

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой РЗИ  
\_\_\_\_\_ А.В. Фатеев  
«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Устройства приема и обработки  
дискретных и аналоговых сигналов**

Методические указания по выполнению курсового проекта  
для студентов направлений 11.04.01 «Радиотехника» и  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Разработчики  
Профессор кафедры РСС, д.ф.-м.н..  
\_\_\_\_\_ А. С. Задорин;  
Ст.преподаватель кафедры РСС,  
\_\_\_\_\_ А.В.Максимов  
доцент кафедры РСС, к.т.н.  
\_\_\_\_\_ И.Ю. Кузьменко  
«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Задорин А. С., Максимов А.В., Кузьменко И.Ю.** Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов (УПО-ДАС). Методические указания по выполнению курсового проекта: учебное пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 58 с.

Приводятся методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине «Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов» для студентов-магистрантов направлений 11.04.01 «Радиотехника», 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

© Задорин А. С., Максимов А.В., Кузьменко И.Ю, 2019.

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ .....	3
Введение .....	5
Литература к введению .....	9
Раздел 1. Работа над курсовым проектом радиоприемного устройства .....	11
Задание на курсовое проектирование .....	11
Тип 1. Бытовой радиовещательный приемник по ГОСТ5651-89 .....	12
Тип 2. Приемник цифровой телекоммуникационной системы (ПЦТКС) .....	13
Тип 3. Прототипирование SDR- трансивера на платформе NI USRP-2920.....	15
График выполнения курсового проекта .....	17
Требования к оформлению пояснительной записки к КП .....	18
Титульный лист .....	19
Реферат .....	19
Оглавление ПЗ .....	20
Введение .....	20
Основная часть ПЗ.....	20
Заключение.....	20
Список использованных источников.....	20
Приложения .....	20
Защита курсового проекта .....	21
Литература к разделу 1 .....	22
Раздел 2. Последовательность проектирования аналогового РПрУ .....	24
1. Обоснование исходных данных .....	24
2. Синтез структурной схемы .....	25
3. Выбор метода обработки сигнала .....	26
4. Проектирование основных функциональных блоков РПрУ .....	31
5. Усилительный тракт РПрУ .....	32
Основные характеристики и параметры РПрУ .....	33
Чувствительность .....	33
Шум квантования АЦП.....	34
Быстродействие АЦП.....	36
Каналы наложения спектров АЦП.....	37
Разрядность АЦП.....	38
Динамический диапазон РПрУ .....	39
Динамический диапазон АЦП.....	40
Избирательность .....	40
Различия аналоговых и цифровых РПрУ по интермодуляции .....	42
Выбор структурной схемы РПрУ.....	44
Расчет полосы пропускания и коэффициента прямоугольности АЧХ тракта. ....	46
Выбор промежуточной частоты.....	46
Распределение усиления по тракту РПрУ .....	47

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Автоматическая регулировка усиления .....	48
Автоматическая регулировка чувствительности РПрУ .....	51
Выбор типовых узлов и интегральных микросхем РПрУ .....	52
Выбор средств частотной фильтрации. ....	52
Выбор активных элементов интегральных микросхем.....	54
Литература к разделу 2 .....	56
Приложение А. Форма бланка задания на курсовой проект .....	57
Приложение Б. Пример оформления титульного листа .....	58

## Введение

Современное радиоприемное устройство (РПрУ) представляет собой сложную систему, характеризуемую большим числом взаимосвязанных параметров, поэтому на всех стадиях его исследования и проектирования целесообразно использовать системный подход [1]. Он заключается в применении определенной последовательности проектирования и использовании методов синтеза и оптимизации, позволяющих получить оптимальную систему при заданных критериях ее качества [2].

Разработка РПрУ ведется в соответствии с системной иерархией от более сложного, к простому, от более общего представления к детализации. В прикладном понимании радиотехнической системой называется комплекс радиоэлектронной аппаратуры, предназначенный для решения определенных задач [3]. В иерархии радиотехнической системы ее составные части располагаются в порядке проектирования сверху вниз по степени убывания сложности, например: верхний, 5-й уровень иерархии системы, описывается *эскизным проектом* и *схемой общей*, определяющей составные части системы и их соединением между собой. Четвертый уровень иерархии описывается *структурной схемой* блока, третий - *принципиальной схемой функционального узла*, второй уровень иерархии - *схемой соединений (монтажной)* [1]. Таким образом, исходные данные для проектирования РПрУ формулируются в процессе разработки системы, в которую это устройство входит.

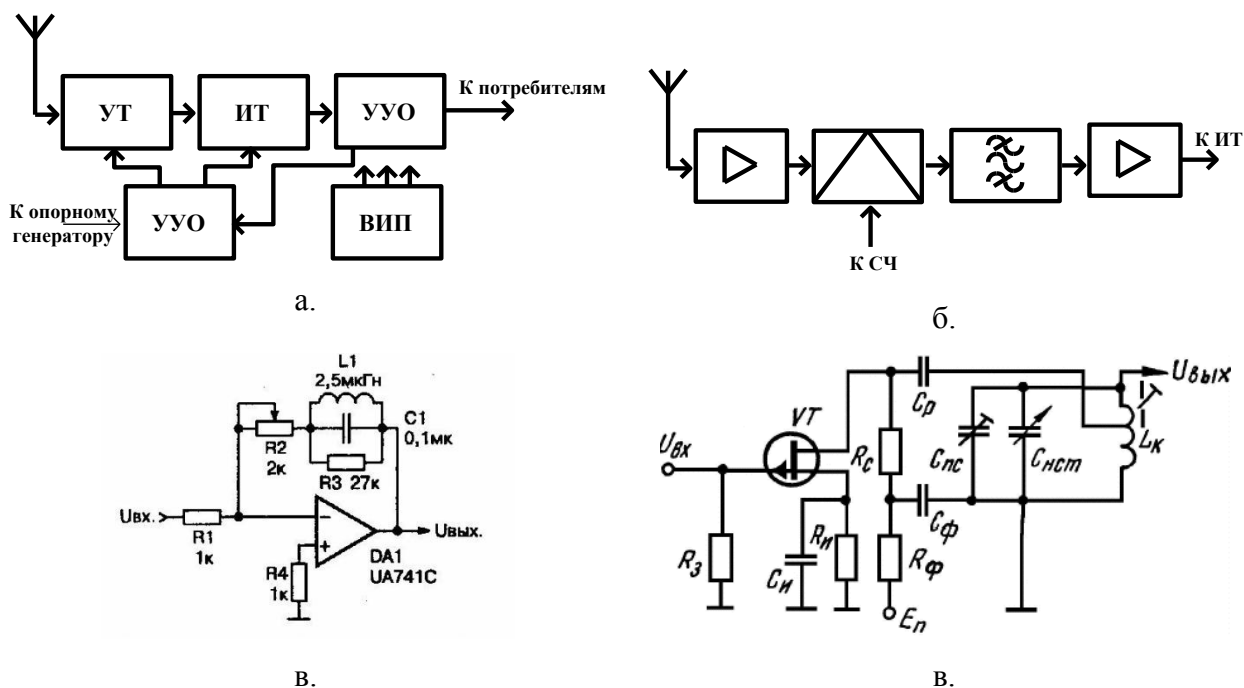


Рис. 1. Примеры структурных схем 3-го (а), 2-го (б) и 1 го (в) уровней иерархии РПрУ [1]

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Примерную структурную схему приемного устройства можно изобразить в виде пяти функциональных блоков (трактов, рис. 1а). Усилительный (усилительно-преобразовательный УТ) тракт принимает сигнал от антенны, отфильтровывает его от помех, смещает спектр входного сигнала на промежуточную частоту, на которой производится основная обработка сигнала, усиливает его.

Под **обработкой сигнала** здесь и далее мы будем понимать все преобразования сигнала (усиление, фильтрацию, ограничение, демодуляцию, регенерацию и т. д.), которые производятся в РПрУ для выделения из сигнала заложенной в нем информации.

В состав **усилительного тракта** могут входить вспомогательные узлы - система АРУ, ограничитель, логарифмический усилитель и т. п., влияющие на амплитудную характеристику усилительного тракта, но не вносящие искажений в принимаемую информацию.

**Информационный тракт** (ИТ) производит основную обработку сигнала. Он включает оптимальный фильтр, в значительной степени определяющий помехоустойчивость РПрУ, демодулятор сигнала, а также цепи последетекторной обработки. В состав информационного тракта могут также входить вспомогательные узлы - следящие системы автоматической подстройки фазы или частоты.

Синтезатор частот (СЧ) или **гетеродинный тракт** преобразует частоту внешнего или собственного опорного генератора и формирует из него сетки частот, необходимые для работы преобразователей частоты УТ. Синтезатор позволяет перестраивать приемное устройство на другую входную частоту. Отдельные синтезаторы могут входить в состав следящих систем. Кроме того, синтезатор может формировать сетки частот, необходимые для работы цифровых устройств обработки сигнала.

**Устройство управления и отображения** (УУО) реализует в автономном режиме заданный алгоритм работы приемного устройства - включение и выключение, поиск и выбор сигнала, адаптацию к меняющимся условиям работы и т. п., т.е. позволяет оператору вручную управлять приемным устройством и производит отображение состояния и качества работы устройства на соответствующих индикаторах.

Наконец, вторичный источник питания (ВИП) предназначен для преобразования энергии первичного источника в форму, удобную для использования непосредственно РПрУ.

Если перейти на следующий уровень иерархии, то, например, структурную схему лилейного тракта можно изобразить в виде совокупности типовых функциональных узлов - усилителей, преобразователей частоты, устройства АРУ и т. п. (рис. 1 б).

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Наконец, каждый типовой функциональный узел может быть представлен соединением нескольких операционных звеньев (элементарных функциональных узлов - рис. 1 в). **Операционное звено** - это устройство, производящее над электрическими сигналами операцию, соответствующую одной или нескольким алгебраическим операциям - умножение на постоянный коэффициент (усиление), перемножение двух сигналов, интегрирование и т. д. [1]. Примерами операционных звеньев являются отдельный каскад широкополосного усилителя, частотный фильтр, инвертор, аналоговый перемножитель сигналов и т. п.

В процессе синтеза функциональных узлов РПрУ часто реальное операционное звено заменяется его идеальным аналогом - устройством, параметры которого не зависят от источника сигнала и нагрузки, а функционирование описывается алгебраическим выражением (рис. 1 в). Это позволяет синтезировать структуру типовых функциональных узлов и блоков, не привязываясь к параметрам конкретных ИС, а в дальнейшем, учтя эти параметры, перейти к реальной оптимизированной структуре прибора

Можно показать, что для построения всех операционных звеньев в аналоговой технике достаточно использовать два звена - усилитель с инвертированием выходного сигнала и перемножитель сигналов [1]. Для придания этим звеньям свойств других звеньев к ним соответствующим образом подключаются линейные двухполюсники - активные или реактивные сопротивления. Для реализации разрывных функций (ограничения сигнала) - необходим также нелинейный двухполюсник - идеальный диод. Перечисленная совокупность двух операционных звеньев в сочетании с линейным и нелинейным двухполюсниками образует минимальную функционально полную систему аналоговых звеньев, на которых можно реализовать все функциональные узлы приемных устройств.

Настоящее пособие предназначено для оказания методической помощи студентам-магистрантам направлений 11.04.01 «Радиотехника» и 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» при их работе над курсовым проектом в рамках дисциплины «Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов» (УПО-ДАС). Указанная работа нацелена на развитие у студентов компетенции по исследованию и проектированию РПрУ на всех системных иерархических уровнях рис.1.

Тематика заданий на курсовое проектирование (КП) охватывает все основные разделы дисциплины УПО-ДАС и направлена на закрепление и самостоятельное освоение знаний, полученных на лекциях, практических и лабораторных работах.

Устройства РПрУ являются одной из основных составных частей любой радиотехнической системы. Новые технологии в их проектировании и изготовлении

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

ориентированы на использование в их составе специализированных цифровых процессоров, выполняющих большинство операций по обработке сигнала. Эта обработка обычно реализуется программно и сосредоточена в цифровой части устройства - процессоре цифровой обработки сигнала (Digital Signal Processor – DSP) или программируемой логической микросхеме (ПЛИС). Ввиду этого достигается значительно большая функциональность цифровых систем по сравнению с аналоговыми, так как смена выполняемых функций, стандарта связи, вида модуляции, обновление алгоритмов обработки до более современной версии осуществляется простой перезагрузкой программы или выполнением отдельной ее ветви. Эффективным способом решения задач системного моделирования и проектирования указанных устройств является использование соответствующих систем автоматизированного проектирования (САПР).

В настоящем пособии для подготовки эскизного проекта и моделирования структурной схемы разрабатываемого РПрУ к использованию предлагается одна из наиболее эффективных систем такого рода, а именно среда AWR Visual System Simulator (AWR VSS) [1]. Пакет VSS, вместе с интегрированными в NI AWR (Applied Wave Research) Design Environment программами Microwave Office (MWO) и Analog Office (AO), позволяет, не покидая среду проектирования, использовать MWO и AO проекты отдельных в разработке сложных систем. Пакет VSS хорошо совместим с учебными задачами [2,3]. Он позволяет разрабатывать и анализировать end-to-end системы связи, исследовать разнообразные схемы кодирования и модуляции сигналов, методы измерения их параметров, а также производительность устройств на системном уровне. С его помощью можно проводить симуляции работы УПО-ДАС, построенных из базовых блоков, входящих в состав проектируемой системы. Состав измерительных средств VSS позволяет проводить постановку “виртуальных экспериментов”, т.е. моделировать все блоки передатчика, приемника, и канала связи. Таким образом, можно оценивать поведение систем и измерять их характеристики - кривую коэффициента битовых ошибок (BER), ослабления мощности по соседнему каналу (ACPR), сигнальные созвездия, спектр мощности и так далее. VSS обеспечивает подстройку исследуемой схемы в режиме реального времени и наблюдать результаты корректировки ее параметров сразу на экране монитора. Для такой настройки среда имеет средство “Variable tuner”- изменения в реальном времени всех параметров схемы с наблюдением того, как это отражается на графиках.

