

На правах рукописи



СУРЖИК ДМИТРИЙ ИГОРЕВИЧ

**ЦИФРОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ
С АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2016

Работа выполнена на кафедре радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «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»

Официальные оппоненты: **Ямпурин Николай Петрович**
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и технологии радиоэлектронных средств Арзамасского политехнического института (филиала) ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет»

Коробов Денис Станиславович
Кандидат технических наук, ведущий инженер-электроник АО «Нижегородское научно-производственное объединение им. М.В. Фрунзе»

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

Защита диссертации состоится «8» февраля 2017 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

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 «28» ноября 2016 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС) находят широкое применение в качестве формирователей стабильных частот и сигналов различных устройств. Вопросам исследования ЦВС посвящены работы V.F. Kroupa, J. Vankka, K. Halonen, Bar-Giora Goldberg, E. Murphy, C. Slattery, В. Макаренко, Л.И. Ридико, Н.П. Ямпурин, Л.А. Белова, В.Н. Кочемасова и других. Одним из важнейших параметров современных ЦВС является спектральная чистота синтезируемого сигнала.

Однако спектр выходного сигнала ЦВС помимо гармоник основного тона содержит шумовую составляющую и множество дискретных паразитных спектральных составляющих (ПСС), которые можно рассматривать как фазовые искажения синтезируемого сигнала. Известные способы снижения данных искажений обладают характерными недостатками и не всегда эффективны. В связи с этим задача улучшения спектральных характеристик ЦВС является актуальной, а ее решение требует развития существующих методов снижения фазовых искажений выходного сигнала ЦВС. Во временной области данные искажения соответствуют паразитной фазовой модуляции (ПФМ) синтезируемого сигнала. Факт наличия ПФМ позволяет рассматривать автоматическую компенсацию в качестве метода их снижения. Принцип автокомпенсации фазовых искажений впервые был предложен Г.В. Щипановым и развит далее В.Н. Петровым, Г.М. Улановым, Б. Уидроу, В.В. Шахгильдяном, М.В. Капрановым, П.А. Поповым, В.В. Ромашовым, И.А. Куриловым и другими. Данный метод является перспективным в данном классе устройств, однако он мало изучен и освещен в научной литературе и не разработан для многоуровневых сигналов, к которым относится сигнал с выхода цифро-аналогового преобразователя ЦВС.

Целью диссертационной работы является улучшение спектральных характеристик цифровых вычислительных синтезаторов с использованием метода автоматической компенсации фазовых искажений.

Выполнение цели требует решения следующих **задач**:

- исследовать источники искажений выходного сигнала цифровых

вычислительных синтезаторов, их влияние на спектральные характеристики и проанализировать известные способы их снижения;

- разработать алгоритм выделения фазовых искажений выходного сигнала цифровых вычислительных синтезаторов и их автоматической компенсации, а также структурные схемы устройств, реализующих данный алгоритм;

- получить дифференциальные уравнения, передаточные функции, условия полной компенсации фазовых искажений цифровых вычислительных синтезаторов и провести на их основе анализ частотных и динамических свойств предложенных устройств;

- исследовать шумовые характеристики цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений и определить потенциальные возможности указанных устройств;

- исследовать эффективность применения предложенных схем в качестве формирователей сигналов радиотехнических систем.

Объектом исследования является цифровой вычислительный синтезатор.

Предметом исследования является метод автоматической компенсации фазовых искажений цифровых вычислительных синтезаторов.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы спектрального анализа, теории автоматического управления, методы аппроксимации. Моделирование и расчет проводились на ЭВМ с использованием программ MathCAD и Micro-Cap.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- разработан алгоритм выделения фазовых искажений выходного сигнала цифровых вычислительных синтезаторов и их автоматической компенсации, предложены структурные схемы трех вариантов устройств, его реализующих;

- получены дифференциальные уравнения, передаточные функции и условия полной компенсации фазовых искажений цифровых вычислительных синтезаторов;

- теоретически исследованы частотные и динамические свойства цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых

искажений;

- разработаны математические модели и исследованы шумовые характеристики цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений при различных параметрах анализируемых устройств.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

- разработаны структурные схемы гибридных синтезаторов частот на основе петли фазовой автоподстройки частоты и цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений, позволяющие уменьшить уровень ПСС и фазового шума сигнала на 6-13 дБ;

- разработаны математические модели шумовых характеристик цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений, позволяющие на стадии проектирования с низкой погрешностью проводить оценку спектральной плотности мощности фазовых шумов разрабатываемых устройств;

- разработан математический аппарат и инструментальные средства в виде программ расчета на ЭВМ цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений, позволяющие исследовать основные параметры и характеристики данных устройств;

- на основе цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений разработан формирователь сигналов радиотехнической системы с заданными параметрами, позволяющий уменьшить уровень ПСС и фазового шума сигнала на 4-10 дБ.

Достоверность полученных результатов подтверждена схемотехническим моделированием и экспериментальным исследованием системы гибридного синтеза частот с автокомпенсатором фазовых искажений синтезатора AD9854.

На защиту выносятся:

- алгоритм выделения фазовых искажений выходного сигнала цифровых вычислительных синтезаторов и реализация принципа автоматической

компенсации этих искажений с помощью петли фазовой автоподстройки частоты;

- структурные схемы цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений и петель фазовой автоподстройки частоты;

- результаты исследований характеристик предложенных схем цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались на следующих конференциях и семинарах: международной молодежной научной конференции «XXVII Гагаринские чтения» (Москва, 2011); всероссийской конференции с международным участием «Научная сессия, посвященная Дню радио» (Москва, 2012); IV-VIII всероссийских научных Зворыкинских чтениях (Муром, 2012-2016); IX, XI, XII международных IEEE Сибирских конференциях по управлению и связи (Красноярск, 2013, 2015, 2016); 25-ой международной IEEE Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2015).

