

На правах рукописи



Ефремов Иван Андреевич

**Математическое и методическое обеспечение
САПР устройств приема и обработки радиосигналов
на основе программно-контролируемого радио**

Специальность 05.13.12 – Системы автоматизации
проектирования (промышленность)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ).

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент Меркутов Александр Сергеевич.

Официальные оппоненты:

Пастернак Юрий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, профессор кафедры «Радиоэлектронные устройства и системы»;

Лобачев Глеб Александрович, кандидат технических наук, ЗАО «ТехКрайт», г. Владимир, ведущий программист.

Ведущая организация ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань.

Защита состоится «28» мая 2014 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.025.01, созданного на базе ВлГУ, по адресу: 600000, г. Владимир, ул Горького, 87, ауд. 335-1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ВлГУ: diss.vlsu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2014 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу университета: 600000, г. Владимир, ул Горького, 87, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.025.01.

Ученый секретарь диссертационного совета



Н.Н. Давыдов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Современный мир невозможно представить без аппаратуры, выполняющей передачу и прием радиосигналов. У каждого дома есть радиоприемник для прослушивания радиостанций эфирного вещания и мобильный телефон, позволяющий общаться практически в любой точке земного шара. Для решения более сложных задач приема радиосигналов существуют комплексы для обработки информации с различными видами модуляции в нескольких диапазонах рабочих частот. Благодаря реконфигурации трактов радиоприемных устройств (РПУ) и демодуляции сигнала в базовой полосе частот при помощи цифровых методов обработки удается значительно снизить энергопотребление и стоимость аппаратуры и обеспечить высокие качественные характеристики. В основе архитектур построения подобных устройств в последнее время активно используются принципы программно-контролируемого радио (ПКР).

Поскольку данные устройства являются технически сложными для разработки, а проведенный анализ показал, что существующие маршруты не позволяют обеспечить высокую эффективность проектирования с учетом характеристик современной микроэлектронной элементной базы (отсутствие специализированных моделей и библиотек, невысокая точность оценки параметров сигналов и др.), то тема диссертационной работы «Математическое и методическое обеспечение САПР устройств приема и обработки радиосигналов на основе программно-контролируемого радио» является актуальной для исследования.

Применение систем автоматизированного проектирования (САПР) для устройств данного назначения позволит сократить сроки разработки ПКР-приемников и повысить их качественные характеристики. Большой вклад в разработку и развитие теоретических основ автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств и систем внесли известные отечественные ученые И. П. Норенков, В. Н. Ильин, Г. Г. Казеннов, В. П. Сигорский, О. В. Алексеев, Р. В. Антипенский, В. Н. Ланцов, И. Е. Жигалов. Проведенный обзор печатных работ авторов П. Б. Кенингтона, П. Бернса, Т. Дж. Рафаэля, Дж. Барда, посвященных исследованию ПКР-устройств и способов их проектирования, позволил получить информацию о применяемых архитектурах аналоговой части РПУ, используемых методах цифровой обработки и их комбинации в одном устройстве. Методы цифровой обработки сигналов (ЦОС) наиболее подробно освещены в работах С. Смита, Э. Айфичера. Много исследований посвящено применению принципов ПКР при разработке аппаратуры для различных стандартов беспроводных сетей, однако в них не рассматриваются вопросы, связанные с практической реализацией процесса автоматизированного проектирования достаточно сложных для анализа ПКР-приемников с указанием ме-

тодов моделирования и особенностей их применения на определенных этапах разработки и интерпретацией получаемых результатов. Выполненный анализ показал, что в недостаточном объеме рассмотрены вопросы смешанного моделирования аналого-цифровых устройств, которое является важным шагом при проектировании ПКР-приемника, сочетающего в себе аналоговую и цифровую обработку радиочастотных сигналов.

Объект исследования – системы автоматизированного проектирования устройств приема и обработки радиосигналов на основе программно-контролируемого радио.

Предмет исследования – математическое и методическое обеспечение САПР устройств приема и обработки радиосигналов в виде структур реконфигурируемых трактов РПУ, моделей компонентов и маршрута проектирования ПКР-приемников.

Цель работы – развитие математического и методического обеспечения САПР устройств приема и обработки радиосигналов на основе ПКР для повышения эффективности проектирования устройств данного класса. **Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:**

1. Анализ современных методов модуляции, архитектур радиоприемных устройств на основе ПКР и их компонентов, позволивший определить необходимые параметры для создания унифицированного РПУ;

2. Исследование возможностей использования существующих САПР для разработки телекоммуникационных устройств в ПКР-системах, в результате чего были выявлены недостатки методического и математического обеспечения автоматизированного проектирования ПКР-приемников и выбрана базовая САПР в качестве платформы для их развития;

3. Разработка математического обеспечения системы проектирования в виде моделей компонентов ПКР, а также смешанных моделей ПКР-приемников, которое позволило осуществить комплексное проектирование РПУ;

4. Разработка методического обеспечения автоматизированного проектирования и тестирования устройств приема и обработки сигналов на основе ПКР, которое позволило повысить эффективность проектирования и экспериментального исследования ПКР-приемника и его трактов;

5. Применение разработанного маршрута при проектировании ПКР-приемника, экспериментальное тестирование макета РПУ, подтвердивших эффективность использования предложенных моделей, маршрутов и методик.

Научная новизна работы. Новые научные результаты, полученные в работе, состоят в следующем:

1. Предложено оригинальное математическое обеспечение САПР ADS в виде библиотеки моделей архитектур ПКР-приемников и их компонентов;
2. Разработано специализированное методическое обеспечение САПР в виде маршрута проектирования ПКР-приемников;
3. Доказана перспективность применения разработанной методики и моделей автоматизированного тестирования ПКР-приемников при помощи САПР ADS;
4. Введено понятие сквозного моделирования аналого-цифровых трактов РПУ цифровых сигналов, на основании которого предложены методики формирования моделей компонент, определяющие выбор необходимых параметров сигналов и методов анализа.