Visual System Simulator построен как *система цифровой обработки сигналов*. Это означает, что все сигналы в системе являются цифровыми, т.е. представляют собой поток отсчетов. При этом точность моделирования задается частотой дискретизации. Блоки



## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

системы, независимо от того, являются они аналоговыми или цифровыми, представлены моделями цифровой обработки сигналов. Таким образом, в системе осуществляется непосредственное статистическое моделирование систем связи и радиоэлектронных устройств.

Весьма полезной компетенцией, приобретаемой студентами при работе над курсовым проектом, является этап прототипирования РПрУ (**прототипирование** - [англ. prototyping](#) от др.-греч. πρῶτος — первый и τύπος — отпечаток, оттиск; первообраз), т.е. быстрая «черновая» реализация базовой функциональности устройства для анализа работы системы в целом. Тематика заданий на КП включает развитие указанной компетенции с использованием программно определяемой радиосистемы (Software-defined radio, SDR, радиосредства, алгоритмы работы которых определяются программным обеспечением), представленной блоком NI USRP-2

В пособии используется пораздельная нумерация литературных ссылок, рисунков и формул. Ссылки на рисунки и формулы из других разделов оформляются с указанием соответствующего раздела, отделенного от номера формулы точкой. Например, формула (2.18) и т.п.

### Литература к введению

1. Банков В.Н., Л.Г. Барулин и др. Радиоприёмные устройства / Под ред. Л.Г. Барулина. – М.: Радио и Связь, 1984.
2. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ : учебное пособие / - М. : КНОРУС, 2010. 224 с.
3. ГОСТ Р 52003-20 Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения.
4. Руководство по Visual System Simulator NI AWR Design Environment v14 Edition ([https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS\\_Getting\\_Started\\_ru.pdf](https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS_Getting_Started_ru.pdf))
5. А.А.Курушин. Практикум проектирования СВЧ устройств с помощью программы Microwave Office. Электронная книга. Часть 5. М., 2011,2016. – 171 с. ([http://kurushin.ucoz.ru/load/praktikum\\_proektirovaniya\\_svch\\_ustrojstv\\_s\\_pomoshhju\\_programmy\\_microwave\\_office/1-1-0-30](http://kurushin.ucoz.ru/load/praktikum_proektirovaniya_svch_ustrojstv_s_pomoshhju_programmy_microwave_office/1-1-0-30))
3. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.

6. Выбор оптимального метода модуляции сигнала в современных цифровых системах радиосвязи. Моделирование в среде AWR Design Environment. Московский государственный университет. М. 2008.
7. Ю. К. Евдокимов, В. Р. Линдваль, Г. И. Щербаков. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора / - М. : ДМК пресс, 2010. - 400 с. - ISBN 5-94074-346-3.

## **Раздел 1. Работа над курсовым проектом радиоприемного устройства**

Целью курсового проекта по дисциплине «Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов (УПО-ДАС)» является развитие у студентов-магистрантов направлений 11.04.01 «Радиотехника» и 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» компетенции по решению инженерных задач, связанных с исследованием и проектированием цифровых и аналоговых устройств приема и аналого-цифровой обработки сигналов различного назначения.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- ОК-4 способностью адаптироваться к изменяющимся условиям, переоценивать накопленный опыт, анализировать свои возможности;
- ОПК-1 способностью понимать основные проблемы в своей предметной области, выбирать методы и средства их решения;
- ОПК-5 готовностью оформлять, представлять, докладывать и аргументированно защищать результаты выполненной работы;

В результате изучения дисциплины студент должен:

- **знать** современные методы математического описания принципа действия функциональных блоков и систем радиоприемного устройства (РПрУ); основные закономерности преобразования сигналов в типовых каскадах приемного устройства; методы обеспечения помехоустойчивости при приеме и преобразовании сигналов;
- **уметь** использовать современные средства вычислительной техники для решения задач приема и обработки сигналов; работать со специальной литературой; готовить техническую документацию на разработанные устройства.
- **владеть** методами и способами инженерного проектирования современных РПрУ различного назначения, их подсистем, блоков и узлов; методами экспериментальных исследований и испытаний разработанных устройств; методами обработки результатов экспериментальных исследований

### **Задание на курсовое проектирование**

Курсовой проект выполняется по индивидуальным заданиям. Задание составляется преподавателем, утверждается заведующим кафедрой и выдается студенту в первой половине семестра. Бланк задания приведен в приложении А. Уровень разработки курсового проекта (КП) должен соответствовать требованиям стандарта на «Эскизный проект» [1]. Оформление пояснительной записки к КП производится в соответствии с образовательный стандарт университета [2].

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Тематика заданий на курсовое проектирование (КП) направлена на закрепление и самостоятельное освоение знаний, полученных на лекциях, практических и лабораторных работах. Она разбита на три основных тематических блока, охватывающих все основные разделы дисциплины УПО-ДАС. В рамках каждого из них проводится разработка эскизных проектов РПрУ следующих типов.

### ***Тип 1. Бытовой радиовещательный приемник по ГОСТ5651-89***

1. Исходные данные к проекту:
  - 1.1. Диапазон частот (МГц) -;
  - 1.2. Условия эксплуатации -;
  - 1.3. Группа сложности -;
  - 1.4. Чувствительность, ограниченная шумами, при отношении сигнал/шум, дБ., не менее – ;  
по напряжению со входа для внешней антенны, мкВ, не хуже - ;
  - 1.5. Односигнальная избирательность по соседнему каналу при расстройке  $\pm 9$ кГц, дБ, не менее -;
  - 1.6. Односигнальная избирательность по зеркальному каналу, дБ, не менее: -;
  - 1.7. Глубина ручной регулировки усиления, дБ -.
  - 1.8. Действие ручной автоматической регулировки усиления:  
изменение уровня сигнала на входе, дБ, - ;  
изменение уровня сигнала на выходе, дБ, не более - ;
  - 1.9. Технологическая платформа структурной схемы РПрУ- аналоговый инфрадинный приемник с технологией программно-определяемого радиоприема (Software Defined Radio).
2. Перечень вопросов, подлежащих разработке:
  - 2.1. Разработка структурной схемы РПрУ и ее эскизный расчет;
  - 2.2. Разработка программной модели РПрУ в среде AWR Visual System Simulator и проверка результатов расчета по п.2.1;
  - 2.3. Электрический расчет принципиальной схемы и симуляция работы в среде к.-л. САД-системы следующих блоков приёмника:  
Усилитель высокой частоты и преселектор;  
Первый преобразователь;  
Фильтр усилителя первой промежуточной частоты;
  - 2.4. Сравнение расчётных характеристик приёмника с заданными ТЗ.

3. Перечень обязательных чертежей:
  - 3.1. Структурная схема приёмника;
  - 3.2. Принципиальная и монтажная схемы перечисленных выше каскадов приёмника, выполненные в системе P-Cad.
  - 3.3. Перечень элементов.
  - 3.5. Топологическая схема и АЧХ ПАВ-фильтра.
4. Перечень обязательных чертежей:
  - 3.4. Структурная схема приёмника;
  - 3.5. Принципиальная схема преселектора и ПрЧ приёмника,
  - 3.6. Перечень элементов.
5. Список литературы:
  - 4.1. Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин и др.; Под ред. Н.Н. Фомина. Радиоприемные устройства: Учебник для ВУЗов /- М.: Горячая линия, 2007. - 520 с.
  - 4.2. ГОСТ 5651-89. Аппаратура радиоприемная бытовая. Общие технические условия.
  - 4.3. У. Томаси. Электронные системы связи /- М.: Техносфера, 2007. - 1360 с.
  - 4.4. Задорин А. С., Максимов А.В., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов (УПО-ДАС). Методические указания по курсовому проектированию: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 77 с.

**Тип 2. Приемник цифровой телекоммуникационной системы (ПЦТКС)**

Назначение ЦТКС: многоканальная передача данных по каналу наземной радиосвязи

Исходные данные к проекту:

- 1.1. Тип ЦТКС - ;
- 1.2. Диапазон частот, МГц -;
- 1.3. Мощность передатчика, Вт - ;
- 1.4. Допустимая вероятность битовой ошибки -;
- 1.5. Тип используемой цифровой модуляции - ;
- 1.6. Длина линии связи, км. -;
- 1.7. Тип трассы канала радиосвязи - ;
- 1.8. Точка пересечения ИМИ 3 -го порядка приемника ТКС, дБм. - ;

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

1.9. Уровень системных потерь, дБ -;

1.10. Тип используемых антенн -;

1.11. Коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, дБ -  $A_t = \_$ ,  $A_r = \_$ ;

Перечень вопросов, подлежащих разработке:

2.1. Разработка эскизного проекта ПЦТКС;

2.2. Расчет структурной схемы ПЦТКС;

2.3. Разработка программной модели ПЦТКС в среде AWR Visual System Simulator и проверка результатов расчета по п.2.1;

2.4. Электрический расчет схемы и симуляция работы в среде САД-системы следующих блоков приёмника:

Усилитель радиочастоты ПЦТКС, оценить коэффициент шума системы;

Оценить предельную битовую скорость передачи  $B$  (битрейт) системы;

Определить требования к полосе частот канала связи;

Расчет структурной схемы системы АРУ ПЦТКС;

Сравнение расчётных характеристик приёмника с заданными ТЗ.

1. Перечень обязательных чертежей:

1.1. Функциональная схема ЦТКС;

1.2. Структурная схема приемника ПЦТКС;

Перечень поясняющих рисунков и графиков:

1.1. Структура используемого сигнального созвездия;

1.2. Глазковая диаграмма на выходе модема;

Список литературы:

1.1. В. Крухмалев, В. Н. Гордиенко, А. Д. Моченое и др.; Под ред. В. Н. Гордиенко и В. В. Крухмалева. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учебник для вузов / В. - М.: Горячая линия - Телеком, 2004.

1.2. У. Томаси "Электронные системы связи" - М.: Техносфера, 2007. - 1360 с.

1.3. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред. Д. Д. Кловского. - М.: Радио и связь, 2000.

1.4. W. T. Barnett, «Multipath propagation at 4, 6 and 11 GHz,» Bell System Technical Journal, vol. 51, no. 2, pp. 321{361, February 1972.

1.5. A. Vigants, «Space diversity engineering,» Bell System Technical Journal, vol. 54, no. 1, pp. 103{142, January 1975.

1.6. Задорин А. С., Максимов А.В., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов (УПО-ДАС). Методические указания по курсовому

проектированию: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 77 с.

1.7. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.

1.8. Задорин А. С., Максимов А.В., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов (УПО-ДАС). Методические указания по выполнению лабораторных работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 77 с.

### ***Тип 3. Прототипирование SDR- трансивера на платформе NI USRP-2920***

Назначение: бытовой трансивер предназначен для приема и передачи данных.

#### 1. Исходные данные к проекту:

- 1.1. Тип цифровой модуляции - \_\_\_\_\_;
- 1.2. Скорость передачи цифровых данных - \_\_\_\_\_;
- 1.3. Коэффициент ошибок по битам (BER) - \_\_\_\_\_;
- 1.4. Чувствительность, ограниченная шумами, при отношении сигнал/шум не менее 20 дБ по напряжению со входа для внешней антенны, мкВ, не хуже - \_\_\_\_\_;
- 1.5. Глубина автоматической регулировки усиления, дБ - \_\_\_\_\_;
- 1.6. Технологическая платформа - приемник с цифровой обработкой данных - SDR (Software Defined Radio) на платформе NI USRP-2920.

#### 2. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

- 2.1. Разработку структурной схемы радиоприемника и ее эскизный расчет в среде AWR Visual System Simulator;
- 2.2. Разработка программной модели ПЦТКС и проверка результатов расчета по п.2.1;
- 2.3. Разработка структурной схемы и симуляция работы в среде LabView следующих блоков приёмника:
  - последовательно-параллельный конверторы, для формирования I и Q составляющих из входного битового потока;
  - блоков байтовой синхронизации;
  - блоков битовой синхронизации;

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

- параллельно – последовательный конверторы, для формирования битового потока из I и Q составляющих.

2.4. Сравнение полученных характеристик трансивера с заданием.

3. Перечень обязательных чертежей и рисунков:

3.1. Структурная схема приёмника;

3.2. График зависимости BER от мощности передатчика.

3.3. Сигналы на входе и выходе следующих блоков:

- последовательно-параллельный преобразователь;

- блок байтовой синхронизации;

- блоков битовой синхронизации;

- параллельно – последовательный конвертор.

4. Список литературы:

4.1 Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: Пер. с англ. / Под ред. В. И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. –520 с.: ил.

4.2 Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с. : ил. – Парал. тит. Англ.

4.3 Задорин А. С., Максимов А.В., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов (УПО-ДАС). Методические указания по курсовому проектированию: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 77 с.

4.4 Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.

4.5 Задорин А. С., Максимов А.В., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов (УПО-ДАС). Методические указания по выполнению лабораторных работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 77 с.



## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Конкретные технические задания на курсовые проекты, варьируются в пределах каждого блока за счет изменения частотного диапазона, группы сложности устройства, длины линии связи, условий распространения радиоволн, вида цифровой модуляции и др.

### ***График выполнения курсового проекта***

#### *1. Анализ исходных данных и задания.*

Ознакомление с рекомендованной литературой и поиск дополнительной литературы, источников Internet, дополнительные консультации с руководителем проекта, определение методов и подходов к выполнению проекта –1–2 неделя семестра. При выдаче задания на курсовой проект обсуждается тема и цель работы, список ключевых литературных источников и обсуждаются вопросы, которые должны быть отражены в проекте. Для поиска дополнительной литературы по теме курсового проекта студентам рекомендуется перечень соответствующих отечественных и зарубежных источников

#### *2. Литературный обзор.*

Обоснование направлений исследований – 3-я -4-я недели семестра.

Данный раздел включает в себя патентно-информационное исследование, анализ отечественных и зарубежных литературных источников и прогнозные исследования методам построения трактов РПрУ, выбранным магистрантом для дальнейших исследований. Дается описание объекта и предмета исследований. Выполняется обоснование выбора методов моделирования узлов и систем приемника.

В ходе выполнения курсового проекта студенты должны самостоятельно ознакомиться с рекомендованной литературой и осуществить поиск дополнительной литературы по теме курсового проекта. Работая с периодическими изданиями, каждый студент должен найти не менее 4–5 работ (обзоров, статей, патентов, кратких сообщений и т. д.), непосредственно связанных по тематике с заданием на курсовую работу. После чего составляется план литературного обзора. При работе над литературным обзором студенты должны проанализировать и в сжатой форме изложить общие теоретические представления и известные из литературы экспериментальные данные по теме. Объем литературного обзора определяется необходимостью полного раскрытия предложенной темы и составляет примерно 12–15 страниц печатного текста. После того как будет проработан литературный обзор, студент должен сравнить найденные в литературных источниках подходы к проектированию РПрУ, оценить теоретически ожидаемые результаты для различных типов архитектур приемника.

#### *3. Основная часть – 5-ая - 6-ая недели*

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Подразумевает описание разработки структурной схемы и компьютерной модели устройства, исследование и оптимизация режимов его работы. В случае необходимости приводятся альтернативные решения по структуре РПрУ, проводится их сравнительный анализ. Выполняется разработка подходов, схем и окончательных технических решений

### *4. Исследовательская часть – 6-8 неделя.*

Данная часть посвящена наиболее сложным проблемам, возникающим при разработке проекта. Здесь необходимо какие инженерные методы проектирования применялись для разработки и реализации задания курсового проекта. Необходимо сформулировать понимание последствий принимаемых в выполняемой работе инженерных решений.

В данном разделе, как правило, проводится математическое или физическое моделирование процесса приема и обработки цифровых и аналоговых сигналов в РПрУ. В части проектов, связанных с прототипированием SDR-приемников, необходимо использование физического натурного моделирования с использованием блоков NI USRP.

### *7. Оформление курсового проекта, защита курсового проекта – 9–10 неделя.*

Оформление документов к курсовому проекту проводится в соответствии с требованиями образовательного стандарта университета [2], а также ЕСКД [3-6].

Разработку конструкторской и технологической документации рекомендуется выполнять на базе современных САПР.

Работа над курсовым проектом строится по календарному графику, что гарантирует своевременное и качественное выполнение задания.

### **Требования к оформлению пояснительной записки к КП**

В соответствии с требованиями образовательного стандарта университета [2] курсовой проект по дисциплине УПО-ДАС состоит из текстового документа и графического материала. Текстовый документ именуется «Пояснительная записка к курсовому проекту по дисциплине УПО-ДАС» и должен содержать следующие разделы:

- титульный лист;
- реферат (аннотация);
- задание;
- оглавление;
- введение;
- основную часть;
- заключение;
- список использованных источников;

- приложения.

Текст пояснительной записки (ПЗ) должен быть выполнен на русском языке. Использование в ПЗ профессиональных терминов должно соответствовать требованиям ГОСТ 24375-80 «Радиосвязь. Термины и определения» [6].

К графическому материалу относят демонстрационные материалы (иллюстрации), чертежи и схемы, которые позволяют более наглядно отобразить суть курсового проекта при ее публичной защите. Их оформление должно соответствовать требованиям ЕСКД на правила выполнения электрических схем, обозначений, терминологии и др. [3-6].

### ***Титульный лист***

Пример оформления титульного листа приведен в приложении Б данного пособия.

### ***Реферат***

Реферат размещается на втором листе пояснительно записки. Заголовком этого листа служит слово «Реферат», записанное симметрично тексту. Реферат должен содержать:

- сведения о количестве листов, количестве иллюстраций, таблиц, использованных источников, приложений;
- перечень ключевых слов;
- текст реферата.

Перечень ключевых слов состоит из 5 – 15 слов или словосочетаний, которые в наибольшей мере характеризуют содержание текста пояснительной записки. Все слова или словосочетания пишутся прописными буквами в именительном падеже через запяты.

Текст реферата должен отражать

- объект исследования или разработки;
- цель работы;
- метод исследования и название методологии построения РПрУ использованной для разработки проекта;
- полученные результаты;
- основные характеристики разработанного приемника;
- эффективность и значимость работы;
- предположения о развитии объекта исследования;
- дополнительные сведения (особенности выполнения и оформления проекта).

Если текст пояснительной записки не содержит сведений по какой-либо из перечисленных структурных частей реферата, то в тексте реферата она опускается, при этом последовательность изложения сохраняется.

## ***Оглавление ПЗ***

Оглавление ПЗ должно отражать все материалы, представленные в пояснительной записке. Слово "Оглавление" записывают в виде заголовка, симметрично тексту, с прописной буквы. В оглавлении перечисляются заголовки разделов, подразделов, список литературы, каждое приложение и указывают номера листов, на которых они начинаются.

Материалы, представляемые на технических носителях данных ЭВМ, должны быть перечислены в содержании с указанием вида носителя, обозначения и наименования документов, имен и форматов соответствующих файлов, а также места расположения носителя в пояснительной записке.

Если при публичной защите используется графический материал, в конце содержания его перечисляют с указанием: «На отдельных листах».

## ***Введение***

В разделе «Введение» указывают цель проекта, область применения разрабатываемого приемника, и его техническое значение. Заголовок «Введение» записывают с абзаца с прописной буквы.

## ***Основная часть ПЗ***

Содержание основной части проекта должно отвечать техническому заданию на проектирование и требованиям, изложенным в методических указаниях кафедры [9,10].

## ***Заключение***

Заголовок «Заключение» записывается с абзаца с прописной буквы. Заключение должно содержать краткие выводы по результатам работы, степень соответствия разработанного проекта РПрУ заданию, его характеристики, рекомендации по использованию и внедрению полученных результатов.

## ***Список использованных источников***

Заголовок «Список использованных источников» записывается симметрично тексту. В список включают только те источники, на которые имеются ссылки в тексте пояснительной записки. Источники нумеруются в порядке их упоминания в тексте пояснительной записки арабскими цифрами.

## ***Приложения***

В приложения рекомендуется включать материалы иллюстративного и вспомогательного характера. Как правило, в приложения включаются:

- Структурные, принципиальные и монтажные схемы РПрУ, его отдельных систем и блоков;

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

- Схемы программных алгоритмов, используемых в проекте;
- Перечни элементов принципиальных схем;
- акты внедрения.

На все приложения в тексте пояснительной записки должны быть даны ссылки. Приложения располагают и обозначают в порядке ссылок на них в тексте пояснительной записки. Приложения обозначают заглавными буквами русского алфавита, начиная с А, за исключением букв Ё, З, И, О, Ч, Ъ, Ы, Ь. Например: «Приложение Б».

Каждое приложение пояснительной записки следует начинать с нового листа с указанием наверху посередине страницы слова «Приложение» и его обозначения, а под ним в скобках – «обязательное» (если его выполнения предусмотрено заданием) или «справочное».

Приложение должно иметь заголовок, который записывают симметрично относительно текста с прописной буквы отдельной строкой.

### **Защита курсового проекта**

После написания проведения необходимых расчетов, моделирования и прототипирования РПрУ оформляется пояснительная записка к КП, которая сдается преподавателю на проверку. Пояснительная записка должна быть скреплена или переплетена.

Преподаватель проверяет работу и на обороте титульного листа записывает свои замечания. Если в работе отсутствуют серьезные недостатки, на титульном листе пишется заключение: «После доработки к защите». Это означает, что после устранения замечаний данную работу можно защищать. В противном случае, при наличии грубых ошибок, пояснительная записка сдается на проверку вторично.

Процедура защита является важным образовательным элементом выполнения курсового проекта. Студент должен постоянно развивать свои способности по аргументированной защите принимаемых им решений. Можно получить низкую отметку, имея идеально подготовленный проект. И наоборот, получить высокую оценку проекта, имеющего некоторые недостатки.

Отметка за выполнение курсового проекта выставляется на основании семи показателей:

- сложность задания на проектирование;
- качество оформления пояснительной записки;
- доклад;
- качество интерфейса программы моделирования и прототипирования РПрУ;

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

- степень соответствия разработанной программы выданному заданию;
- ответы на вопросы.

Сложность типового задания, варианты которого приведены в таблице 2.1, оценивается в четыре балла. Если студент получает нетривиальное задание, выполнение которого требует нестандартного решения, применения нетрадиционных подходов к проектированию РПрУ, поиска и изучения дополнительной литературы, его сложность оценивается в пять баллов.

Оценка за второй показатель выставляется за степень соответствия пояснительной записки соответствующим ГОСТам, образовательному стандарту вуза [2].

Важным элементом защиты является доклад. На него дается пять минут. Не стоит тратить много времени, рассказывая об общих вопросах теории. Уверенный, логически связанный доклад задает тон защите, показывает профессиональный уровень разработчика. Деля доклад, не забывайте подкреплять свои слова демонстрацией работы программы. Следует продумать наиболее интересные стороны проекта, которые позволят наиболее эффективно его преподнести во время доклада.

На бланке задания указаны требования, предъявляемые к разрабатываемому приемнику. При выполнении всех пунктов указанного раздела по данному критерию ставится оценка пять. Если разработка не соответствует всем пунктам ТЗ, оценка снижается.

После окончания доклада студенту задаются вопросы. В отличие от теоретического экзамена вопросы здесь задаются только по теме курсового проекта, т.е. архитектуре приемника, степени проработки и моделирования структурной схемы и его отдельных узлов. Студент должен понимать и уметь объяснить необходимость и работу каждого блока и элемента этих схем. Правильность и полнота ответов определяют оценку по наиболее важному критерию.

Итоговая отметка, которая проставляется в зачетную книжку и ведомость, определяется путем усреднения семи оценок, но не может быть выше, чем оценка, выставляемая за ответы на вопросы.

### **Литература к разделу 1**

1. ГОСТ 2.119-73 ЕСКД. Эскизный проект.
2. ОС ТУСУР 01-2013 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля». Томск, 2013.
3. ГОСТ 2.701-84 ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению.
4. ГОСТ 2.702-75 ЕСКД. Правила выполнения электрических схем.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

5. ГОСТ 2.710-81 ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах.
6. ГОСТ 24375-80 Радиосвязь. Термины и определения
7. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
8. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.
9. Задорин А. С., Максимов А.В., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов (УПО-ДАС). Методические указания по выполнению лабораторных работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 77 с.
10. Задорин А. С. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по самостоятельной работе: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 24 с.

## **Раздел 2. Последовательность проектирования аналогового РПрУ**

Разработка РПрУ на любом из уровней иерархии (его структурной, принципиальной или монтажной схем) начинается с этапа обоснования исходных внешних параметров устройства. На следующем этапе проектирования производится разработка устройства для обоснованных исходных данных на своем уровне иерархии, определяются требования к характеристикам составных частей устройства, обеспечивающие заданные внешние параметры. После оценки реализуемых параметров может возникнуть необходимость пересмотра структуры системы или внешних исходных данных устройства.

С учетом сказанного, последовательность учебного проектирования аналоговых и цифровых РПрУ можно представить в следующем виде [1].

1. Обоснование исходных данных на разработку РПрУ
2. Синтез структурной схемы. Определение требований к составным частям РПрУ.
3. Синтез структурных схем функциональных блоков.
4. Прототипирование структуры РПрУ, проверка базовой функциональности всего устройства.
5. Выбор элементной базы и проектирование типовых функциональных узлов. Разработка принципиальных схем.

Обязательными к разработке являются первые три из перечисленных этапов проектирования РПрУ. Наличие п.п.4,5 в задании на КП является вариативной опцией.

Фактическая разработка каждого из перечисленных этапов идет с частым возвратом к предыдущим этапам, т.е. представляет собой цепь последовательных приближений к оптимальному решению.

### ***1. Обоснование исходных данных***

На данном этапе разработки КП определяется связь проектируемого РПрУ со смежными устройствами, а также определяются внешние параметры составляющие содержание технического задания (ТЗ) на КП, в наибольшей степени характеризующие качество устройства. Для радиовещательных приемников эти параметры определяются ГОСТ 5651-89, на остальные - соответствующими межведомственными и внутренними нормами или согласуются между разработчиком и заказчиком [1].