Публикации. По тематике диссертации опубликована 21 работа, включая 12 статей, в том числе 6 статей в журналах перечня ВАК, 3 статьи в международной реферативной базе Scopus, 9 тезисов докладов. Имеются 2 патента на полезные модели и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в исследования по НИОКР на АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов», в учебном процессе кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», использованы при выполнении гранта РФФИ № 15-08-05542-а.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложения. Общий объем работы составляет 155 страниц машинописного текста, включая 100 рисунков и 7 таблиц. Библиография содержит 143 наименования, в том числе 25 работ автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, намечены основные направления улучшения спектральных характеристик цифровых вычислительных синтезаторов, сформулированы цель и задачи исследования, показана практическая значимость и реализация результатов работы, перечислены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературы, посвященной источникам искажений выходного сигнала ЦВС и способам их снижения, сформулированы цели и задачи исследования.

Источники искажений выходного сигнала ЦВС имеют цифровую и аналоговую природу происхождения. Из их анализа следует, что наибольшую сложность для подавления представляют ПСС, вызванные усечением кода фазы, воздействием дестабилизирующих факторов, а также собственные шумы ЦВС и шумы квантования, поскольку они располагаются в ближней зоне по отношению к синтезируемому колебанию и оказывают непосредственное влияние на его спектральную чистоту.

Известные методы позволяют как снизить величину фазовых искажений (фильтрация, передискретизация и др.), так и распределить спектральную плотность мощности (СПМ) фазовых шумов более равномерно (методики рандомизации и добавления к фазовой информации псевдослучайного шума). Основными недостатками фильтрации являются неизбирательность по отношению к полезной модуляции синтезируемого колебания и существование вероятности попадания ПСС в полосу пропускания фильтра. При использовании передискретизации ПСС снижаются только от определенных источников, и ограничивается максимально возможная синтезируемая частота ЦВС. Рандомизация сопровождается ухудшением отношения сигнал/шум устройства.

Показано, что фазовые искажения выходного сигнала ЦВС приводят к нежелательным динамическим отклонениям фронтов выходного сигнала цифро-аналогового преобразователя ЦВС во временной области: изменению их крутизны, ширины «ступенек» и смещению относительно идеального

расположения по шкале времени. Данный процесс соответствует ПФМ полезного сигнала, что позволяет рассматривать в качестве метода снижения фазовых искажений ЦВС их автоматическую компенсацию.

Во второй главе проведена разработка и исследование цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений.

Основная сложность в осуществлении автокомпенсации заключается в том, что сигналы на входе и выходе ЦВС отличаются друг от друга по амплитуде, частоте и форме. На вход ЦВС поступает сигнал тактового генератора (ТГ) с частотой f_T , являющийся также тактовым для цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Выходной спектр ЦВС содержит гармоники основной частоты $kf_{ЦВС}$ и их образы, а огибающая на частотах кратных тактовой принимает нулевые значения. Хотя в выходном спектре ЦАП ЦВС тактовая частота и отсутствует, очевидно наличие информации о данной частоте во временной области - ширина «ступенек» аналогового сигнала соответствует периоду тактового меандра.

В связи с этим структурную схему ЦВС можно эквивалентно представить как балансный модулятор (БМ) с сумматором (С) (рис. 1). В выходном спектре при балансной модуляции, также как и в выходном спектре ЦВС, присутствуют только боковые полосы, а составляющие несущей частоты отсутствуют.

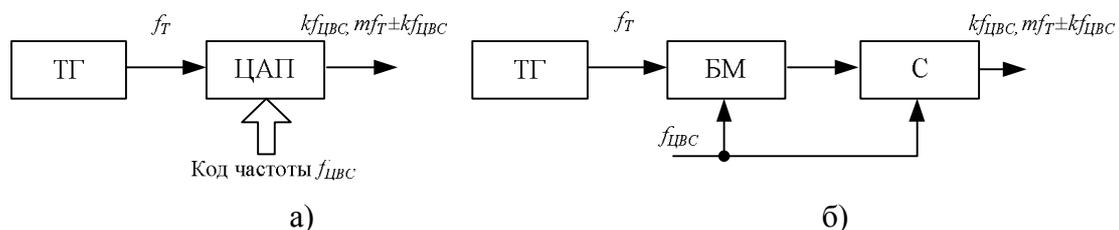


Рисунок 1 - Структурная схема ЦВС (а) и ее эквивалентная модель (б)

При наличии ПФМ выходного сигнала ЦВС, все составляющие спектра оказываются промодулированными по тому же закону, что и синтезируемая частота, но с другими индексами модуляции. Поскольку тактовая частота постоянна и имеет тот же закон ПФМ, что и выходной сигнал ЦВС, то выделив ее в выходном спектре ЦВС, можно осуществить автоматическую компенсацию фазовых искажений выходного сигнала синтезатора. Для этого предложен

алгоритм, заключающийся в последовательном разделении «ступенек» выходного сигнала ЦАП ЦВС в дифференцирующей цепи и нелинейном преобразование спектра данного сигнала в двухполупериодном выпрямителе.