Теоретическая значимость исследования обоснована следующим:

1. Доказаны положения и методики, вносящие вклад в расширение представлений об изучаемом явлении процесса проектирования ПКР-приемников при заданных требованиях к качеству их функционирования;
2. Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы методы функционального и схемотехнического моделирования сложных смешанных проектов в САПР ADS;
3. Изложены этапы проектирования моделей устройств приема и обработки сигналов на основе программно-контролируемого радио;
4. Раскрыты сложности моделирования трактов РПУ при необходимости учета максимального количества вносимых искажений и эффектов преобразования сигнала;
5. Изучены причинно-следственные связи параметров аналоговых и цифровых трактов ПКР-приемника и характеристик разработанного РПУ;
6. Проведена модернизация существующих моделей аналоговых и цифровых трактов РПУ.

Практическая значимость. Значение полученных результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

1. Разработаны и внедрены маршрут и методики проектирования устройств приема и обработки сигналов на основе программно-контролируемого радио, модели трактов ПКР-приемника (преселектора, преобразования частоты, фильтров ПЧ, АЦП, блока ЦОС), а также методика и модели для экспериментального тестирования РПУ при помощи САПР, что подтверждено актами внедрения;
2. Определены перспективы практического использования смешанного моделирования с оценкой влияния нелинейных компонентов аналоговых трактов на результаты цифровой обработки сигналов;

3. Создана библиотека моделей для автоматизированного проектирования ПКР-приемника, даны практические рекомендации для выбора типов моделей при анализе различных трактов РПУ, которые включены в методики проектирования;

4. Представлены методические рекомендации по дальнейшему совершенствованию и практическому использованию разработанных видов обеспечения САПР для ПКР-приемников;

5. Повышена эффективность проектирования телекоммуникационных устройств на основе программно-контролируемого радио при сокращении временных затрат на проектирование РПУ за счет использования специализированных моделей и маршрута, позволяющего быстро определить необходимые методы, модели, оцениваемые характеристики и решения на различных этапах разработки ПКР-приемников.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы теории САПР, системного анализа, теории электрических цепей и радиотехнических сигналов, теории цифровой обработки сигналов, теории численных методов автоматизированного проектирования и методы функционального и схмотехнического моделирования.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическое обеспечение САПР ADS в виде библиотеки моделей архитектур ПКР и их компонентов позволяет выполнить комплексный анализ РПУ, что существенно ускоряет процесс формирования модели и расширяет спектр получаемых характеристик радиоприемных устройств;

2. Методическое обеспечение САПР в виде маршрута и методик проектирования ПКР-приемников повышает эффективность проектирования;

3. Методика автоматизированного тестирования ПКР-приемников при помощи САПР ADS предоставляет возможность формирования и обработки тестовых сигналов с различными видами модуляции, искажениями в радиоканале и алгоритмами цифровой обработки;

4. Результаты проектирования широкополосного мониторингового ПКР-приемника позволяют проверить качество разработанного обеспечения и оценить возможности его практического применения.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена тем, что:

1. Для экспериментальных работ результаты измерений получены с использованием лицензионного программного обеспечения (САПР ADS) и сертифицированной измерительной аппаратуры (генератора ВЧ и НЧ сигналов, осциллографа и анализатора спектра компании Agilent), показана воспроизводимость полученных результатов исследований в различных условиях;

2. Теория построена на известных и проверяемых данных и согласуется с опубликованными экспериментальными результатами по теме диссертации и смежным отраслям в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ;

3. Идея базируется на анализе существующих решений в области проектирования радиоприемных устройств, а также развитии подходов и методик проектирования и анализа ПКР-приемников;

4. Используются сравнения авторских данных и данных, полученных ранее отечественными и зарубежными учеными по рассматриваемой тематике;

5. Установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике (журналы IEEE, издательские дома и др.);

6. Используются современные методики сбора и обработки информации с использованием средств вычислительной техники.

Апробация результатов

Работа выполнялась на кафедре «Вычислительная техника» ВлГУ. Полученные результаты исследований в виде моделей, маршрутов, методик, алгоритмов проектирования ПКР внедрены в деятельность ООО НПФ «Радиосервис» (г. Москва), ООО «Гранит» (г. Владимир), а также в учебный процесс кафедры ВТ, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях: конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2012 (МЭС - 2012)», Москва, ИППМ РАН: 2012; международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков, ХНУРЭ: 2010, 2011, 2012, 2013; международная научно-техническая конференция «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2012)», Тольятти, ПВГУС: 2012; международная научно-практическая конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации 2013», Владимир, ВлГУ: 2013.

Публикации по работе. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 статьях в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ. Общее число публикаций по теме диссертации составляет 16 работ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений, списка использованных источников и приложения. Основная часть диссертации изложена на 165 страницах машинописного текста. Работа содержит 85 рисунков, 27 таблиц. Библиографический список включает 151 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Основные черты, характеристики и тенденции развития цифровых систем на основе ПКР и средств их проектирования» проведен анализ методов модуляции, применяемых для передачи данных, рассмотрено несколько архитектур программно-контролируемого радиоприемника. Выполнен сравнительный анализ САПР телекоммуникационных устройств и систем.

Анализ современных методов модуляции, применяемых для беспроводной связи, позволил определить требования к характеристикам РПУ, осуществляющего прием и обработку сигналов различных стандартов передачи данных. Сделан вывод об актуальности разработки реконфигурируемых фильтров.

Рассмотрены архитектуры ПКР с нулевой, высокой и цифровой промежуточной частотой (ПЧ). Для каждой архитектуры определены области её применения в зависимости от технических требований к проектируемому устройству.

Выполнен анализ нескольких способов реконфигурируемой фильтрации в тракте преселектора и ПЧ. Рассмотрены структуры на переключательных емкостях, микроэлектромеханических системах (МЭМС), Gm-C компонентах и цифровые фильтры. Даны рекомендации по их выбору и параметризации при проектировании ПКР-приемника. Описаны основные типы смесителей с указанием особенностей их применения в различных условиях (диапазон частот, полоса пропускания и др.). Установлено, что параметры аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и место его включения оказывают существенное влияние на характеристики ПКР-приемника (чувствительность, избирательность) с учетом нелинейных и шумовых характеристик аналоговых высокочастотных (ВЧ) и ПЧ трактов.