Для синтеза и оптимизации проектируемого РПрУ необходимо установить критерий оптимальности устройства, учитывающий значения его показателей качества, ограничений, накладываемых на эти показатели и структуру приемника. Данная процедура в общем случае производится эвристически, т.е. базируются на не четких



правилах, а на профессиональных знаниях, опыте, интуиции разработчика, которые и определяют его тактику при решении слабо структурированных задач.

### ***2. Синтез структурной схемы***

Следующий этап проектирования РПрУ связан с установлением связи заданных показателей качества с внутренними параметрами радиоприемника. Для этого создается компьютерная расчетно-математическая модель проектируемой системы, отражающая основные закономерности ее функционирования и существенные связи между составляющими частями в форме VSS- проекта.

Соответственно иерархии систем существует иерархия моделей. При оптимизации электрических характеристик модель РПрУ удобно представлять в виде указанной структурной модели прибора.

Существует **два метода решения задачи синтеза - эвристический и математический** [1]. В первом из них модель синтезируется эвристически, т.е. на основе накопленного опыта, анализа литературы, интуитивных соображений. На основе исходных данных создается компьютерная модель устройства, схема внешних воздействий и набор измерительной аппаратуры.

Вначале проводится оценочный математический расчет модели устройства, результатом которого должна явиться компьютерная VSS-модель приемника. Далее, с помощью имитационного моделирования VSS- проекта проводится уточняющий анализ модели РПрУ. Результатом данного анализа является определение значений внешних показателей качества радиоприемника в зависимости от внутренних параметров его модели.

Таким образом, определенный набор итераций по имитационному моделированию VSS- проекта открывает возможность оптимизации его внутренних параметров по критерию заданному ТЗ на КП. Несмотря на простоту, данный метод является достаточно универсальным, доступным и применим к системам любой сложности [1].

В общем случае для эвристического синтеза схемы рекомендуется метод функционального наращивания [1]. В его рамках, на основе исходных данных на РПрУ составляется перечень функций, которые должно реализовать синтезируемое устройство. Далее изображается схема этого устройства путем соединения в соответствующем порядке узлов, реализующих эти функции. В рамках этой процедуры синтеза в качестве исходной можно использовать схему на рис. 0.1а, где изображены основные функциональные блоки приемного устройства.

Одновременно с синтезом структурной схемы на основе перечней типовых параметров функциональных блоков составляются исходные данные для проектирования этих блоков.

На этапе синтеза общей структурной схемы приемного устройства, предназначенной для оптимизации, функциональные блоки детализируются в минимальной степени. Так, усилительный тракт может представляться в виде линейного четырехполосника, характеризуемого коэффициентом усиления, прямоугольной полосой пропускания и допустимым коэффициентом шума. Информационный тракт в этом случае содержит минимальный набор необходимых операционных звеньев, Остальные функциональные блоки на этапе часто не учитываются.

При математическом синтезе оптимальной системы разработчик в результате математических выкладок получает некоторые соотношения, определяющие поведение этой системы для заданной модели внешних воздействий. После этого переходят к этапу построения структурной, функциональной или электрической схем системы. Математический синтез принципиально позволяет найти наилучшую из возможных систем и сокращает время проектирования, но лишь при существенном упрощении модели. Поэтому этот метод синтеза применяется обычно для относительно простых систем либо для оценки потенциальных характеристик сложных систем.

Таким образом, с помощью математического синтеза находится оценка оптимальной структуры РПрУ для его наиболее важного показателя качества. После этого, с помощью имитационного моделирования VSS- проекта, структура приемника оптимизируется для других показателей, к ней наращиваются узлы, выполняющие не учтенные при синтезе функции. Полученная более сложная модель анализируется и корректируется с учетом уже всех показателей качества.

### ***3. Выбор метода обработки сигнала***

В РПрУ первых поколений, выполненных на лампах и транзисторах, использовался в основном традиционный аналоговый метод обработки сигнала. В современных радиоприемниках широко применяется цифровая обработка сигнала, а также различные изделия функциональной электроники (функциональные устройства). Выбор способа обработки сигнала, типа элементной базы влияет на структурную схему РПрУ и производится на начальных этапах проектирования [1-4].

Особенностью цифровой обработки сигнала являются обязательная дискретизация аналогового сигнала во времени, квантование значений и преобразование дискретных выборок в числа. Преобразованию может подвергаться как сигнал целиком, так и его

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

параметры, такие как амплитуда, фаза и др., необходимые для дальнейшего выделения заложенной в сигнале информации. Далее все операции производятся уже над полученными в результате преобразования числами. При цифровой обработке сигнала реализуются высокая точность вычислений, которую можно повысить до любого необходимого значения путем усложнения аппаратуры, высокая стабильность характеристик за счет отсутствия свойственных аналоговым цепям параметрических уходов, возможность запоминания (задержки) на неограниченное время больших массивов информации и быстрого ее воспроизведения. В синхронном режиме работы стабильность временных последовательностей цифровых блоков определяется стабильностью опорного генератора. На цифровых схемах оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы обработки сигнала реализуются проще, чем на аналоговых. Цифровая аппаратура не требует настройки, ее соединения регулярны, элементная база однородна, т.е. имеется закономерная повторяемость элементов структуры и связей между ними. Цифровые цепи позволяют легко осуществлять адаптацию устройства к сигналу или внешнее изменение алгоритма работы, на них просто реализуются всевозможные логические функции. Цифровые ИС обладают высокой надежностью, хорошей схемотехнической проработкой, имеют высокий уровень интеграции.

Однако цифровым узлам присущи и некоторые недостатки. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой необходимо его предварительное усиление до нескольких вольт. Цифровые узлы имеют меньшее быстродействие, большую аппаратную сложность, им принципиально присущи шумы квантования и др. [1-4].

Приемные устройства с цифровой обработкой сигнала по количеству узлов, выполненных на ЦИС, можно разбить на две группы. К первой относятся аналого-цифровые РПрУ; в которых на ЦИС реализованы отдельные узлы: часть информационного тракта (демодулятор, фильтр, следящие системы, схемы поиска сигнала и т. п.), АРУ, синтезатор частоты, устройство управления и отображения и т. п. Ко второй группе относятся цифровые радиоприемные устройства (ЦРПрУ, рис. 2а). Усилительный тракт УТ производит предварительную частотную фильтрацию сигнала, усиление и смещение его по частоте. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует аналоговый сигнал в цифровой код, который подается уже на собственно цифровой радиоприемник. Последний представляет собой цифровой процессор (ЦП), осуществляющий обработку сигнала - дополнительное преобразование по частоте, фильтрацию, поиск сигнала, демодуляцию и т. п. по заданному алгоритму. Если в результате обработки сигнала необходима информация в аналоговой форме, то после процессора может быть установлен цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

При достаточном запасе по быстродействию процессор может использоваться в режиме временного уплотнения для обработки нескольких сигналов, которые подключаются к нему по очереди один раз за период частоты дискретизации.

Цифровой процессор выполняется по двум различным методам организации алгоритма. При так называемой *аппаратной реализации* последовательность обработки сигнала в ЦП определяется электрическими соединениями между отдельными ИС. Отсюда следует другое определение этой организации - *жесткая логика*. Каждый узел ЦП в данной схеме предназначен для выполнения конкретной операции. Поэтому в ЦП такого типа можно выделить узлы, соответствующие по функциям узлам в аналоговом РПРУ (смеситель, фильтр, генератор и т. п.).

Указанная архитектура ЦРПРУ позволяет достигнуть наибольшего быстродействия при наименьших потребляемой мощности и массе. Ее недостатком является невозможность изменения алгоритма обработки сигнала в приборе без его существенной переделки, трудоемкость разработки аппаратных средств, относительно большие габариты из-за использования ИС средней степени интеграции [1]. В последние десятилетия указанная технология получила название программно-определяемого радио (Software-defined radio, SDR- радиосредства, алгоритмы работы которых определяются программным обеспечением) [5-8].

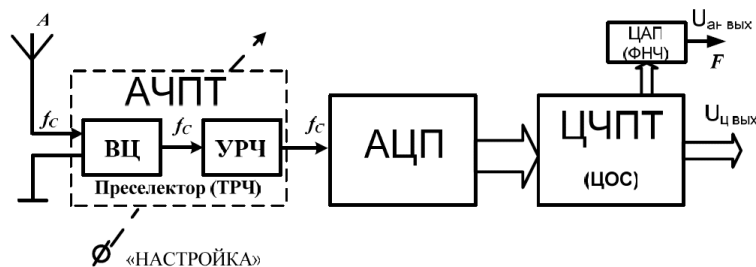


Рис.2 а. Структурная схема цифрового SDR-РПРУ прямого усиления

Структурная схема SDR-приемника прямого усиления показана на рис. 2а. В данной схеме ВЦ играет роль антиализингового фильтра для подавления каналов наложения спектров. Каскад УРЧ обеспечивает заданный уровень радиосигнала на входе АЦП.

Главная трудность в построении реального приемника такого типа обуславливается ограничениями АЦП, который должен обладать широкой полосой пропускания, работать с высокой частотой дискретизации и обладать большим динамическим диапазоном.

Меньшие требования по быстродействию предъявляются к АЦП SDR-приемника супергетеродинного приемника, структурная схема которого показана на рис.2 б. В этой схеме сигналы различных частот из диапазона настройки радиоприёмника в преобразователе частоты переносятся на постоянную промежуточную частоту, на которой реализуются требования по избирательности и усилению, обеспечивающие нормальную работу АЦП. Таким образом, к преимуществам SDR-супергетеродинов относится снижение требований к быстродействию АЦП за счет снижения средней частоты спектра сигнала до более низкой промежуточной частоты.

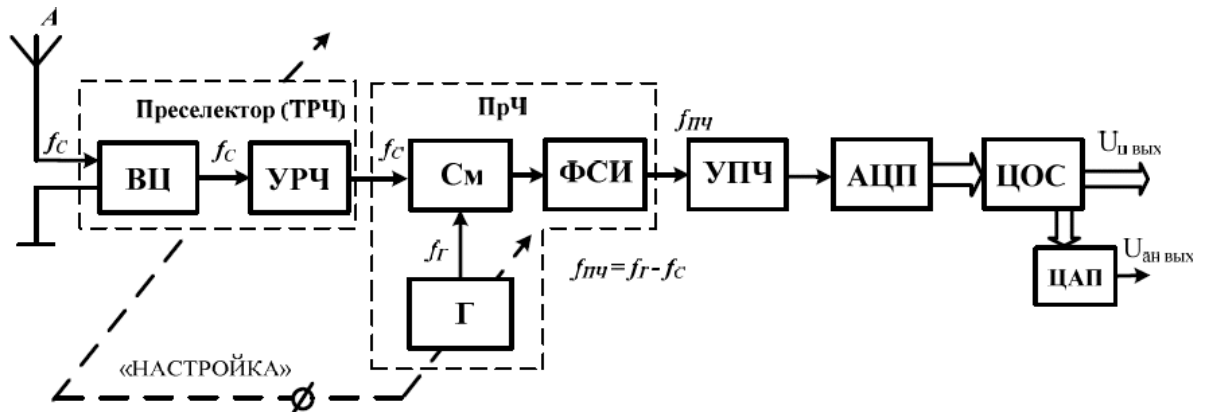


Рис. 2 б. Структурная схема цифрового супергетеродинного SDR-РПpУ

В SDR-приемниках прямого преобразования с синхронизированной частотой гетеродина выделяется информация о комплексной низкочастотной огибающей (baseband) принятого сигнала. Высокочастотный тракт такого SDR-приемника (рис. 2в) до блока АЦП представляет собой структуру приемника прямого преобразования с формированием

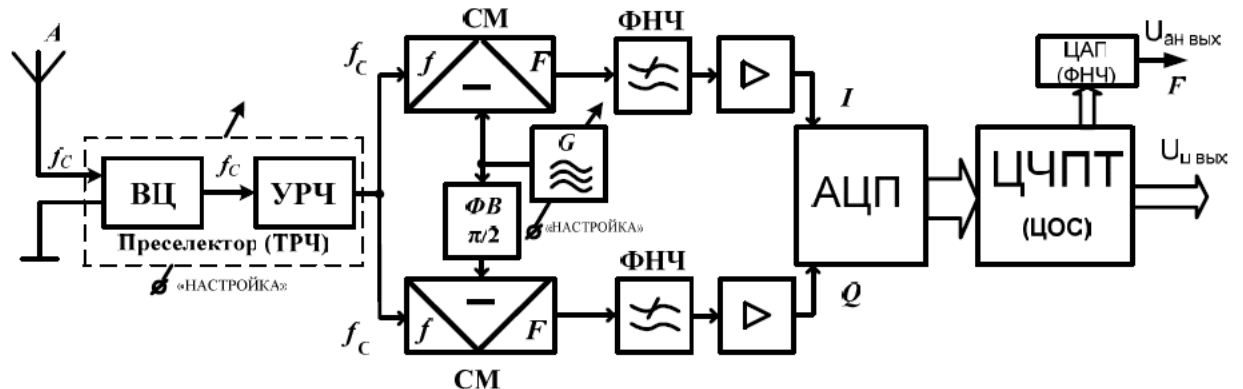


Рис.2в. Структурная схема SDR-приемника с квадратурной обработкой

квадратурных компонент. Их выделение осуществляется на основе двухканальной обработки принимаемого радиосигнала (см. тема «Обработка сигналов с цифровой модуляцией в тракте УПО-ДАС» [7]). Сформированные таким образом сигналы на выходе

обоих каналов называются синфазным и квадратурным, или  $I$  и  $Q$ . Эти сигналы затем одновременно оцифровываются АЦП.