Используя предложенный алгоритм выделения фазовых искажений выходного сигнала ЦВС, разработано два варианта тракта формирования управляющего сигнала автокомпенсатора фазовых искажений, структурная схема одного из которых изображена на рис. 2. На схеме приняты следующие обозначения: ФНЧ ЦВС - выходной фильтр ЦВС, ДЦ - дифференцирующая цепь, Тр - триггер, ДВ - двухполупериодный выпрямитель, ФД - фазовый детектор, ФНЧ - фильтр нижних частот, Атт - аттенюатор, УУЗ - устройство управления задержкой, ОТ - опорный тракт, ИТ - информационный тракт, УТ - управляющий тракт.

Другим вариантом тракта формирования управляющего сигнала автокомпенсатора является схема, в которой входной сигнал ЦВС является опорным сигналом ФД, а для выделения сигнала тактовой частоты с ПФМ в информационном тракте используется полосовая фильтрация с усилением.

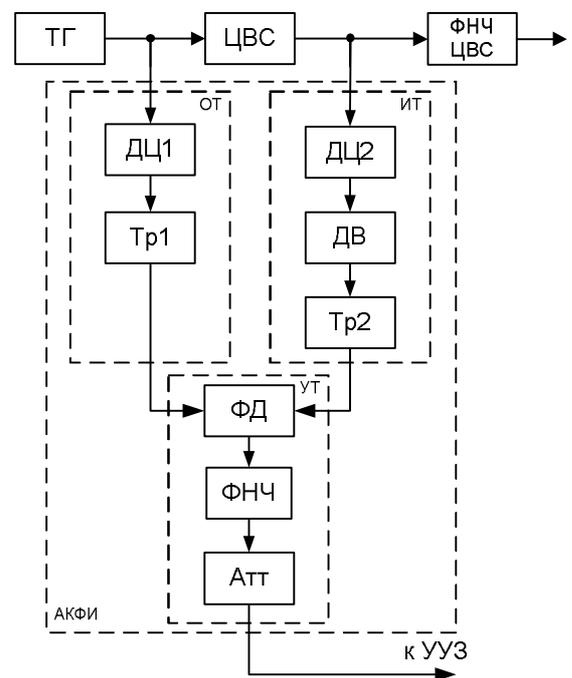


Рисунок 2 - Структурная схема тракта формирования управляющего сигнала автокомпенсатора фазовых искажений (АКФИ) ЦВС

Улучшения спектральных характеристик ЦВС можно достигнуть использованием управляемого фазовращателя в качестве устройства управления задержкой автокомпенсатора. Однако такое решение малоэффективно ввиду очевидных недостатков: трудности реализации и невозможности обеспечения широкого диапазона задержек. В связи с этим предложено реализовать автокомпенсатор фазовых искажений ЦВС с регулировкой вперед и устройством управления задержкой в виде петли ФАПЧ. В этом случае кольцо ФАПЧ одновременно выполняет функцию и цепи управления и эффективного фильтра

нижних частот по отношению к входным фазовым искажениям как ЦВС, так и тактового генератора.

Различные комбинации «включения» ЦВС в петлю ФАПЧ представляют гибридный метод синтеза частот. Так ЦВС с автоматической компенсацией фазовых искажений может использоваться в качестве опорного генератора петли ФАПЧ, в качестве генератора подставки петли ФАПЧ, а также как делитель частоты в цепи обратной связи петли ФАПЧ (рис. 3-5).

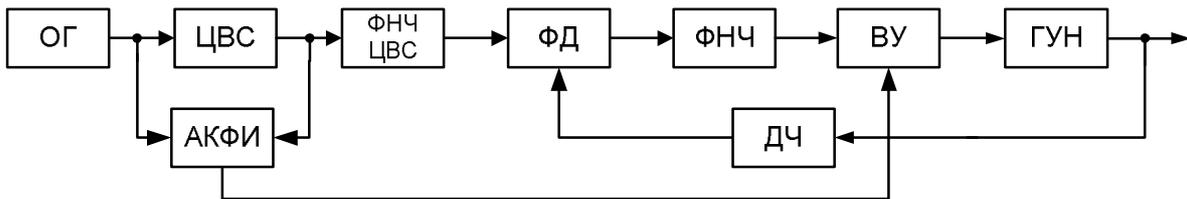


Рисунок 3 - Структурная схема системы гибридного синтеза частот с автоматической компенсацией фазовых искажений ЦВС в качестве опорного генератора петли ФАПЧ (схема 1)

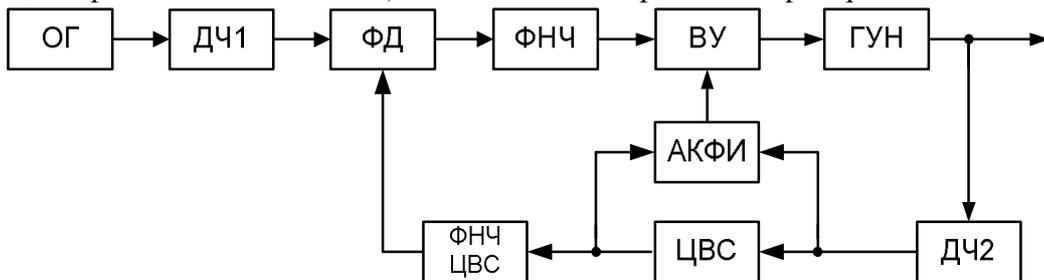


Рисунок 4 - Структурная схема системы гибридного синтеза частот с автоматической компенсацией фазовых искажений ЦВС в качестве делителя частоты в цепи обратной связи петли ФАПЧ (схема 2)