Сравнительный анализ характеристик современных САПР показал, что существующее математическое и методическое обеспечение не в полной мере удовлетворяет специфике проектирования ПКР-приемников (отсутствие моделей специализированных компонент, смешанных моделей с учетом цифрового преобразования и нелинейных эффектов при обработке ВЧ и ПЧ сигналов, отсутствие методик сквозного проектирования и рекомендаций к выбору методов анализа и их параметризации). С другой стороны, было отмечено, что математическое обеспечение САПР ADS обладает наиболее широким спектром методов схемотехнического и имитационного моделирования нелинейных радиотехнических устройств и набором моделей компонент аналоговых и цифровых блоков. В связи с этим было предложено использовать САПР ADS в качестве платформы для реализации новых моделей, методик и маршрутов проектирова-

ния РПУ на основе принципов ПКР. По результатам проведенного анализа сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе «Математическое обеспечение САПР ADS для устройств приема и обработки сигналов на основе ПКР-архитектур» рассмотрены вопросы развития математического обеспечения для автоматизированного проектирования и тестирования трактов РПУ на основе ПКР.

Предложены модели реконфигурируемого преселектора на МЭМС-структурах, которые могут использоваться для решения задач как широкополосной, так и узкополосной фильтрации с изменением ширины полосы пропускания и центральной частоты. Данные модели ранее отсутствовали в математическом обеспечении САПР ADS.

Установлено, что для анализа малошумящих усилителей (МШУ) могут использоваться модели нескольких типов: библиотечные файлы производителей, компоненты на основе S-параметров и функциональные модели. Разработанные модели всех трех типов могут быть применены для комплексного моделирования РПУ с оценкой уровня битовой ошибки.

Разработаны модели для анализа смесителей и гетеродинов. Их отличительной особенностью является возможность учета фазовых шумов, что очень важно при проектировании систем с многопозиционной цифровой модуляцией сигналов и узкополосных систем связи. Фазовые шумы при моделировании рассчитываются по выражению, предложенному в работе У. Роде и позволяющему учесть влияние основных компонент системы синтеза частоты:

$$\Phi_{out} = \frac{(\Phi_r + \Phi_{pd} + \Phi_{\Delta\Sigma})(K_\theta \times K_{VCO} \times F(s) / S)}{1 + K_\theta \times K_{VCO} \times F(s) / (N \times S)} + \frac{\Phi_{VCO}}{1 + K_\theta \times K_{VCO} \times F(s) / (N \times S)},$$

где $\Phi_r = \Phi_{XTAL} / R$ – шум кварцевого генератора на входе фазового детектора, R – коэффициент предварительного деления частоты, K_θ – передаточная функция фазового детектора, $F(s)$ – передаточная функция петлевого фильтра, K_{VCO}/S – передаточная функция ГУНа, Φ_{pd} – шум фазового детектора, $\Phi_{\Delta\Sigma}$ – шум квантования, Φ_{XTAL} – шум кварцевого генератора, Φ_{VCO} – фазовый шум ГУНа, N – коэффициент деления частоты в синтезаторе.

При помощи предложенных моделей в аналоговой и цифровой подсистемах САПР ADS можно решать задачи оценки влияния фазовых шумов синтезатора частоты на уровень битовой ошибки и многосигнальную избирательность. Современные подходы к проектированию предполагают выполнение оценок этих параметров только экспериментальным путем.

Предложены модели реконфигурируемых фильтров для тракта ПЧ, которые не были представлены в математическом обеспечении САПР ADS: фильтры на Gm-C структурах и на операционных усилителях (ОУ). Для проектирования трактов РПУ с нулевой ПЧ предложены модели фильтров на переключа-

тельных емкостях, в которых перестройка полосы пропускания определяется частотой тактирования, управляющей значениями сопротивлений резистивных элементов фильтра. Проведенные исследования моделей показали, что нелинейность статических и динамических характеристик, эффекты коммутации приводят к появлению нелинейных искажений в сигналах после их фильтрации.

Для анализа влияния параметров АЦП на квантованный сигнал разработан проект, позволяющий решать задачу подбора и оптимизации необходимых характеристик преобразователя (разрешение, диапазон входного напряжения, интегральная/дифференциальная нелинейность и др.).

Рассмотрена возможность использования в САПР ADS моделей, представленных в виде описания на языках Verilog и VHDL. Показана возможность комбинированного моделирования, включающего в себя представление элементов как на функциональном, так и на программном уровне, что расширяет функционал САПР ADS для анализа устройств обработки цифровых сигналов. Это позволяет существенно сократить время разработки подобных систем.

На основании концепций построения ПКР-устройств разработана модель цифрового блока обработки данных для высокой и нулевой ПЧ. Компонент блока ЦОС включает в себя квадратурный демодулятор (цифровой или аналоговый), дециматоры, фильтры и демодуляторы, что позволяет проводить исследования, связанные с оценкой влияния параметров данных элементов (частота квантования, ширина полосы фильтра, коэффициенты децимации и др.) на эффективность демодуляции сигналов. Предложен алгоритм, который дает возможность сократить время анализа смешанных аналого-цифровых проектов.

Для оценки искажений информационного сигнала на выходе ПКР-приемников (битовая ошибка, фазовый и временной джиттер и др.), была использована возможность выполнения смешанного моделирования аналого-цифровых трактов РПУ в САПР ADS. Данный анализ позволяет оценить влияние линейных и нелинейных искажений, шумовых характеристик аналоговых устройств на информационный сигнал после выполнения цифровой обработки и в настоящее время выполняется крайне редко.

Для повышения эффективности экспериментального тестирования разработанных ПКР-приемников и их составных частей были предложены проекты САПР ADS для формирования сигналов с различными видами модуляций, в том числе, с имитацией искажений в радиоканале, проекты для анализа и обработки данных, записанных с выхода ПЧ тракта ПКР-приемника (фазовая и тактовая синхронизация, фильтрация, демодуляция, спектральный анализ и пр.). По сравнению с традиционными способами формирования сигналов при использовании предложенного подхода можно получать достаточно сложные тестовые последовательности, максимально соответствующие реальным сигналам.