В рамках настоящего курса аппаратная SDR-архитектура учебных прототипов приемо-передающих устройств по схеме рис.2в строится на универсальной платформе блока Universal Software Radio Peripheral (USRP-2920) фирмы National Instruments [5]. Для управления работой USRP используется среда программирования LabVIEW, предоставляющая удобный интерфейс конфигурирования SDR, а также работы с другими внешними устройствами.

При программной реализации в качестве ЦП используется микропроцессор (ЦМП), который в зависимости от объема вычислительной задачи и назначения прибора может быть устройством общего назначения или специализированным, разработанным для решения конкретной задачи. Преимуществом такой реализации ЦП является простота изменения алгоритма обработки сигнала, а также большая легкость аппаратной разработки, так как в данном случае используется либо готовый ЦМП, либо комплект ИС, являющийся набором микросхем большой степени интеграции. Однако здесь появляется необходимость в написании и отладке программы работы ЦМП, которая может составлять до 70% общей трудоемкости от разработки прибора. При программной реализации структурная схема приемного устройства видоизменяется. Наличие единой цифровой магистрали обмена М (для увеличения быстродействия число магистралей можно увеличить до двух-трех) позволяет существенно сократить число соединений между блоками, придать им регулярный характер. Магистральная организация позволяет легко наращивать аппаратуру при ее модернизации, производить диагностику при обработке или ремонте, замену блоков [1].

В состав ЦРПрУ могут быть введен ряд вспомогательных устройств: управления УУ, отображения УО, контроля УК и другие [1].

Программная реализация алгоритма обработки сигнала на универсальной ЭВМ часто требует больших затрат машинного времени, что может затруднить ее осуществление в реальном масштабе времени.

Из сказанного ясно, что между быстродействием интегральных микросхем (максимальной тактовой частотой) и быстродействием ЦП (скоростью выполнения заданной операции) нет однозначного соответствия. Она зависит от сложности операции, последовательной или параллельной организации вычислений, применяемых аппаратных средств. Для типичных радиотехнических задач, например, частотной фильтрации, если не принимаются специальные меры для ускорения вычислений, быстродействие

аппаратно реализованного цифрового процессора снижается на один-два порядка по сравнению с максимальной тактовой частотой ИС.

В настоящее время основными телекоммуникационными каналами являются цифровые каналы радиосвязи, состоящие из обычного аналогового канала, к которому в передатчике подключено устройство формирования и кодирования цифровых сигналов, а в приемнике - решающее устройство, предназначенное для декодирования переданных сигналов. Под воздействием канальных помех на выходе канала связи образуется непрерывное множество сигналов, преобразуемое решающим устройством в дискретное множество сигналов.

Среди большого разнообразия современной элементной базы РПрУ выделяются функциональные устройства, обладающие большими потенциальными возможностями [1-4]. В первую очередь здесь следует отметить изделия пьезоэлектроники, которые широко применяются в усилительном тракте, синтезаторе, а также в информационном тракте, особенно при обработке сигнала на высоких частотах и в широкой полосе частот. Соответствующие изделия - высокочастотные генераторы и фильтры, дисперсионные линии задержки и т. п., позволяют существенно повысить качественные характеристики РПрУ.

К достоинством пьезоэлектронных компонент относятся их конструктивная и технологическая совместимость с изделиями микроэлектроники.

#### ***4. Проектирование основных функциональных блоков РПрУ.***

В соответствии с изложенными выше основными принципами системотехники последовательность проектирования функциональных блоков РПрУ в основном аналогична описанной выше последовательности проектирования РПрУ, т.е. [1]:

1. Обоснование исходных данных для проектирования.
2. Составление перечня функций, выполняемых блоком.
3. Синтез структурной схемы методом функционального наращивания на основе опыта разработчика и литературных данных
4. Предварительный математический синтез отдельных узлов функционального блока, решающих новые задачи и не исследованных ранее.
5. Синтез компьютерной VSS-модели функционального блока приемника, проведение имитационного моделирования его VSS- модели.
6. Анализ синтезированной структурной схемы и ее оптимизация по выбранным критериям.

7. Разработка требований к функциональным узлам следующего иерархического уровня.

### **5. Усилительный тракт РПрУ.**

Число вариантов выполнения структурной схемы усилительного тракта обычно очень ограничено, поэтому его структурная схема синтезируется, как правило, методом функционального наращивания с последующим анализом и оптимизацией синтезированной схемы [1].

Исходными данными для проектирования усилительного тракта являются его внешние параметры, частично задаваемые ТЗ на РПрУ, частично определяемые в процессе внутреннего проектирования всего приемного устройства. Для удобства оптимизации системы исходные данные предлагается разбить на следующие группы [1]:

#### 1. Группа У (**условия**):

- параметры входного сигнала (несущая частота и диапазон ее изменения, параметры модуляции или полоса спектра входного сигнала);
- характеристики помех (тип, уровень, частота или диапазон частот, занимаемый помехой);
- эквивалент антенны или волновое сопротивление антенного фидера и КСВ выхода;
- шумовая температура антенны;
- сопротивление нагрузки тракта.

#### 2. Группа О (**ограничения**):

- вид амплитудной, амплитудно и фазо-частотной характеристик;
- параметры выходного сигнала (несущая частота и диапазон ее изменения, диапазон изменения уровня выходного сигнала, минимальное отношение сигнал-шум, стабильность коэффициента усиления тракта) и т. п.

#### 3. Группа К (**показатели качества**):

- чувствительность; динамический диапазон по входному сигналу;
- частотная избирательность;
- погрешность настройки частоты;
- характеристики искажений выходного сигнала;
- КСВ входа;
- габариты, масса, потребляемая мощность.

Часть показателей качества может переходить в разряд ограничений и наоборот.



В результате проектирования усилительного тракта должны быть определены его структурная схема, внутренние параметры и разработаны требования к типовым функциональным узлам.

Примерный перечень внутренних параметров РПрУ [1]:

- полоса пропускания,
- пороговая чувствительность и реальная чувствительность приемника,
- частоты гетеродинов, промежуточные частоты,
- общий коэффициент усиления,
- распределение усиления по тракту,
- распределение избирательности и глубина регулирования усиления.

### Основные характеристики и параметры РПрУ

Перечисленные выше показатели РПрУ определяются электрическими, конструктивно-эксплуатационными и производственно-экономическими характеристиками. К основным электрическим характеристикам радиоприёмников относятся чувствительность, избирательность, диапазон рабочих частот, виды принимаемых сигналов, амплитудная характеристика приемника, динамический диапазон приемника, допустимые искажения сигналов, помехоустойчивость, электромагнитная совместимость. Рассмотрим и сравним основные электрические характеристики и параметры цифрового и аналогового радиоприемников.

### *Чувствительность*

Под чувствительностью понимают способность приемника принимать слабые радиосигналы. Важнейшим критерием качества цифровых систем, как и аналоговых, является отношение сигнал/шум. В аналоговых системах чувствительность приемника определяется как минимальный уровень входного сигнала, при котором на выходе получается сигнал требуемого качества.

Для оценки *пороговой чувствительности* приемника можно воспользоваться выражением, приведенным в первой части настоящего методического пособия [7],

$$N_{\text{ш}}[\text{дБм}] = -174 \text{ дБм} + 10 \log(P_{\text{ш}}/1[\text{Гц}]) + F_{\text{ш}} \quad (1)$$

Здесь значение  $-174 \text{ дБм}$  ( $1 \text{ Гц}$ ) соответствует мощности теплового шума, действующего на омическом сопротивлении в полосе  $1 \text{ Гц}$  при средней температуре  $290 \text{ К}$ , т.е. это уровень собственного шума или абсолютный минимальный уровень шума при данной температуре;  $F_{\text{ш}}[\text{дБ}]$  - шум-фактор РПрУ, учитывающий как внешние, так и внутренние шумы приемника,

$$F_{\text{ш}} = 10 \log(K_{\text{ш}} + t_a - 1),$$

где  $t_A = T_e/T$  - относительная шумовая температура антенны.

Эквивалентная шумовая полоса  $\Pi_{ш.пч}$  фильтра УПЧ в (1) определяет измерение шумовых сигналов в полосе частот УПЧ и может быть рассчитана через ее передаточную функцию по напряжению  $H_U(f)$  как:

$$\Pi_{ш} = (1/H_U(f_0))^2 \int_0^{\infty} H_U^2(f) df$$

Величина  $t_A = T_e/T$  в (1) называется **относительной шумовой температурой** антенны. Она выражается через **эквивалентную шумовую температуру**  $T_e$  антенны и абсолютную температуру  $T$  в градусах Кельвина и определяет вклад внешних шумов в пороговую чувствительности приемника.

Из (1) следует одна важная производная пороговой чувствительности – **реальная чувствительность радиоприемника (чувствительность радиоприемника, ограниченная шумам)**  $P_{min}$ , которая определяется минимальным уровнем радиосигнала на его входе при заданном отношении (**коэффициент различимости**)  $h_0$  [дБ] уровней полезного сигнала и шума на выходе радиоприемника, т.е.,

$$P_{min}[\text{дБм}] = -174 \text{ дБм} + 10 \log(\Pi_{ш}/1[\text{Гц}]) + F_{ш} + h_0 \quad (2)$$

Для приемников дискретных сигналов требуемое качество определяется вероятностью ошибки при некотором заданном отношении сигнал/шум. Для цифровых систем эта величина имеет несколько иную интерпретацию – отношение энергии на бит к спектральной плотности шума.

$$P_c = f(E_b/N_0)$$

где  $E_b$  – энергия сигнала, приходящаяся на один бит передаваемой информации;  $N_0$  – спектральная плотность шумов. Величина отношения энергии на один символ, передаваемый по каналу связи, к спектральной плотности шумов в общем случае связана с отношением сигнал/шум в тракте передачи сигнала следующей формулой:

$$E_s/N_0 = SNR(W/R)$$

где  $W$  – ширина полосы канала, Гц;  $R$  – символьная скорость передачи информации по каналу связи, симв/с.

Соотношение между энергией на символ и энергией на один бит передаваемой полезной информации зависит от примененных схем модуляции и помехоустойчивого кодирования, т. е. от числа битов, приходящихся на один канальный символ, и избыточности выбранной схемы кодирования.

### **Шум квантования АЦП**

Рассматривая схемы рис.2 РПрУ с цифровой обработкой сигнала необходимо обращать внимание на специфику квантования сигнала в АЦП, в ходе которого значение

его отсчета округляется до ближайшего разрешенного уровня квантования (рис.3). Это округление приводит к появлению погрешности преобразования сигнала, или, иначе, шума квантования. Значение шума квантования (ШК) и отношения сигнал-шум квантования (ОСШК) зависят от характеристики преобразования квантователя и применяемого закона компандирования, обеспечивающего сжатие динамического диапазона уровней сигнала.

Основными параметрами АЦП, определяющими уровни ОСШК, являются число уровней квантования  $L$ , разрядность  $n_{\text{раз}}$  и шаг квантования  $q$ .

Указанные параметры связаны между собой соотношениями.

$$\text{Число уровней квантования} \quad L = 2^{n_{\text{раз}}},$$

$$\text{Шаг квантования в АЦП} \quad q = U_{\text{max}} / (2^{n_{\text{раз}}} - 1),$$

где  $U_{\text{max}}$ - максимальное входное напряжение АЦП.

Шум квантования характеризуется *средней мощностью шума квантования*  $U_{\text{шк}}^2$ . Для АЦП с равномерным шагом квантования эта мощность равна  $12/q^2$ , а ОСШК определится как [1-3],

$$\text{ОСШК[дБ]} = 6.02 \cdot n_{\text{раз}} + 1.76 \quad (3)$$

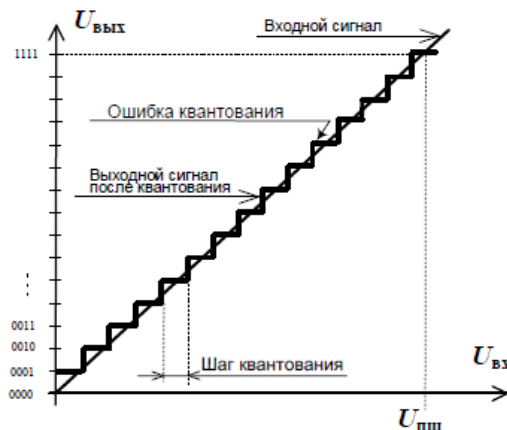


Рис.3. Амплитудная характеристика АЦП и ошибки квантования

Для качественной оценки влияния данного фактора на чувствительность РПрУ будем считать, что среднее единичным значение коэффициента передачи АЦП. Тогда его шум-фактор  $F_{\text{ш.АЦП}}[\text{дБ}]$  можно оценить как:

$$F_{\text{ш.АЦП}} = P_{\text{вх}}[\text{дБ}] + P_{\text{ш.АЦП}}[\text{дБ}] - P_{\text{ш.вх}}[\text{дБ}] - P_{\text{вых}}[\text{дБ}] \approx P_{\text{ш.АЦП}}[\text{дБ}] - P_{\text{ш.вх}}[\text{дБ}]$$

Отсюда видно, что при  $P_{\text{ш.АЦП}}[\text{дБ}] \gg P_{\text{ш.вх}}[\text{дБ}]$ , то в сравнении с другими его каскадами АЦП имеет более высокий коэффициент шума. Отсюда следует, что схему радиоприемника нельзя начинать строить с АЦП. В правильно спроектированном ЦРПрУ аналого-цифровому преобразователю должен предшествовать усилитель, который имеет

небольшой коэффициент шума и большой коэффициент усиления. Таким образом, для исключения влияния шума квантования на качество приёма необходимо, чтобы значение напряжения смеси сигнала и помех на входе АЦП, соответствующее пороговой чувствительности приемника, превышало шаг квантования  $U_{эфф} > q$ , или, иначе  $P_{ш.АЦП}[\text{дБ}] \ll P_{ш.вх}[\text{дБ}]$ .