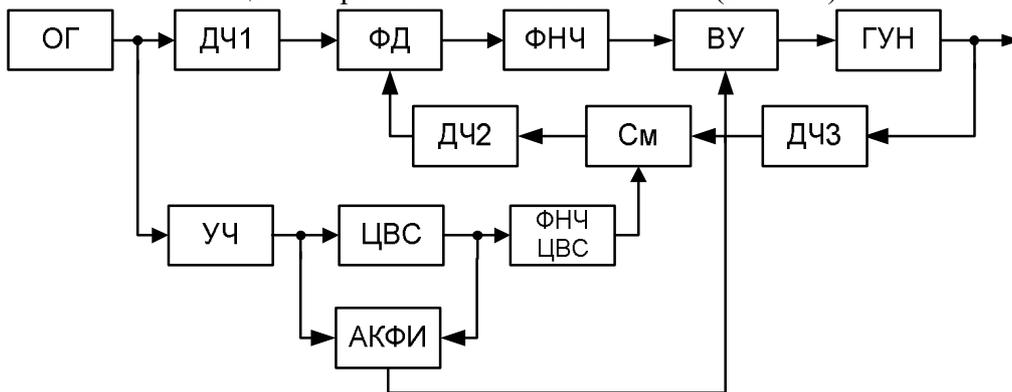


Рисунок 5 - Структурная схема системы гибридного синтеза частот с автоматической компенсацией фазовых искажений ЦВС в качестве генератора подставки петли ФАПЧ (схема 3)

На схемах приняты следующие обозначения: ОГ - опорный генератор, ВУ - вычитающее устройство, ГУН - генератор управляемый напряжением, ДЧ - делитель частоты, УЧ – умножитель частоты, См – смеситель частот.

Для рассмотрения основных характеристик предложенных схем гибридных

синтезаторов частот составлены дифференциальные уравнения линейных моделей устройств по фазовым искажениям ЦВС ε_{Π} с коэффициентом передачи K_{Π} относительно отклонений фазы ГУН $\Delta\varphi_{\text{ГУН}}$:

$$\text{Для схемы 1: } \Delta\varphi_{\text{ГУН}} \left(1 + \frac{K_{\text{ГУН}} K_{\text{Д1}} M_1(p)}{N_2 p} \right) = \Delta\varepsilon \frac{K_{\text{ГУН}} \alpha}{p},$$

где $K_{\text{ГУН}}$, $K_{\text{Д1}}$, $K_{\text{Д2}}$ - крутизны модуляционной и детекторных характеристик ГУН, ФД1, ФД2; $M_1(p)$, $M_2(p)$ - коэффициенты передачи фильтров ФНЧ1 и ФНЧ2; p - оператор Лапласа; N_2 - коэффициент деления ДЧ2; $\alpha = K_{\text{Д1}} K_{\Pi} M_1(p) - n_A K_{\text{Д2}} K_{\Pi} M_2(p) / 2K_{\text{ЦВС}}$; n_A - коэффициент ослабления аттенюатора автокомпенсатора; $K_{\text{ЦВС}}$ - коэффициент передачи ЦВС.

$$\text{Для схемы 2: } \Delta\varphi_{\text{ГУН}} \left(1 + \frac{K_{\text{ГУН}} K_{\text{Д1}} K_{\text{ЦВС}} M_1(p)}{N_2 p} \right) = \Delta\varepsilon \frac{K_{\text{ГУН}} \alpha}{p},$$

где $\alpha = n_A K_{\text{Д2}} K_{\Pi} M_2(p) / 2K_{\text{ЦВС}} - K_{\text{Д1}} K_{\Pi} M_1(p)$.

$$\text{Для схемы 3: } \Delta\varphi_{\text{ГУН}} \left(1 + \frac{K_{\text{ГУН}} K_{\text{Д1}} M_1(p)}{N_2 N_3 p} \right) = \Delta\varepsilon \frac{K_{\text{ГУН}} \alpha}{p},$$

где N_3 - коэффициент деления ДЧ3, $\alpha = K_{\text{Д1}} K_{\Pi} M_1(p) / N_2 - n_A K_{\text{Д2}} K_{\Pi} M_2(p) / 2K_{\text{ЦВС}}$.

Для разработанных схем гибридных синтезаторов частот с автоматической компенсацией фазовых искажений ЦВС определены передаточные функции по всем возможным источникам фазовых отклонений. На основе передаточных функций получены условия полной компенсации фазовых искажений ЦВС, которые для схем, изображенных на рис.3, 4 и 5, определяются как

$$n_A = 2K_{\text{ЦВС}} \frac{K_{\text{Д1}}}{K_{\text{Д2}}}, M_2(p) = M_1(p) \text{ и } n_A = \frac{2K_{\text{ЦВС}} K_{\text{Д1}}}{N_2 K_{\text{Д2}}}, M_2(p) = M_1(p). \quad (1)$$

Степень автокомпенсации определяется амплитудно-частотной характеристикой устройства по фазовым искажениям ЦВС и условиями (1). Однако на практике это недостижимо ввиду наличия цепи автокомпенсации с регулированием вперед, при котором отсутствует отрицательная обратная связь. Например, при отклонении коэффициента ослабления аттенюатора от условий (1)

на 3% ПСС снижаются на 15 дБ, а при отклонении на 20% - на 7 дБ.

С помощью разработанных программ для ЭВМ проведено моделирование динамических свойств разработанных устройств. Установлено, что при выполнении (1) установившиеся значения переходных процессов совпадают с осью абсцисс, что соответствует компенсации фазовых искажений ЦВС.