На основании полученных моделей была разработана библиотека компонентов ПКР-приемника (рисунок 1), использование которой сокращает сроки выполнения этапов автоматизированного проектирования РПУ. Каждый проект библиотеки имеет описание, помогающее выбрать необходимую модель для анализа различных трактов ПКР-приемника в зависимости от его архитектуры, характеристик и требований к конечной стоимости.

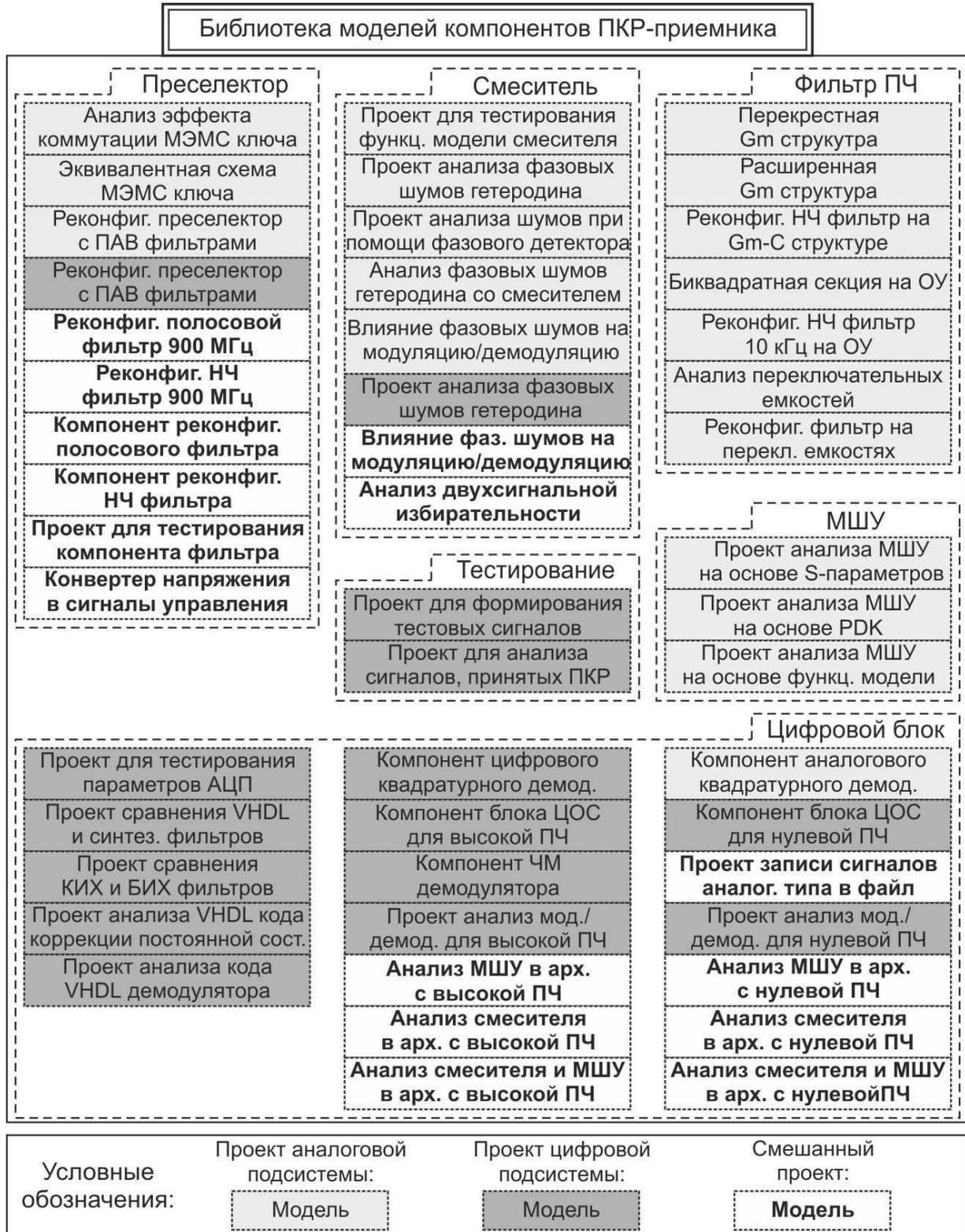
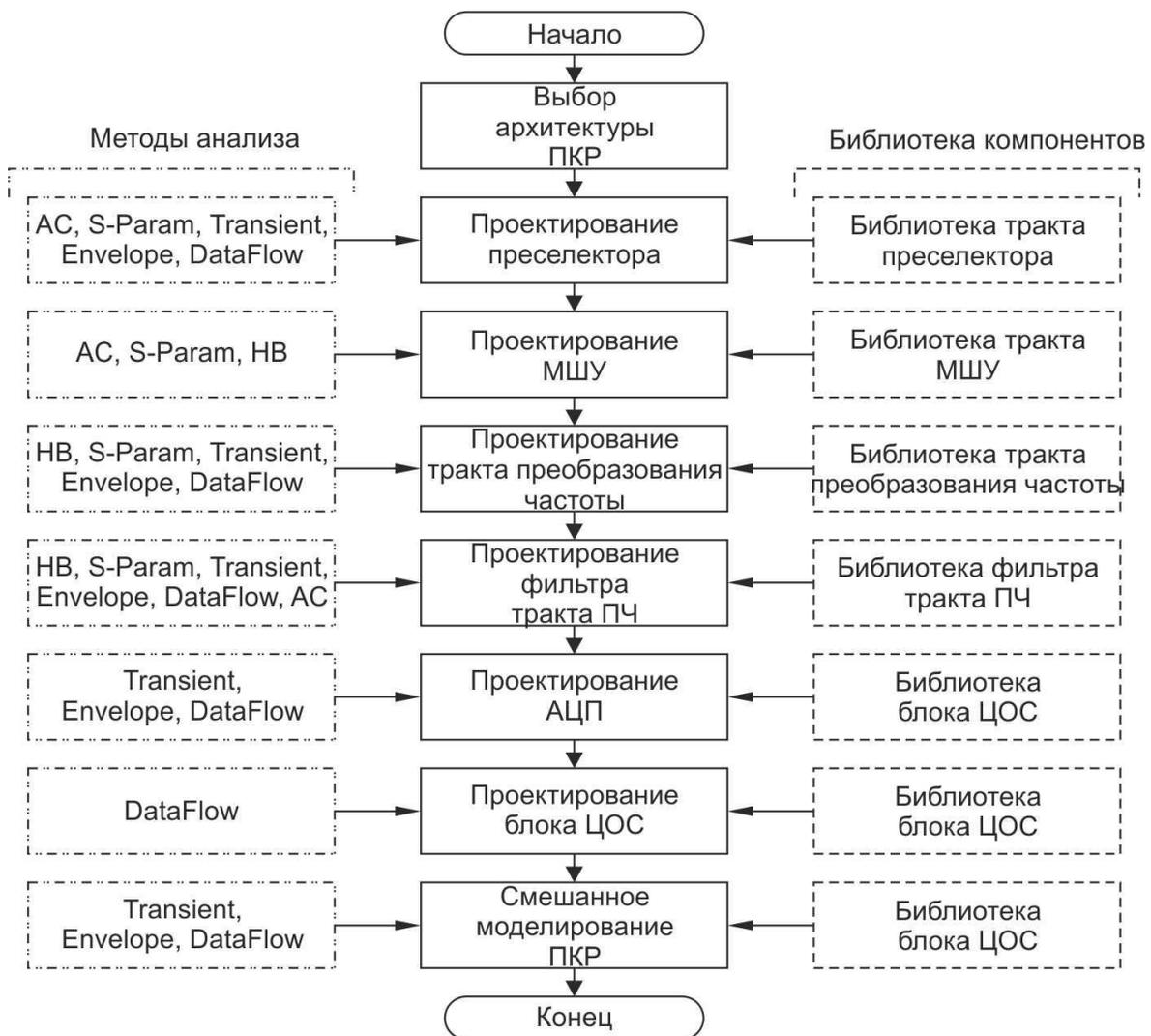