*Пример*

Для реализации ЦРПРУ в диапазоне 1,5...30 МГц, с чувствительностью 1 мкВ и в динамическом диапазоне входных сигналов 120 дБ, потребуется 20-ти разрядный АЦП с размахом линейной амплитудной характеристики 0,2 В, с шагом квантования  $q = 0,2$  мкВ, числом шагов квантования  $L = 220$ .

В современных АЦП минимально допустимый шаг квантования приблизительно равен 0,2 мкВ. Следовательно, для удовлетворения указанного требования входной сигнал АЦП должен быть предварительно усилен.

***Быстродействие АЦП***

Рассмотрим ограничение на быстродействие АЦП, связанное с конечной частотой дискретизации  $f_d$ , и частотой входного сигнала  $f_c$ .

При обработке сигналов с частотами, не превышающими несколько десятков МГц, скорость АЦП позволяет использовать классический принцип дискретизации в соответствии с теоремой Котельникова, согласно которой частота выборок должна быть как минимум в два раза больше верхней частоты в спектре сигнала. При этом оцифровке подвергается диапазон частот от постоянной составляющей до половины частоты дискретизации.

Для выбора  $f_d$  в зависимости от несущей частоты сигнала  $f_c$  и ширины его спектра  $\Delta f_c$  могут быть использованы выражения,

$$f_d > 2\Delta f_c, \tag{3}$$

$$f_d = 4f_c / (2N_z - 1), \tag{4}$$

где  $N_z = 1, 2, 3, \dots$  – номер зоны Найквиста, в которую попадает несущая сигнала;  $\Delta f_c$  – ширина спектра входного сигнала.

Зоной Найквиста (Котельникова) называется полоса частот от 0 до  $f_d/2$ . Весь частотный спектр делится на бесконечное число зон Найквиста, равных по ширине  $f_d/2$ .

К расчету частоты дискретизации  $f_d$  следует подходить тщательно, так как правильный ее выбор позволяет улучшить соотношение цена/качество радиоприемного устройства.

Для высокочастотных сигналов используется **полосовая дискретизация**, которая позволяет обойти ограничение, накладываемое теоремой Котельникова для обработки узкополосных сигналов, у которых ширина спектра много меньше абсолютного значения центральной частоты. Этому условию соответствуют практически все радиосигналы. В этом случае теорема Котельникова имеет вид следующего утверждения: для сохранения информации о сигнале частота его дискретизации должна быть равной или большей, чем удвоенная ширина его полосы [2]. Математически данное условие описывается выражением:

$$(2f_c - \Delta f_c) / m \geq f_d \geq (2f_c + \Delta f_c) / (m + 1),$$

где  $m$  – произвольное целое число, выбираемое таким образом, чтобы выполнялось соотношение (3).

Если последнее соотношение не выполняется, то между антенной РПрУ и АЦП, кроме усилителя, необходимо установить преобразователь частоты, обеспечивающий приведение частоты радиосигнала к требуемому значению входной частоты АЦП.

#### **Каналы наложения спектров АЦП**

Наличие каналов наложения спектров в цифровом радиоприемнике, аналогично появлению побочных каналов приема в аналоговом радиоприемнике с преобразователем частоты. Каналы наложения спектров образуются по два возле каждой гармоники частоты дискретизации  $f_d$ :

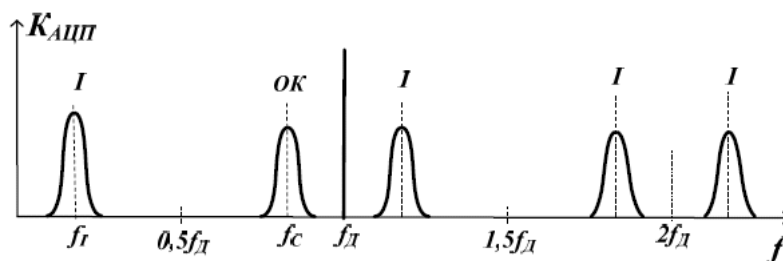


Рис.4. Каналы наложения спектров при дискретизации аналогового сигнала в ЦРПрУ  
ОК – основной канал, I – изображения (Image) интересующего сигнала;

$$\pm k f_d \pm f_c, \quad (5)$$

Комбинационные частоты в (5) являются зеркальными отражениями частоты сигнала относительно гармоник частоты дискретизации и для отличия от аналогового преобразования, называются **изображениями полезного сигнала** (в зарубежной литературе Image). Расположение каналов наложения спектров (Image - изображения полезного сигнала) при дискретизации аналогового сигнала в ЦРПрУ показано на рис. 4 [13]. АЧХ каналов наложения спектров на этом рисунке соответствует случаю, когда входной радиосигнал подается во вторую зону Найквиста (Котельникова).

*Для цифровых радиоприемников подавление каналов наложения спектров не менее актуально, чем для аналоговых подавление побочных каналов приема.* Фильтр, предназначенный для подавления изображений полезного сигнала (каналов наложения спектров) в цифровых РПрУ, называется *антиайлиасинговым*.

Антиайлиасинговый фильтр для подавления каналов наложения спектров необходимо включить в ЦРПрУ между антенной и АЦП. В схемах рис. 1.2 он находится в составе преселектора приемника.

### **Разрядность АЦП**

При проектировании РПрУ следует учитывать также, иллюстрируемое рисунком 5 [13] обстоятельство, что полоса пропускания тракта приемника между антенной и АЦП влияет на реализуемую разрядность АЦП. На этом рисунке частота дискретизации преобразователя, в соответствии с выражением (3), определяет полосу пропускания тракта, согласованную с шириной спектра радиосигнала  $\Delta f_c$ .

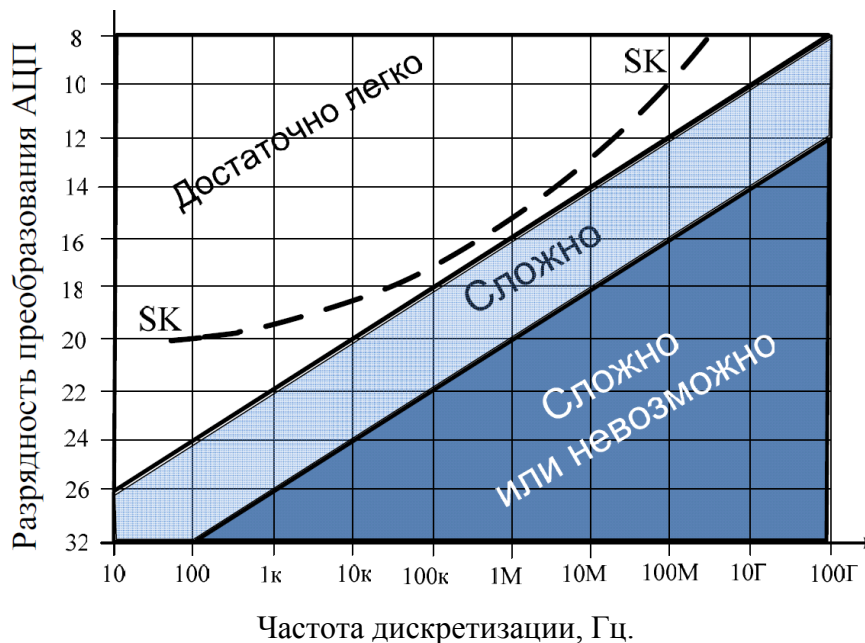


Рис.5. Трудность реализации требуемой разрядности АЦП в зависимости от нужной частоты дискретизации [13]

На представленном рисунке область “сложно” соответствует большинству высококачественных дискретных АЦП, предлагаемых известными производителями микросхем обработки смешанных сигналов. Область в левом верхнем углу графика “достаточно легко” относится к недорогим микросхемам АЦП или большим цифровым интегральным схемам со встроенными АЦП, например, микроконтроллерам. Область в правом нижнем углу нереализуема для большинства практических целей, за исключением уникальных изделий, в которых нет ограничений на стоимость. Разумеется, со временем “сложная” область на графике будет сдвигаться вправо и вниз, то есть

производительность АЦП будет повышаться. Эта тенденция аналогична ситуации с цифровыми микросхемами, здесь также работает закон Мура, который гласит, что прирост динамического диапазона интегральных схем для обработки смешанных сигналов составляет в среднем 2 дБ в год, а прирост разрядности - 1 бит в три года.

При разработке РПрУ общего назначения следует держаться подальше от “невозможной” области.

### *Динамический диапазон РПрУ*

**Общий коэффициент усиления** усилительного тракта определяется как:

$$K_p = P_{\text{вых}}/P_{\text{min}} \quad (6)$$

где  $P_{\text{вых}}$  - заданная мощность на выходе тракта.

Нелинейность амплитудной характеристики усилительного тракта вызывает нелинейные искажения сигнала, которые возникают на фоне одной или нескольких значительных по уровню внеполосных помех. Основными видами этих помех являются **перекрестная модуляция, блокирование, интермодуляция** [2,9].

**Перекрестная модуляция** проявляется в переносе модуляции помехи на полезный сигнал. Если колебание сигнала модулировано, перекрестная модуляция ухудшает отношение сигнал/помеха или делает прием полезного сообщения вообще невозможным.

**Блокирование** полезного сигнала возникает также вследствие уменьшения коэффициента усиления УТ, но уже под действием сильных мешающих сигналов с частотами, отличающимися от частот основного и побочного каналов приема.

**Интермодуляция** заключается в том, что при воздействии на какой-либо нелинейный элемент в УТ двух или более помех с частотами  $f_{n1}, f_{n2}, f_{n3} \dots$  на выходе этого элемента возникает сложный спектр интермодуляционных колебаний вида  $mf_{n1} \pm nf_{n2} \pm pf_{n3}$ , где  $m, n, p$ - целые числа. Если частоты одной или нескольких составляющих этого спектра совпадают с частотой настройки РПрУ или любого побочного канала приема, такие составляющие усиливаются в УТ наравне с полезным сигналом, накладываются на него, снижают отношение С/П и искажают принимаемое сообщение.

Перечисленные эффекты, как и все другие нелинейные явления, характеризуются соответствующими пороговыми уровнями входных сигналов. Так порог эффекта блокирования определяется **точкой компрессии** каскадов РПрУ, которая обозначает точку на амплитудной характеристике тракта, в которой коэффициент передачи уменьшается на 1 дБ за счет эффекта насыщения. Для усилителей мощности обычно задается уровень выходного сигнала, при котором имеет место 1 дБ-компрессия.

Порог эффекта интермодуляции  $i$ -го порядка определяется **точкой**  $IP_i$  **пересечения  $i$ -го порядка** по входу, или выходу каскада (тракта).

Указанные пороговые характеристики определяют важнейший показатель РПрУ – **динамический диапазон (ДД)** усилительного тракта по заданной внеполосной помехе, определяемый как отношение максимального допустимого значения внеполосного сигнала помехи на входе (перекрестная модуляция, блокирование, интермодуляция и др.), при котором искажения основного сигнала за счет внеполосной помехи не превышают нормы. Динамический диапазон характеризует способность приемника одновременно обрабатывать сигналы с разным уровнем. Границы динамического диапазона зависят от характера производящихся измерений. Нижняя граница определяется собственным шумом приемника. Верхняя граница устанавливается точкой 1 дБ-компрессии или уровнем других продуктов искажений, возникающих в приемнике в случае его перегрузки.

На практике наибольшее влияние на результаты измерений оказывают интермодуляционные продукты третьего порядка, поскольку они возникают в непосредственной окрестности входных сигналов. Эти искажения определяют **динамический диапазон свободный от интермодуляционных искажений (Spurious Free Dynamic Range-SFDR)** Максимальный уровень  $SFDR$  ДД<sub>max</sub> РПрУ в дБ для таких продуктов определяется так [2,9]:

$$ДД_{max} = \frac{2}{3}(IP_{3\text{вх}} - N_{ш}) = \frac{2}{3}(IP_{3\text{вх}} + 174[\text{дБм}] - 10\log(\Pi_{ш}) - F_{ш}) \quad (7)$$

$IP_{3\text{вх}}$  - точка пересечения по входу 3-го порядка  $N_{ш}$  – пороговый уровень шумов.

### **Динамический диапазон АЦП**

В цифровых и SDR- приемниках число уровней квантования  $L$ , разрядность  $n_{\text{разр}}$  и шаг квантования  $q$  АЦП связано с динамическим диапазоном входных сигналов  $ДД_{max}$  должны удовлетворять выражению:

$$L = 2^{n_{\text{раз}}} \geq ДД_{max}. \quad (8)$$

### **Избирательность**

Под избирательностью понимают способность РПрУ выделять полезный сигнал и ослаблять действие мешающих сигналов (помех) с помощью различных способов реализации избирательности (частотной, временной, пространственной, поляризационной) [1-13].