В третьей главе исследованы шумовые характеристики гибридных синтезаторов частот с автоматической компенсацией фазовых искажений цифровых вычислительных синтезаторов и петель фазовой автоподстройки частоты, оцениваемые спектральной плотностью мощности фазовых шумов.

Для исследования шумовых характеристик разработанных устройств составлены эквивалентные функциональные схемы со всеми источниками действующих фазовых шумов, получены математические модели СПМ фазовых шумов и определены шумовые вклады звеньев. Установлено, что для схемы 1 основной вклад в СПМ фазовых шумов устройства вносят ЦВС и ФАПЧ, для схемы 2 - ФАПЧ и ЦВС, а для схемы 3 определяется тремя составляющими близкими по уровню - опорным генератором, ФАПЧ и ЦВС. При этом для всех исследуемых устройств собственные фазовые шумы автокомпенсатора незначительны (порядка минус 130 - минус 145 дБн/Гц). Математическое моделирование шумовых характеристик осуществлялось при параметрах устройств, соответствующих значениям коэффициентов синтезатора с ФАПЧ ADF5355 и ЦВС AD9914 (производитель Analog Devices): $K_{ГУН} = 15$ МГц/В, частота среза ФНЧ петли ФАПЧ $f_{cp} = 10$ МГц, разрядность ЦАП $n = 12$ бит.

На рис. 6 приведены шумовые характеристики трех разработанных систем гибридного синтеза частот с цепью автоматической компенсации фазовых искажений ЦВС (пунктирные кривые) и без нее (непрерывные кривые). При этом использовались одинаковые значения частоты опорного генератора $f_{OG} = 100$ МГц и выходной частоты ГУН синтезатора $f_{ГУН} = 1500$ МГц. Области между кривыми на рис. 6 соответствуют границе теоретически возможной компенсации фазовых шумов при заданных параметрах устройства. Наименьшим уровнем фазовых шумов обладает схема 3, а наибольшим - схема 1, поскольку система ФАПЧ в

данном случае осуществляет умножение фазовых шумов ЦВС и опорного генератора.

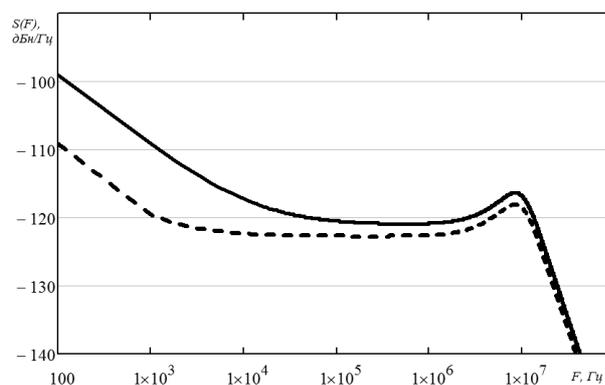
Наибольшей степенью автокомпенсации из трех предложенных устройств обладает схема 1 из-за преобладания вклада ЦВС в СПМ фазового шума устройства. При этом основная компенсация фазовых шумов сохраняется в полосе отстроек до 10 кГц относительно несущего колебания. С увеличением тактовой частоты ЦВС наблюдается снижение уровня автокомпенсации фазовых шумов до 1-2 дБ, поскольку уменьшается коэффициент передачи ЦВС и, соответственно, его шумовой вклад.

Исследована параметрическая чувствительность - влияние параметров звеньев автокомпенсатора (постоянной времени фильтра и коэффициента ослабления аттенюатора) на степень снижения фазовых шумов в выходном сигнале гибридных синтезаторов.

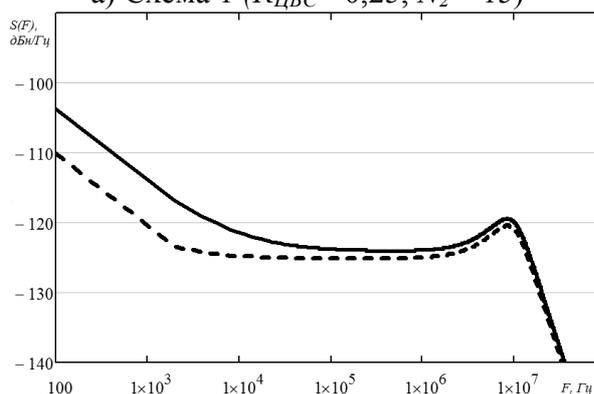
Определены границы теоретически возможной компенсации фазовых шумов в выходном сигнале предложенных устройств: для схемы 1 при $f_{OG} = 100$ МГц и $f_{ГУН} = 1000$ МГц она составляет 13 дБ, для схемы 2 - 10 дБ и для схемы 3 - 6 дБ.

В четвертой главе рассмотрена возможность практического применения синтезаторов частот, предложенных в диссертационной работе.