Рисунок 1 – Библиотека моделей компонентов ПКР-приемника

В третьей главе «Методическое обеспечение автоматизированного проектирования ПКР-приемника» рассматриваются вопросы разработки маршрута автоматизированного проектирования РПУ на основе ПКР.

Из анализа опубликованных работ установлено, что существующие маршруты проектирования ориентированы либо целиком на типовые устройства широкого применения, либо на радиоприемные устройства без использования цифровой обработки. В работе предложен маршрут проектирования ПКР-приемника, описывающий этапы разработки трактов РПУ и применяемые при этом методы анализа и библиотеки компонент специализированного математического обеспечения (рисунок 2). Каждый шаг маршрута представлен в виде методики, которая позволяет осуществить выбор структур и характеристик применяемых компонентов, выбрать модели для анализа, определить исследуемые характеристики и методы моделирования.



Методы анализа:
AC - анализ по переменному току; **HB** - анализ методом гармонического баланса;
S-Param - анализ S-параметров; **Transient** - анализ во временной области;
Envelope - анализа методом огибающей; **DataFlow** - имитационное моделирование.

Рисунок 2 – Маршрут проектирования ПКР-приемника

Разработана методика проектирования преселектора, в которой, в отличие от традиционных способов фильтрации, было предложено использовать МЭМС-коммутаторы для построения различных структур фильтров преселекторов. Результаты моделирования показали эффективность их использования в радиочастотных трактах, в том числе, и на достаточно высоких частотах.

С помощью разработанной методики проектирования смесителя можно осуществить выбор смесителя и моделей для его анализа, определить необходимые характеристики и методы моделирования. Основой для анализа смесителя является использование метода гармонического баланса, что позволяет получить коэффициент преобразования, шума, интермодуляции 2-го и 3-го порядка, спектры выходной мощности в узкой и широкой полосе, а также точку компрессии. При моделировании смесителей в условиях многочастотного входного воздействия токи и напряжения в схеме представлялись в виде ограниченных тригонометрических полиномов вида:

$$v(t) = \text{Real} \left\{ \sum_{k_1=0}^{K_1} \sum_{k_2=0}^{K_2} \dots \sum_{k_n=0}^{K_n} V_{k_1, k_2, \dots, k_n} e^{j2 \Pi(k_1 f_1 + \dots + k_n f_n) t} \right\},$$

где n – количество входных гармоник (источников), $f_{1...n}$ – исходная частота каждого источника и $K_{1...n}$ – количество учитываемых гармоник для каждой входной частоты, которое определялось порядком оцениваемых интермодуляционных продуктов и уровнями входных сигналов.

Моделирование гетеродина с учетом фазовых шумов позволило оценить их влияние на сигнал ПЧ и качество демодуляции. Возможность установки параметров шума для источников сигналов в разных подсистемах позволяет провести моделирование, максимально отражающее процессы в физическом устройстве. На рисунке 3 (б) приведен спектр ЧМ-сигнала, преобразованный по частоте с использованием моделей смесителя и гетеродина с фазовыми шумами.