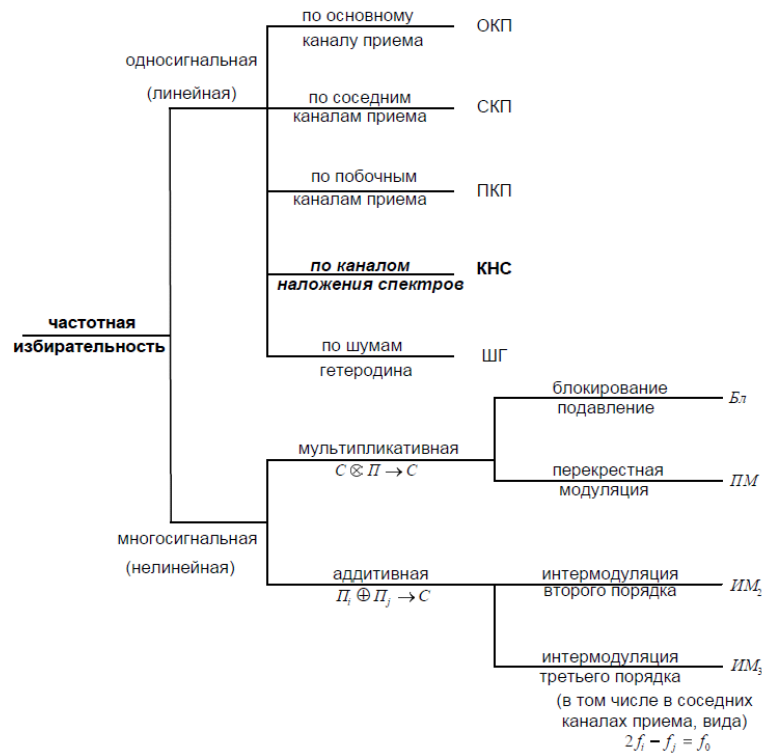


Рис.3. Основные виды частотной избирательности РПрУ

Частотная избирательность РПрУ основана на различии частоты сигнала, на которую настроен радиоприемник, и частот помех. Различают односигнальную и многосигнальную избирательность. Частотная (далее просто) избирательность ЦРПрУ, есть мера его пригодности принимать желательный сигнал, на который он настроен, и ослаблять другие нежелательные сигналы. Целесообразно с учетом технических и экономических факторов для конкретных классов приемников достигать максимальной избирательности. Нежелательные проявления мешающих сигналов многообразны и определяют следующие основные виды избирательности ЦРПрУ (рис. 3) [13].

Оценки качества ЦРПрУ по любому из видов частотной односигнальной избирательности необходимо проводить для сквозного тракта приема в линейном режиме, когда в процедуре приема задействованы все виды ЦОС, заложенные в структуру тракта приема ЦРПрУ.

**Односигнальная (линейная) частотная избирательность** усилительного тракта определяется отношением уровня сигнала на заданной частоте к его уровню на частоте расстройки при неизменном уровне сигнала на выходе УТ. Обычно односигнальная избирательность оценивается для *внеполосного сигнала*, находящегося в соседнем канале за пределами полосы пропускания тракта. Под **соседним каналом** подразумевается полоса частот, равная полосе пропускания основного канала приема и непосредственно примыкающая к полосе пропускания основного канала.

Односигнальная частотная избирательность зависит от частотной отстройки помехи относительно основного канала и определяется наиболее узкополосным частотным фильтром тракта.

### ***Многосигнальная (нелинейная) избирательность РПрУ***

Нелинейность амплитудной характеристики и недостаточная избирательность входных цепей приводят также к появлению искажений полезного сигнала за счет влияния сигналов радиопомехи. Эти искажения характеризуют ***многосигнальную избирательность*** УТ. Наибольшую опасность представляют отмеченные выше эффекты перекрестной модуляции, блокирования и интермодуляции.

Помимо рассмотренных нелинейных искажений в усилительном тракте также существуют искажения другого характера:

1. Частотные искажения, вызываемые неравномерностью амплитудно-частотной характеристики в полосе пропускания основного канала.
2. Фазовые искажения, вызываемые нелинейностью фазо-частотной характеристики в полосе пропускания.
3. Искажения, вызываемые не идеальностью импульсной характеристики тракта.

В усилительном тракте супергетеродинного радиоприемника вследствие не идеальности преобразователей частоты появляются специфические ***неосновные каналы приема*** - побочные, создающие дополнительные помехи приему полезного сигнала. Данные каналы характеризуются их общим числом, частотой и частотной избирательностью по каждому побочному каналу, определяемой как ослабление сигнала, принятого по побочному каналу, по отношению к сигналу, принятому по основному каналу. В общем случае частота побочного канала определяется как:

$$\pm m f_{\text{пк}} \pm l f_o = f_{\text{пч}} \quad (9)$$

где  $f_{\text{пк}}$ ,  $f_o$ ,  $f_{\text{пч}}$  - частоты побочного канала, гетеродина и промежуточной частоты соответственно,  $m$ ,  $l$  - целые положительные числа.

Если побочный канал не совпадает с основным, то сигнал внеполосной помехи должен ослабляться входными цепями приемника.

### ***Различия аналоговых и цифровых РПрУ по интермодуляции***

Важным отличием цифровых РПрУ от аналоговых является их характеристики многосигнальной избирательности по интермодуляции, определяющие динамический диапазон (ДД) и помехоустойчивость радиоприемника.

Если на входе аналогового радиоприемника с нелинейной амплитудной характеристикой присутствуют сигналы двух частот, нелинейный интермодуляционный

продукт 3-го порядка которых попадает в полосу полезного сигнала, то при увеличении амплитуды одного из этих сигналов на 1 дБ нелинейный продукт возрастает в кубической пропорции, т.е. на 3 дБ. При больших помехах он может превышать остальные шумы,

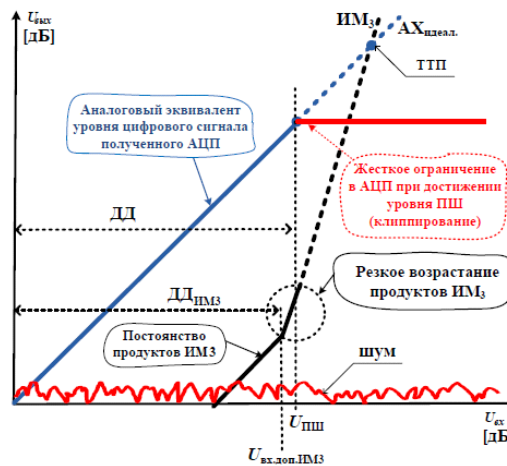


Рис.4. Пример изменения ДД АЦП при воздействии ИМИ-3

вызывая тем самым снижение динамического диапазона РПрУ (см. Тема «Основные параметры аналоговых РПрУ» УМ-пособия [7]). Для аналоговых приемников параметр интермодуляции  $I_3$  является одним из важнейших. Чем больше в радиоприемнике допустимый уровень интермодуляционной помехи третьего порядка, тем правее пролегает прямая роста интермодуляционных искажений и тем больше динамический диапазон РПрУ по интермодуляции третьего порядка (ИМИ-3).

Иная картина наблюдается в цифровых РПрУ. Для АЦП параметр интермодуляции ИМ3 теряет свою актуальность, поскольку интермодуляционные продукты не являются функцией амплитуды сигнала. При достижении сигналом уровня полной шкалы  $U_{ПШ}$  АЦП (рис. 4) не происходит постепенной компрессии, как в аналоговом РПрУ. В АЦП цифрового РПрУ, а имеет место лишь жесткое ограничение (клиппирование) сигнала, приводящее к резкому росту продуктов искажения. При уровне сигнала ниже полной шкалы интермодуляционные продукты остаются практически постоянными. Это означает, что при увеличении сигнала на 1 дБ они также возрастают не на 3, как в тракте аналогового РПрУ, а только на 1 дБ., т.е. соответствующая точка пересечения стремится к бесконечности. **В этом и состоит существенное отличие цифровых РПрУ от аналоговых.**

Увеличение интермодуляции может иметь место только при приближении к уровню полной шкалы АЦП. В качественных АЦП клиппирование сигнала может отсутствовать в пределах всего динамического диапазона. Причиной того, что современные АЦП не подвержены влиянию интермодуляции, является то, что

нелинейность их амплитудной характеристики (АХ) на рис.3 существенно отличается от вида нелинейности АХ аналоговых каскадов, которые достаточно точно аппроксимируются сплайн- функциями 3-го, или более высокого порядка. В нелинейном среде типа рис.3 в каждый момент времени действует строго фиксированное напряжение, равное единице младшего разряда, благодаря чему ключи работают в линейном режиме [13].

Таким образом, в приемниках с АЦП, расположенным близко к антенному входу, интермодуляция практически отсутствует. Поэтому с увеличением сигнала имеет место рост динамического диапазона, в то время как в аналоговых РПрУ из-за интермодуляции динамический диапазон снижается.

Следует помнить, что отмеченный выигрыш по ИМИ-3 цифровых РПрУ перед аналоговыми возможен, если АЦП расположить непосредственно на входе радиоприемника, что при современной элементной база пока невозможно. По этой причине в схемах ЦРПрУ на входе, перед АЦП (рис.2), требуется усилитель радиочастоты. Нелинейность АХ которого при больших уровнях сигналов и помех и приводит к образованию интермодуляции. Поэтому в цифровых радиоприемных устройствах многосигнальная избирательность, а в большей степени, интермодуляция будет воздействовать на качество обработки сигналов, как и в аналоговых радиоприемниках.

Остальные электрические характеристики цифровых радиоприёмников диапазон рабочих частот, виды принимаемых сигналов, амплитудная характеристика приемника, динамический диапазон приемника, допустимые искажения сигналов, помехоустойчивость, электромагнитная совместимость существенно не отличаются от характеристик и параметров аналогового радиоприемника.

### **Выбор структурной схемы РПрУ**

В настоящее время чаще всего применяется супергетеродинная (СГ) схема усилительного тракта аналогового РПрУ, позволяющая осуществлять основное усиление и фильтрацию на низкой промежуточной частоте. Для реализации переменной настройки в супергетеродине достаточно изменять только частоту гетеродина при широкополосном УРЧ или частоты гетеродина и настройки УРЧ. Однако, например, в случаях фиксированной настройки РПрУ может применяться и приемник прямого усиления.

Структурные схемы усилительных трактов супергетеродинных приемников различаются числом и направлением преобразований радиочастоты, наличием или

отсутствием УРЧ. При выборе структурной схемы СГ-РПрУ следует руководствоваться следующими соображениями.

В случае переноса спектра сигнала ниже входной частоты (*разностное преобразование*) (рис.1,а) можно ограничиться одним преобразованием частоты. Это упрощает схему тракта. Легко осуществить хорошую избирательность по соседнему каналу, используя традиционные средства селекции в тракте промежуточной частоты.

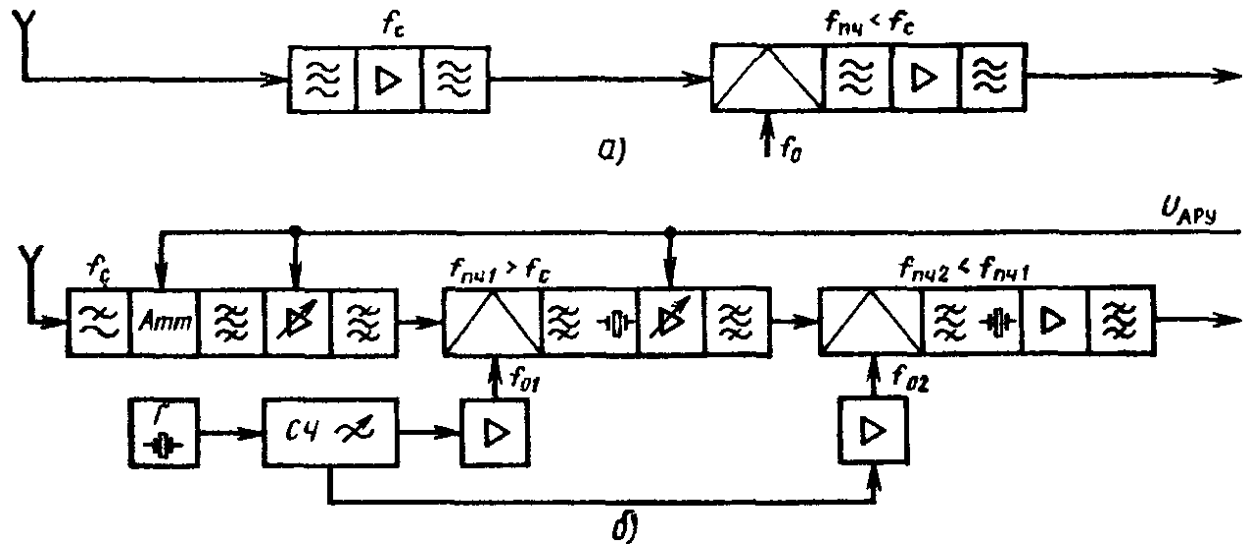


Рис.1. Структурные схемы усилительного тракта СГ-РПрУ с одним (а) и двумя (б) преобразованиями частоты

В данной схеме из-за малой промежуточной частоты частота зеркального канала оказывается близко расположенной к частоте входного сигнала, ее хорошее подавление реализовать в такой структуре трудно. Поэтому в соответствующих приемниках СВЧ для подавления частоты зеркального канала применяется несколько преобразований вниз частоты входного сигнала.

В случае переноса спектра сигнала выше входной частоты и разностном преобразовании существенно улучшается подавление частоты зеркального канала. Однако часто в соответствии с исходными данными для проектирования усилительного тракта требуется низкая частота выходного сигнала. Высокая промежуточная частота может усложнить реализацию необходимого коэффициента усиления. Поэтому в такой структуре обычно имеется также одно или несколько преобразований частоты вниз. На входе каждого нового преобразователя частоты должен быть установлен фильтр, обеспечивающий подавление образующихся в преобразователях частот зеркальных каналов (рис. 1,б).