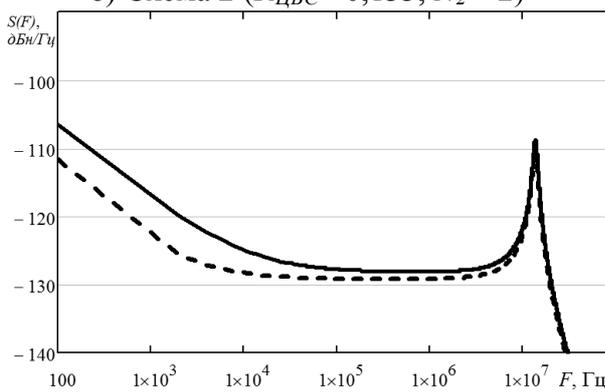
Проведено схемотехническое моделирование и экспериментальное



а) Схема 1 ($K_{ЦВС} = 0,25$, $N_2 = 15$)



б) Схема 2 ($K_{ЦВС} = 0,133$, $N_2 = 2$)



в) Схема 3 ($n_1 = 8$, $K_{ЦВС} = 0,4$, $N_2 = 1$, $N_3 = 4$)

Рисунок 6 - СПМ фазовых шумов гибридных синтезаторов частот с автоматической компенсацией фазовых искажений ЦВС

исследование гибридного синтезатора частот (рис. 3) с автокомпенсатором фазовых искажений ЦВС AD9854, подтверждающие достоверность разработанного алгоритма выделения фазовых искажений выходного сигнала ЦВС и доказывающие работоспособность предложенных устройств. Установлено, что в зависимости от выходной частоты ЦВС и точности настройки звеньев автокомпенсатора улучшение спектральных характеристик устройства может достигать 10 дБ (рис.7).

Осуществлена разработка формирователя сигналов радиотехнической системы на основе гибридного синтезатора частот с автоматической компенсацией фазовых

искажений ЦВС. Исходно были определены основные технические требования, предъявляемые к разрабатываемому устройству: частота опорного генератора 50 МГц; диапазон частот выходных сигналов 700-3200 МГц; шаг частоты не более 0,1кГц; время переключения частоты не более 500 мкс; СПМ фазового шума при отстройке от несущей частоты сигнала на 1 кГц не более минус 110 дБ/Гц. Исходя из требуемой выходной частоты и ее разрешения, в качестве наиболее простой реализации формирователя рассмотрена схема с ЦВС AD9914 в качестве опорного генератора петли ФАПЧ ADF5355 (рис 8).

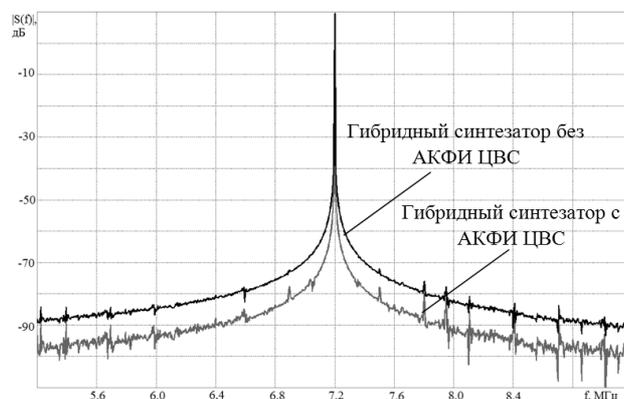


Рисунок 7 – Спектры выходных сигналов гибридного синтезатора частот при наличии и отсутствии цепи АКФИ ЦВС при $f_T = 30$ МГц, $f_{ЦВС} = 7,2$ МГц, $N_2 = 1$

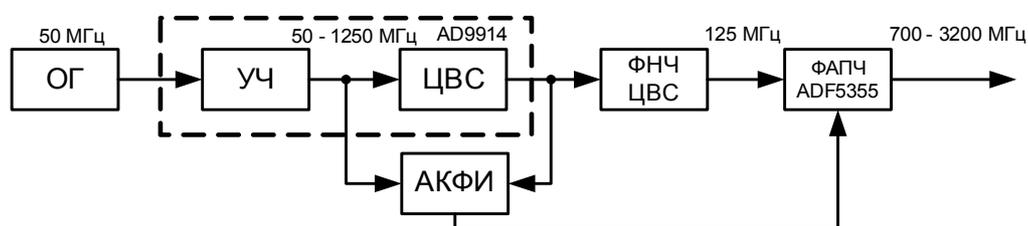
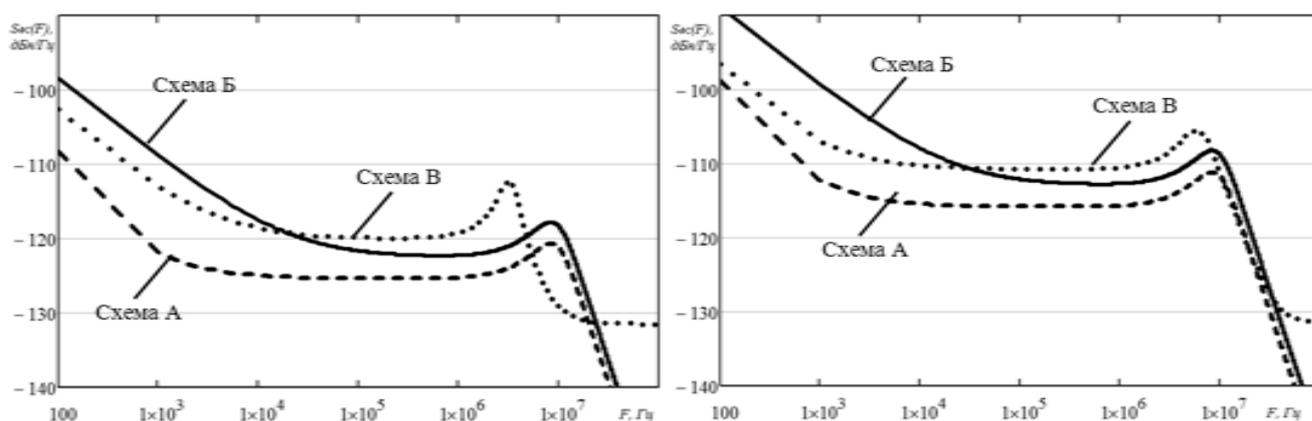


Рисунок 8 - Обобщенная структурная схема формирователя сигналов на основе гибридного синтезатора частот с АКФИ ЦВС AD9914 и ФАПЧ ADF5355

Для оценки эффективности применения предложенной схемы формирователя проведена сравнительная оценка его шумовых характеристик при наличии (схема А) и отсутствии цепи автокомпенсации (схема Б) с шумовыми характеристиками

устройства с умножением опорной частоты на ФАПЧ и ЦВС (схема В) (рис. 9).