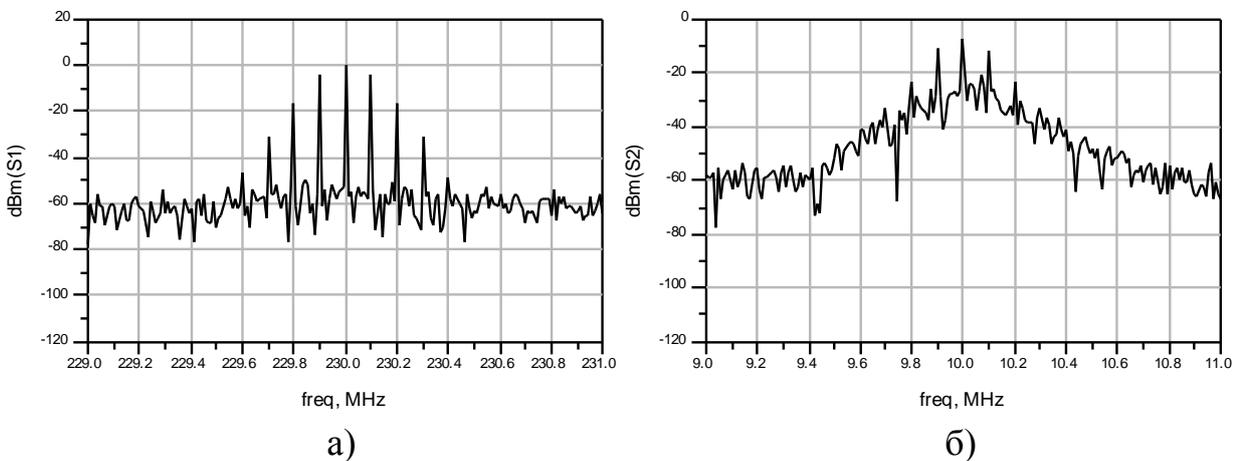


Рисунок 3 – Моделирование проекта для анализа влияния фазовых шумов;
а - Сигнал на входе смесителя, б - Сигнал на выходе смесителя

В таблице 1 приведены результаты анализа влияния спектральной плотности фазовых шумов гетеродина на уровень битовой ошибки информационного сигнала после демодулятора для архитектур с высокой (ВПЧ) и нулевой ПЧ (НПЧ).

Таблица 1 – Анализ влияния фазовых шумов на битовую ошибку

Фазовые шумы	BER для ЧМ		BER для ФМ		BER для QPSK	
	ВПЧ	НПЧ	ВПЧ	НПЧ	ВПЧ	НПЧ
отключены	0.063	0.003	0.043	0.013	0.057	0.104
1 кГц: –80 дБ, 10 кГц: –70 дБ, 40 кГц: –70дБ, 400 кГц: –90 дБ	0.072	0.0103	0.084	0.103	0.114	0.176
1 кГц: –70 дБ, 10 кГц: –60 дБ, 40 кГц: –60дБ, 400 кГц: –80 дБ	0.083	0.117	0.146	0.172	0.173	0.237
1 кГц: –60 дБ, 10 кГц: –50 дБ, 40 кГц: –50дБ, 400 кГц: –70 дБ	0.101	0.158	0.225	0.281	0.278	0.324

Разработана методика проектирования фильтра ПЧ на Gm-C структурах, МЭМС-структурах и ОУ. В основе методики лежит использование смешанного моделирования, в результате которого можно определить спектр модулированного сигнала, динамический диапазон, чувствительность, вероятность битовой ошибки при фильтрации модулированного сигнала и время коммутации для фильтров на МЭМС-структурах. Моделирование проводилось с использованием метода огибающей, который представляет собой комбинацию методов анализа во временной и частотной области и предполагает описание сигналов в следующем виде:

$$v(t) = \text{Real} \left\{ \sum_{k=0}^N V_k(t) e^{j2\pi f_k t} \right\},$$

где $v(t)$ – узловое напряжение схемы, включая входной сигнал, $V_k(t)$ – коэффициенты ряда Фурье, изменяемые во времени.

Предложенная методика проектирования АЦП позволяет осуществить выбор необходимых параметров АЦП в зависимости от требований технического задания на проектирование РПУ. При ее реализации можно оценить такие характеристики, как динамический диапазон, чувствительность, точки компрессии и интермодуляции, а также наблюдать эффекты наложения спектров и попадания в полосу сигнала нежелательных спектральных составляющих.

Проведенный анализ опубликованных работ показал, что в них в недостаточной степени рассмотрены методы проектирования блока ЦОС ПКР-приемников. В связи с этим, была предложена методика проектирования, опре-

деляющая последовательность выполнения шагов разработки и анализа устройств ЦОС, включающая проведение анализа АЦП, разработку квадратурного демодулятора, цифровых фильтров, дециматоров, VHDL блоков и демодуляторов с последующей оценкой влияния параметров данных компонентов на качество ЦОС. Разработанные модели и методики использованы для проектирования приемников с высокой и нулевой ПЧ, полученные характеристики соответствуют принципам функционирования данных устройств.

Разработанная методика смешанного моделирования определяет последовательность действий при проведении анализа аналоговых и цифровых трактов ПКР-приемника, рассчитываемые характеристики и методы моделирования, необходимые для их получения. Существующие методики имеют ограничения при проектировании РПУ на основе ПКР (сложность выбора методов моделирования, их параметров и анализируемых характеристик). Примером использования смешанного моделирования являются результаты моделирования, позволяющие оценить влияние коэффициента шума МШУ и фазовых шумов гетеродина на битовую ошибку при обработке сигналов с различными видами модуляции.

Для экспериментального тестирования ПКР-приемников предложено использовать САПР ADS и методику, определяющую последовательность действий по формированию тестовых последовательностей и обработке принятых данных. На первом этапе в ADS выполняется формирование тестового сигнала путем обработки цифровой последовательности (помехоустойчивое кодирование, интерливинг и др.), модуляции (АМ, ЧМ, ФМ и др.) и имитации канала передачи данных (переотражение, многолучевое распространение, рассеяние, затухание и др.). Затем полученный в базовой полосе частот модулированный сигнал передается в генератор, на выходе которого формируется высокочастотный модулированный сигнал, который поступает на вход тестируемого ПКР-приемника. На выходе ПЧ-тракта приемника генерируются квадратурные сигналы, временные отсчеты которых записываются в файлы. После трансляции файлов в САПР ADS выполняется демодуляция и цифровая обработка сигналов, а также вывод полученной информационной последовательности. Анализ качества принятого сигнала может быть проведен на основании оценки спектра, временной развертки сигнала и уровня битовой ошибки.

В четвертой главе «Автоматизированное проектирование приемника на основе ПКР-архитектуры» приведены результаты проектирования ПКР-приемника с высокой ПЧ. Разработаны модели трактов преселектора, первой ПЧ, второй ПЧ, обобщенного аналогового тракта с двумя преобразованиями частоты и блока ЦОС. В результате смешанного моделирования выполнен сквозной анализ РПУ. Экспериментальное тестирование при помощи разработанной методики доказало эффективность ее применения при решении задач

проектирования широкополосного РПУ цифровых сигналов с различными видами модуляции.

