якименко, К.А. Применение отладочных плат фирмы Analog Devices для исследования шумовых характеристик гибридного синтезатора частот / К.А. Якименко, А.Н. Докторов // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 11-ой международной научной конференции / Владим. гос. университет; редкол.: А.Г. Самойлов (и др). – Владимир: ВлГУ. – 2015. – С. 237-240.

22. Yakimenko, K.A. Phase noise in hybrid frequency synthesizers / K.A. Yakimenko, A.N. Doktorov // 15th International Conference «Aviation and Cosmonautics – 2016». 14–18 November, 2016. Moscow. Abstracts. – Printing house «Luxor». – 2016. – С. 375-377.

23. Якименко, К.А. Экспериментальное исследование спектральных характеристик гибридных синтезаторов частот / К.А. Якименко, В.В. Ромашов, А.Н. Докторов // X Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. – Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. – 21-23 ноября 2016 г. – С. 118-121.

24. Докторов, А.Н. Образы основной частоты интегральных ЦВС в гибридном методе синтеза / А.Н. Докторов, В.В. Ромашов, К.А. Якименко // X

Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. – Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. – 21-23 ноября 2016 г. – С. 156-160.

25. Ромашов, В.В. Гибридный синтезатор частот с ЦВС в качестве генератора подставки на интегральных микросхемах / В.В. Ромашов, К.А. Якименко, А.Н. Докторов // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. IX Всероссийские научные Зворыкинские чтения. Сб. тез. докл. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ. – 2017. – С. 79-80.

26. Якименко, К.А. Исследование дискретных побочных составляющих спектра выходного сигнала гибридных синтезаторов частот / К.А. Якименко // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 12-ой международной научной конференции / Владим. гос. университет; редкол.: А.Г. Самойлов (и др). – Владимир: ВлГУ. – 2017. – С. 117-119.

27. Ромашов, В.В. Гибридный синтезатор частот с улучшенными спектральными характеристиками / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.К. Храмов, К.А. Якименко, А.Н. Докторов // 7-я Всероссийская конференция «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации», Москва, Россия, доклады. – 25-27 октября 2017. – С. 150-155.

Патенты на полезные модели

28. Ромашов, В.В. Гибридный синтезатор частот с улучшенными спектральными характеристиками / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.К. Храмов, К.А. Якименко // Патент на полезную модель №172814; заявл. 24.04.2017; опубл. 25.07.2017; Бюл. № 21.

Программы для ЭВМ

29. Ромашов, В.В. Программа моделирования шумовых характеристик гибридного синтезатора частот, работающего на образах основной частоты цифрового вычислительного синтезатора / В.В. Ромашов, К.А. Якименко // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016614186 от 20.05.2016.

30. Ромашов, В.В. Программа моделирования шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот / В.В. Ромашов, К.А. Якименко // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016614237 от 20.05.2016.

Подписано в печать 29.03.2018.
Формат 60x84 1/16. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Типография
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, Владимир, ул. Горького, 87.