а) $f_{\phi C} = 1000$ МГц

б) $f_{\phi C} = 3000$ МГц

Рисунок 9 – СПМ фазовых шумов формирователей сигналов

Видно, что наименьшим уровнем фазовых шумов обладает схема А. Она превосходит схему В по уровню фазового шума в заданном диапазоне синтезируемых частот до 10 дБ (рис. 10).

Сравнительный анализ современных микросхем гибридных синтезаторов частот показал, что предложенный вариант формирователя сигналов на основе гибридного синтезатора с автоматической компенсацией фазовых искажений ЦВС

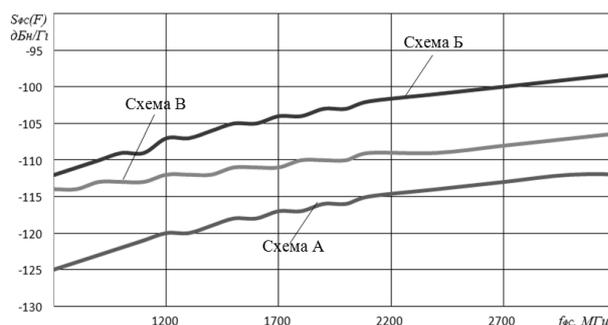


Рисунок 10 - Зависимость СПМ фазовых шумов от выходной частоты формирователей сигналов

превосходит известные устройства по уровню фазового шума почти на 10 дБ.

В заключении изложены основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Исследованы источники искажений выходного сигнала цифровых вычислительных синтезаторов, их влияние на спектральные характеристики и проанализированы известные способы их снижения.
2. Разработан алгоритм выделения фазовых искажений выходного сигнала цифровых вычислительных синтезаторов и их автоматической компенсации, а также структурные схемы устройств, реализующих данный алгоритм.
3. Получены дифференциальные уравнения, передаточные функции, условия полной компенсации фазовых искажений цифровых вычислительных

синтезаторов и на их основе проведен анализ частотных и динамических свойств предложенных устройств.

4. Получены математические модели, позволяющие исследовать шумовые характеристики цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений, определены потенциальные возможности указанных устройств. Установлено, что применение автокомпенсации позволяет снизить уровень ПСС и фазового шума сигнала на 6-13 дБ.

5. Разработан математический аппарат и инструментальные средства в виде программ расчета на ЭВМ цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений, позволяющие исследовать основные параметры и характеристики данных устройств.

6. Проведено моделирование и экспериментальное исследование гибридного синтезатора частот с автокомпенсатором фазовых искажений ЦВС AD9854, подтверждающие достоверность результатов проведенных исследований.

7. На основе цифровых вычислительных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений разработан формирователь сигналов радиотехнической системы с заданными параметрами, позволяющий уменьшить уровень ПСС и фазового шума сигнала на 4-10 дБ.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что в диссертационной работе решена важная научная задача улучшения спектральных характеристик цифровых вычислительных синтезаторов, имеющая большое значение в области формирования стабильных частот и сигналов, методов и устройств снижения фазовых искажений.

В приложении приведены акты внедрений результатов диссертационной работы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Суржик, Д. И. Компенсация искажений ЦВС в гибридных синтезаторах частот / Д. И. Суржик, И. А. Курилов, Г. С. Васильев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - 2015. – № 4(20). - С. 13-19.

2. Ромашов, В.В. Передаточные функции гибридного синтезатора частот с автокомпенсацией фазовых искажений и регулированием по возмущению / В.В. Ромашов, Г.С. Васильев, И.А. Курилов, Д.И. Суржик, С.М. Харчук // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - 2016. – № 2(22). - С. 12-20.

3. Васильев, Г.С. Частотные характеристики автокомпенсатора фазовых помех цифрового вычислительного синтезатора частот / Г.С. Васильев, И.А. Курилов, Д.И. Суржик, С.М. Харчук // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - 2015. – № 1(17). - С. 12-20.

4. Курилов, И.А. Анализ характеристик синтезаторов частот на основе схемы амплитудно-фазового преобразователя сигналов / И.А. Курилов, Г.С. Васильев, С.М. Харчук, Д.И. Суржик // Радиопромышленность. - 2012. – Вып. 2. – С. 20-26.

5. Васильев, Г.С. Шумовые свойства формирователя сигналов с автокомпенсацией фазовых помех. / Г.С. Васильев, И.А. Курилов, Д.И. Суржик, С.М. Харчук // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - 2015. – №4(20). - С. 5-12.

6. Курилов, И.А. Методы анализа радиоустройств на основе функциональной аппроксимации / И.А. Курилов, В.В. Ромашов, Е.А. Жиганова, Д.Н. Романов, Г.С. Васильев, С.М. Харчук, Д.И. Суржик // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – № 1. – С. 35-49.

Статьи в журналах из перечня Scopus

7. Surzhik, D.I. Modeling the noise properties of hybrid frequency synthesizers with automatic compensation of phase noise of DDS / D.I. Surzhik, I.A. Kurilov, O.R. Kuzichkin, G.S.Vasilyev, S.M. Kharchuk // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications. – 2015. – С. 7147015.