В результате моделирования аналогового тракта РПУ проведена оценка влияния активных и пассивных компонентов на основные параметры тракта преобразования частоты: передаточные характеристики, коэффициенты шума и усиления, спектры выходной мощности в узкой и широкой полосе частот.

В качестве цифрового тракта обработки сигналов использовался компонент цифрового квадратурного демодулятора. С его помощью проведено исследование влияния сигналов с различными видами модуляции и мощностью для определения оптимального уровня усиления в аналоговом тракте.

Смешанное моделирование позволило оценить сквозные характеристики разработанного РПУ в целом. В результате анализа был получен информационный сигнал, совпадающий с исходным цифровым сигналом, на основании которого был сделан вывод о корректной работе трактов спроектированного РПУ.

Экспериментальное тестирование РПУ, разработанного с использованием маршрута автоматизированного проектирования, было выполнено при помощи предложенной методики, ориентированной на совместное использование САПР ADS и измерительной аппаратуры. Результаты моделирования и тестирования приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты тестирования разработанного радиоприемника RsJet

Параметр	Результат моделирования	Результат тестирования
Односигнальная избирательность по соседнему каналу	94 дБ	92 дБ
2-х сигнальная избирательность по зерк. каналу в диапазоне до 3-х ГГц	76 дБ	73 дБ
Динамический диапазон	69 дБ	72 дБ
Коэффициент шума	13.1 дБ	11.5 дБ
Чувствительность	-105.7 дБм	-106.5 дБм

В работе приводится теоретический расчет параметров РПУ. Чувствительность рассчитывалась на основании оценки отношения сигнал/шум на выходе ПЧ тракта. Для этого рассчитан уровень усиления в процессе квантования:

$$G_{SNR} = 10 \log \left(\frac{f_s}{B_{IF}} \right) = 10 \log \left(\frac{81.92}{16} \right) = 7.1 \text{ дБ},$$

где B_{IF} - полоса сигнала, f_s – частота выборки.

Шумовое напряжение на выходе АЦП:

$$V_{N,ADC} = V_{FS,rms} * 10^{-SNR_{ADC}/20} = \frac{1.048}{2\sqrt{2}} * 10^{-76.8/20} = 52 \text{ мкВ},$$

где $V_{FS,rms}$ является среднеквадратичным рабочим напряжением сигнала АЦП, а SNR_{ADC} – определенное производителем отношение сигнал/шум для АЦП.

Значение шумового напряжения ВЧ/ПЧ трактов определяется как:

$$V_{N,IF} = 2\sqrt{P_{N,tot}R_{ADC}} = 2\sqrt{2.00 * 10^{-12} * 100} = 14 \text{ мкВ},$$

где $P_{N,tot}$ – мощность шума на выходе аналогового тракта РПУ (в Вт) (для спроектированного приемника мощность шума составила – 87 дБм) и R_{ADC} – входное сопротивление АЦП в Ом.

Общее шумовое напряжение на выходе приемного тракта $V_{N,RX}$ рассчитывалось по формуле:

$$V_{N,RX} = \sqrt{V_{N,IF}^2 + V_{N,ADC}^2} = \sqrt{14^2 + 52^2} = 54 \text{ мкВ}.$$

Отношение сигнал/шум для АЦП определено по следующей формуле:

$$SNR_{RX} = 20 \log\left(\frac{V_s}{V_{N,RX}}\right) + G_{SNR} = 20 \log\left(\frac{0.707}{54 * 10^{-6}}\right) + 7.09 = 89.4 \text{ дБ},$$

где V_s оцениваемый уровень сигнала на входе АЦП (по уровню –3 дБ).

Было установлено, что приемлемое значение относительной битовой ошибки обеспечивается при отношении сигнал/шум около 10 дБ. В этом случае мощность принимаемого сигнала будет составлять – 79.4 дБм. Учитывая, что необходимый для АЦП уровень сигнала равен + 7 дБм при сопротивлении 100 Ом, для нормальной работы на вход АЦП должен быть подан сигнал с уровнем не менее – 72.4 дБм. Так как коэффициент усиления аналогового тракта разработанного РПУ равен 32 дБ, то чувствительность ПКР-приемника можно определить как $(-72.4 - 32) = -104.4$ дБм.

Теоретически рассчитанные значения G_{SNR} , $V_{N,RX}$, SNR_{RX} могут быть оценены при помощи разработанного математического обеспечения. Чувствительность, полученная в результате моделирования смешанного проекта ПКР-приемника, оказалась меньше рассчитанной на 1.3 дБ. Таким образом, модель уточняет теоретические расчеты, а также позволяет оценить нелинейные искажения и неравномерности АЧХ фильтров и усилителей на различных частотах.

В целом, результаты измерений и теоретических расчетов показали достоверность полученных на этапах автоматизированного проектирования характеристик.

В заключении приведены основные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения работы было получено математическое и методическое обеспечение САПР в виде моделей, методик и маршрутов, использование которых значительно повышает эффективность автоматизированного проектирования ПКР-приемников. В работе решены все поставленные задачи:

1. Проведен анализ современных методов модуляции цифровых сигналов, показана актуальность применения реконфигурируемых трактов в современных РПУ. На основании анализа различных архитектур ПКР-приемников и их компонентов даны рекомендации по их практическому применению при проектировании РПУ.

2. Выполнен анализ САПР для разработки телекоммуникационных устройств, результатом которого стал выбор применяемой в работе САПР ADS, как наиболее подходящей для решения поставленной цели.