8. Vasilyev, G.S. Analysis of noise properties of a hybrid frequency synthesizer with autocompensating phase noise of DDS and PLL / G.S.Vasilyev, O.R. Kuzichkin, I.A. Kurilov, D.I. Surzhik // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications. –2016. – С. 7491742.

9. Surzhik, D.I. Correlation Analysis of the PLL with an Arbitrary Filter Based on Continuous Piecewise-Linear Functions / D.I. Surzhik, G.S. Vasilyev // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications. – 2013. - С.6693654.

Статьи в других изданиях

10. Суржик, Д.И. Моделирование спектральных характеристик звеньев автокомпенсатора фазовых искажений цифровых вычислительных синтезаторов /

Д.И. Суржик // Методы и устройства передачи и обработки информации. - 2016. - № 18. - С. 17-21.

11. Васильев, Г.С. Динамические и частотные характеристики формирователя сигналов с ЦВС, ФАПЧ и автокомпенсацией помех / Г.С. Васильев, И.А. Курилов, Д.И. Суржик, С.М. Харчук // Методы и устройства передачи и обработки информации. - 2016. - № 18. - С. 4-10.

12. Васильев, Г.С. Передаточные функции формирователя сигналов с ЦВС, ФАПЧ и автокомпенсацией помех / Г.С. Васильев, И.А. Курилов, Д.И. Суржик, С.М. Харчук // Методы и устройства передачи и обработки информации. - 2016. - № 18. - С. 11-16.

Материалы конференций

13. Суржик, Д.И. Разработка формирователя сигналов на основе гибридного синтезатора частот с автокомпенсатором фазовых искажений ЦВС AD9914 и ФАПЧ ADF5355 / Д.И. Суржик // Новая наука: современное состояние и пути развития. - 2016. - №10-2. – С. 216-219.

14. Суржик, Д.И. Разработка алгоритма выделения фазовых искажений выходного сигнала ЦВС / Д.И. Суржик // Закономерности и тенденции развития науки в современном обществе. - 2016. – С. 85-89.

15. Курилов, И.А. Воздействие дестабилизирующего фактора на нелинейный преобразователь сигналов с фильтрами второго порядка / И.А. Курилов, Г.С. Васильев, Д.И. Суржик // РНТОРЭС им А.С. Попова «Научная сессия, посвящённая Дню радио». - 2012. – Сб. трудов 67-й Международной конференции. - С. 126-128.

16. Surzhik, D.I. Automatic compensation of phase noise of DDS of hybrid frequency synthesizer with mixer / D.I. Surzhik, G.S. Vasilyev, I.A. Kurilov, S.M. Kharchuk // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — 2015. — Т. 1: IEEE Catalog Number CPF15788-CDR. - С. 207-208.

17. Surzhik, D.I. Design and mathematical modeling of hybrid frequency synthesizers with automatic compensation of DDS interferences / D.I. Surzhik, I.A. Kurilov, G.S.Vasilyev, S.M. Kharchuk // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications. – 2015. – IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.

18. Суржик, Д.И. Переходные характеристики гибридных синтезаторов частот с автоматической компенсацией фазовых помех ЦВС / Д.И. Суржик // VII Всероссийские научные Зворыкинские чтения. - 2015. - С. 229-230.

19. Суржик, Д.И. Анализ ЧХ гибридных синтезаторов частот с автоматической компенсацией фазовых помех ЦВС / Д.И. Суржик // VII

Всероссийские научные Зворыкинские чтения. - 2015. - С. 225-226.

20. Суржик, Д.И. Исследование динамических режимов неавтономного синтезатора частот при воздействии детерминированных возмущений / Д.И. Суржик // VI Всероссийские научные Зворыкинские чтения. - 2014. - С. 489-490.

21. Суржик, Д.И. Анализ динамических режимов синтезаторов частот на основе аппроксимации непрерывными кусочными функциями / Д.И. Суржик // V Всероссийские научные Зворыкинские чтения. - 2013. - С. 478-479.

Патенты на полезные модели

22. Васильев, Г.С. Автоматический компенсатор фазовых помех на выходе цифро-аналогового преобразователя синтезатора частот / Г.С. Васильев, Д.И. Суржик, И.А. Курилов, С.М. Харчук, Д.Н. Романов // Патент на полезную модель № 2015130455 от 22.07.2015.

23. Васильев, Г.С. Автоматический компенсатор фазовых помех с суммированием опорного и информационного сигналов цифро-аналогового преобразователя / Г.С. Васильев, Д.И. Суржик, И.А. Курилов, С.М. Харчук, Д.Н. Романов // Патент на полезную модель № 2015129903 от 22.07.2015.

Программы для ЭВМ

24. Суржик, Д.И. Программа моделирования динамических режимов синтезаторов частот с системой фазовой автоподстройки частоты при детерминированных воздействиях спектральным методом на основе аппроксимации непрерывными кусочно-линейными функциями / Д. И. Суржик, Г.С. Васильев, И.А. Курилов, С.М. Харчук // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014618814 от 29.08.2014.

25. Суржик, Д.И. Программа моделирования динамических режимов синтезаторов частот с системой фазовой автоподстройки частоты при случайных воздействиях на основе аппроксимации непрерывными кусочно-линейными функциями / Д.И. Суржик, Г.С. Васильев, И.А. Курилов, С.М. Харчук // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014618815 от 29.08.2014.

Подписано в печать 26.11.2016.
Формат 60x84 1/16. Печ.л1,0. Тираж 100 экз.

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