3. Разработаны модели реконфигурируемых фильтров для различных структур и их схемотехнической реализации. Для моделирования МШУ рассмотрено применение моделей и файлов с измеренными S- параметрами реальных усилителей. Исследовано влияние моделей гетеродинов с установленными фазовыми шумами на эффективность работы смесителей. Предложены модели цифровых систем обработки данных для высокой ПЧ (выполняется оцифровка, цифровая квадратурная демодуляция, фильтрация сигнала ПЧ, децимация и др.) и нулевой ПЧ (выполняется аналоговая квадратурная демодуляция, оцифровка, фильтрация сигналов, децимация и др.). Исследована зависимость результатов демодуляции ЧМ и ФМ сигналов от параметров АЦП и цифрового блока. Выполнено совместное моделирование аналоговых и цифровых устройств в САПР ADS. Проведена оценка влияния аналоговых нелинейных компонентов на функционирование цифрового блока обработки данных.

4. Разработан маршрут проектирования ПКР-приемника. Предложены методики проектирования трактов преселектора, МШУ, преобразования частоты, фильтрации ПЧ, цифрового блока обработки сигналов, смешанного моделирования и экспериментального тестирования ПКР при помощи САПР.

5. Тестирование разработанного математического обеспечения показало, что модели компонентов РПУ обеспечивают функциональные преобразования сигнала, соответствующие принципам работы ПКР-приемников.

6. Полученные модели были применены на практике при проектировании широкополосного радиоприемника. Проведено моделирование аналогового и цифрового тракта. Выполнена разработка и моделирование Verilog-кода блока коррекции постоянной составляющей сигнала в САПР ADS.

7. Достоверность результатов моделирования была подтверждена в ходе проведения теоретических расчетов и экспериментального тестирования РПУ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Ефремов, И. А. Расчёт, проектирование и реализация широкополосного приёмника [Текст] / О. А. Васильев, К. В. Грязнов, И. А. Ефремов // Специальная Техника, 2012. – №2, – С. 48-54 (Соискатель – 35 %).

2. Ефремов, И. А. МЭМС структуры в системах приема радиосигналов [Текст] / И. А. Ефремов // Проблемы разработки перспективных микро- и нано-электронных систем – 2012 (МЭС - 2012). Сборник трудов; Под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2012. – С. 668 – 673.

3. Ефремов, И. А. Система управления искусственным сердцем [Текст] / И. А. Ефремов, А. В. Жданов, В. В. Морозов // Биомедицинская радиоэлектроника. – М.: Радиотехника, 2012. – №6, – С. 4-8. (Соискатель – 40 %).

4. Ефремов, И. А. Методическое и информационное обеспечение автоматизации проектирования телекоммуникационных устройств на основе программно-контролируемого радио [Текст] / И. А. Ефремов, А. С. Меркутов // Проектирование и технология электронных средств, 2013. – №3, – С. 16-21 (Соискатель – 85 %).

5. Ефремов, И. А., Библиотека компонентов внутрисхемного тестирования смешанных интегральных схем [Текст] / И. А. Ефремов, М. А. Кисляков, С. Г. Мосин // Программные продукты и системы, 2014. – № 1. – С. 187-190 (Соискатель – 20 %).

Статьи в сборниках и трудах конференций:

6. Ефремов, И. А. A Wireless System of Data Acquisition [Текст] / I. Efremov, S. Mosin // Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON), 2010 IEEE Region 8 International Conference on. – Sibir: IEEE, 2010. – P. 306 – 309 (Соискатель – 50 %).

7. Ефремов, И. А. Автоматизация проектирования телекоммуникационных систем на основе программно–определяемого радио [Текст] / И. А. Ефремов // 15-ый Юбилейный Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2011. – Т. 3. – С. 95 – 96.

8. Ефремов, И. А. Исследование влияния параметров АЦП на характеристики SDR систем при помощи САПР ADS [Текст] / И. А. Ефремов // Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Информационные технологии. – Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013. – С. 133.

9. Ефремов, И. А. Моделирование Verilog кода коррекции постоянной составляющей цифрового baseband сигнала при помощи САПР ADS [Текст] /

И. А. Ефремов // «Перспективные технологии в средствах передачи информации 2013». Материалы трудов ПТСПИ-2013.– Владимир, 2013,– т.1,–С.193-196.

10. Ефремов, И. А. Моделирование МШУ при помощи САПР Advanced Design System [Текст] / И. А. Ефремов // 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2012. – Т. 3. – С. 69-70.

11. Ефремов, И. А. Программно-аппаратный комплекс для моделирования и тестирования радиоканалов [Текст] / Е. В. Галичев, И. А. Ефремов, А. С. Меркутов // 14-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума. – Ч.1. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – С. 273 (Соискатель – 30 %).

12. Ефремов, И. А. Проектирование широкополосного SDR приемника [Текст] / И. А. Ефремов // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2012): сб. ст. II междунар. заочн. науч.-техн. конф. Поволжский гос. ун-т сервиса. –Тольятти: Изд-во ПВГУС, 2012.–Ч. 2 –С. 49-53.

13. Ефремов, И. А. Синтез VHDL кода цифрового фильтра в САПР MATLAB и его моделирование в САПР ADS [Текст] / И. А. Ефремов // 17-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2013. – Т. 3. – С. 52-53.

14. Ефремов, И. А. Система управления искусственным сердцем [Текст] / И. А. Ефремов // XXIII Международная инновационно-ориентированная конф. молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2011): матер. конф. (М., 14-17 дек. 2011 г.). – М: Изд-во ИМАШ РАН, 2011. – С. 149.

15. Ефремов, И. А. Цифровая обработка радиосигналов [Текст] / И. А. Ефремов// Materialy VII mezinarodni vedecko – prakticka conference “Vedecky prumysl evrepskeho kontinentu -2011”. Dil 24. Moderni informacni technologie. – Praha: Publishing House “Education and Science”, 2011. – 112 stran.

16. Ефремов, И. А. Цифровая обработка сигналов в SDR приемниках [Текст] / И. А. Ефремов // X международная молодёжная научно–техническая конференция «Будущее технической науки»: – Н. Новгород: Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р. Е. Алексеева, 2011. – С. 124.

Подписано в печать «___»_____2014 г.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л.1.0.

Тираж 100 экз. Заказ 22/14

Типография ООО «Печатный Двор»

600001, г. Владимир, ул. Студеная Гора, 34

тел. (4922) 44-31-52, (4922) 44-31-62