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

При суммарном преобразовании также улучшается подавление частоты зеркального канала, однако возрастает число других побочных каналов приема, а перестройка гетеродина и фильтра УРЧ производится в разные стороны.

Усилитель радиочастоты (УРЧ) не применяется, когда к чувствительности усилительного тракта и избирательности по зеркальному и другим побочным каналам приема предъявляются невысокие требования, а также когда реализовать УРЧ из-за высокой частоты радиосигнала технически сложно.

### ***Расчет полосы пропускания и коэффициента прямоугольности АЧХ тракта.***

Необходимая полоса пропускания усилительного тракта  $P_{ут}$  определяется следующими ограничениями. Значение полосы  $P_{ут}$  снизу должно удовлетворить соотношению:

$$P_{ут} \geq P_{инф} + 2\Delta f_{рл}, \quad (1)$$

где  $\Delta f_{рл}$  - суммарная погрешность установки частоты в радиолинии, установки частоты сигнала в передатчике, изменение частоты сигнала за счет эффекта Доплера и др.;  $P_{инф}$  - ширина спектра сигнала;

Сверху полоса пропускания  $P_{ут}$  ограничивается требованием ослабления в  $A_n$  раз гармонической помехи, имеющей расстройку по частоте относительно частоты основного канала  $\Delta f_n$ :

$$P_{ут} \leq 2\Delta f_{ск} / [K_{пут}(A_{ск}) + 1], \quad (2)$$

где  $K_{пут}$  - коэффициент прямоугольности усилительного тракта (его основного фильтра) по уровню 0,707 и уровню, соответствующему ослаблению в  $A_{ск}$  раз. Из неравенств (1) и (2) можно выбрать необходимые значения  $P_{ут}$  и  $K_{пут}$ .

Оптимальное значение эффективной избирательности СГ-РПРУ реализуется в том случае, когда ослабление сигнала соседнего канала  $A_{ск}$  выбирается равным динамическому диапазону усилительного тракта по соседнему каналу.

### ***Выбор промежуточной частоты.***

Промежуточная частота  $f_{пч}$  выбирается из следующих условий [1]:

- Из условия подавления зеркального канала,

$$f_{пч} \geq 0.25P_{рч}K_{прч}(A_з), \quad (3)$$

где  $P_{рч}$  - полоса пропускания УРЧ;  $K_{прч}(A_з)$  - коэффициент прямоугольности фильтра УРЧ по уровню  $A_з$ ;  $A_з$  - требуемое ослабление зеркального канала;

- Из условия ослабления канала приема на промежуточной частоте,

$$|f_{пч}/f_c - 1| \geq 0.5P_{рч}K_{прч}(A_{пч})/f_c, \quad (4)$$

где  $A_{\text{пч}}$ - требуемое ослабление промежуточной частоты в УРЧ;

В случае противоречия между (3) и (4) используется дополнительное преобразование частоты вниз;

- Из условия подавления (или уменьшения числа) побочных каналов (5.4), а также исключения попадания гармоник частоты гетеродина в тракт промежуточной частоты.

При нескольких преобразованиях частоты опасно попадание комбинационной частоты нескольких гетеродинных сигналов на вход приемника или в тракт промежуточных частот. Обычно достаточно проверять частоты гетеродинов попарно, т. е. искать комбинационные частоты вида:

$$f_{\text{пчи}} = \pm l f_{oi} \pm f_{os}, \quad s \neq i, \quad (5)$$

где  $f_{\text{пчи}}$  и  $f_{oi}$  -промежуточная частота и частота гетеродина при  $i$ -м преобразовании,  $f_{os}$ - частота другого гетеродина, попадающего в тракт  $i$ -й промежуточной частоты за счет наводки.

Степень подавления побочного канала (5.4) зависит от номера комбинационной гармоники: чем больше номер, тем меньше гармоника; от степени фильтрации частоты побочного канала в УРЧ и от индивидуальных свойств преобразователя частоты.

Наиболее опасны побочные каналы, частота которых совпадает с частотой сигнала (**частота фокусов**) и которые не ослабляются УРЧ.

Общей рекомендацией для уменьшения числа побочных каналов является выбор промежуточной частоты из условия:

$$f_{\text{пч}} \geq (4 \div 5) f_{c \max}, \quad \text{или} \quad f_{\text{пч}} \leq (0.1 \div 0.2) f_{c \min}, \quad (6)$$

где  $f_{c \max}$ ,  $f_{c \min}$ - максимальная и минимальная частоты диапазона перестройки.

Прямой расчет частот побочных каналов и комбинационных частот гетеродинов по приведенным формулам трудоемок. Их рекомендуется проводить в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS).

На этой же программной платформе, следуя рекомендациям [8], следует оценивать степень подавления побочных каналов приема и амплитуды гармоник частоты гетеродина

### ***Распределение усиления по тракту РПрУ.***

Оценка коэффициента усиления всего тракта РПрУ дается (5.2). Реально он должен в  $5 \div 10$  раз превышать расчетное значение, чтобы перекрыть возможные температурные и

временные уходы. Избыток коэффициента усиления компенсируется с помощью системы АРУ.

Коэффициент усиления УРЧ выбирается из противоречивых требований минимального влияния шумов смесителя на результирующий коэффициент шума (коэффициент усиления надо увеличивать) и уменьшения уровня сигналов помехи, попадающих в смеситель и вызывающих интермодуляционные искажения (коэффициент усиления надо уменьшать). Обычно выбирают оптимальный коэффициент усиления УРЧ порядка 20 дБ. Все оставшееся усиление обеспечивает УПЧ.

В УПЧ с распределенной избирательностью уровень внеполосных сигналов больше в первых каскадах. Поэтому усиление в каскадах УПЧ целесообразно выбирать так, чтобы по мере прохождения по УПЧ внеполосного сигнала помехи его амплитуда за счет одновременного усиления в усилительных каскадах и ослабления в фильтрах не нарастала. Это обычно приводит к меньшему коэффициенту усиления в первых каскадах УПЧ. В УПЧ с сосредоточенной избирательностью основной фильтр располагается как можно ближе к смесителю, коэффициент усиления до фильтра минимален, после фильтра распределяется по каскадам равномерно. При двух и более преобразованиях частоты, если основной фильтр расположен на входе первого УПЧ, распределение усиления по тракту произвольно. Если же основной фильтр установлен в последнем УПУ, коэффициент усиления промежуточных каскадов УПЧ выбирается минимальным, чтобы не допустить значительного усиления внеполосной помехи.

Чувствительность усилительного тракта (5.1) окончательно уточняется после полного расчета УРЧ. Динамический диапазон определяется по (5.3) после выбора всех элементов усилительного тракта и расчета характеристик искажений. Окончательное значение указанных параметров устанавливается в результате моделирования проекта РПрУ в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS).

### *Автоматическая регулировка усиления*

Если из-за перегрузки выходных каскадов усилительного тракта его динамический диапазон оказывается меньше заданного, то в состав проекта РПрУ вводится система автоматической регулировки усиления (АРУ). Наиболее простой и распространенной является схема обратной АРУ по сигналу с задержкой (рис. 2). В данной схеме напряжение  $u_{\text{вых}}$  с выхода усилительного тракта подается на амплитудный детектор АРУ.

Установленный после детектора ФНЧ выделяет только медленные изменения амплитуды сигнала. Выпрямленный и усиленный таким образом сигнал поступает на



регулируемые каскады УТ и снижает их усиление, если амплитуда выпрямленного напряжения  $u_{\text{вых}}$  превысит напряжение задержки  $U_{\text{зд}}$  в пороговом устройстве ПУ.

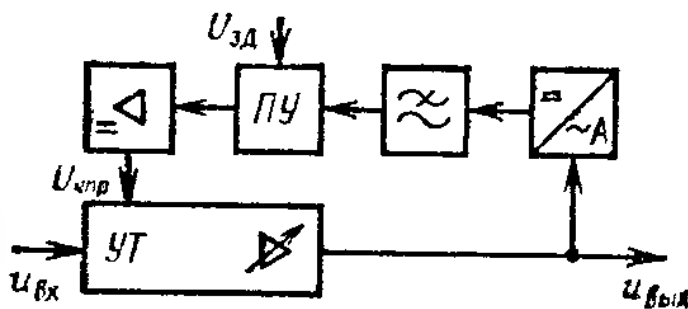


Рис. 2. Структурная схема АРУ с задержкой

В результате работы данной схемы авторегулирования, при изменении среднего уровня сигнала, обусловленного изменением условий прохождения радиоволн, изменением коэффициента усиления усилительного тракта со временем и т. п., среднее значение выходного сигнала оказывается приблизительно постоянным и равным  $U_{\text{зд}}$  с точностью до коэффициента передачи амплитудного детектора. Таким образом, динамический диапазон усилительного тракта с системой АРУ определяется только быстрыми изменениями амплитуды входного сигнала, вызванными, например, полезной амплитудной модуляцией.

При проектировании системы АРУ отношение максимального коэффициента усиления тракта к минимальному (*коэффициент регулирования*) выбирается в 10÷100 раз больше относительного диапазона медленных изменений сигнала. Это дает возможность компенсации возможных температурных и временных изменений коэффициента усиления тракта.

При проектировании системы АРУ следует учитывать также ее связь с некоторыми другими системными показателями приемника [12]. Так устранение перегрузки в тракте РПрУ системой АРУ достигается за счет уменьшения коэффициента усиления тракта. Из формулы Фрисса, описывающий шумовой бюджет многокаскадного тракта, следует, что пороговая чувствительность приемника будет зависеть от того, в каком из каскадов тракта происходит это уменьшение. В данной связи, Идеальной системой АРУ следует считать такую, в которой регулирование начинается с выходного каскада. Затем, по мере возникновения перегрузки, регулируется усиление предпоследнего каскада и так далее. При очень сильной перегрузке в данной схеме начинают регулироваться второй и, наконец, первый каскады. Это позволяет получить высокое отношение сигнал/шум прежде чем общий коэффициент шума тракта начнет существенно увеличиваться.

На рис. 3 а. показаны кривые изменения отношения сигнал/шум в правильно спроектированной системе АРУ (кривая 1), когда уменьшение  $K_p$ , наступает, только когда существует опасность перегрузки  $i$ -го каскада, и при неправильно спроектированной системе (кривая 2), когда все каскады регулируются одновременно. Из рисунка видно, что только правильное построение системы АРУ позволяет получить высокое отношение сигнал/шум на выходе приемника при сильных сигналах.

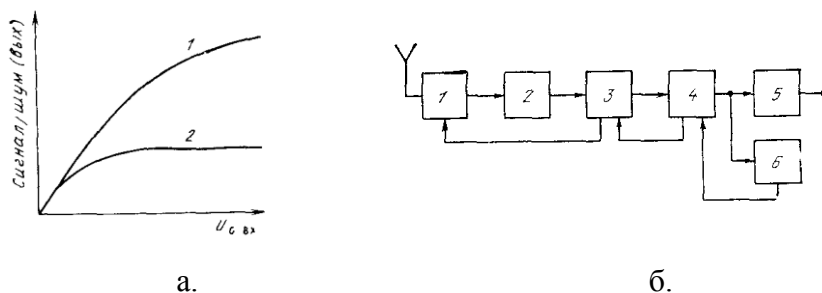


Рис.3.

а). Зависимости отношения сигнал/шум в РПрУ с «эстафетной АРУ» (кривая 1) и в приемнике, все каскады которого регулируются одновременно (кривая 2) .

б). Структурная схема приемника с «эстафетной АРУ».

1- высокочастотный тракт; 2 - смеситель. 3 -первый каскад УПЧ:

Из рассмотрения следует, что для получения минимальных выходных шумов нужно обеспечить достаточный динамический диапазон входных каскадов и большой коэффициент усиления по мощности первого каскада.

Требованиям получения высокого отношения сигнал/шум хорошо отвечает так называемая «эстафетная АРУ», принцип построения которой показан на рис. 3.б. В данной схеме усиление регулируется, начиная с последнего каскада УПЧ, где значение сигнала максимально и поэтому наиболее вероятна перегрузка. При дальнейшем увеличении сигнала начинает уменьшаться коэффициент усиления предпоследнего каскада и т.д. Это позволяет ввести регулирование первых каскадов только при самых больших сигналах, когда достигнуто большое отношение сигнал/шум на выходе.

Следует отметить, что системы АРУ, как правило, используются только в приемниках, предназначенных для приема амплитудно-модулированного (манпулированного) сигнала. Во всех тех случаях, когда амплитуда принимаемого сигнала полезной информации не несет, вместо обычных систем АРУ используют амплитудный полосовой ограничитель, который является фактически мгновенно действующей системой АРУ.

**Автоматическая регулировка чувствительности РПрУ**

В условиях напряженной электромагнитной обстановки помехи на входе радиоприемного устройства составляют единицы и даже десятки вольт. При таких уровнях неизбежно нелинейное поражение высокочувствительного тракта РПрУ. Нелинейное поражение РПрУ проявляется в виде нелинейных явлений: блокирования, перекрестной модуляции, интермодуляции, которые ухудшают качество сигнала на выходе РПрУ или делают его прием вообще невозможным. Для снижения вероятности поражения требуется уменьшение чувствительности РПрУ, т.е. введения дополнительного затухания на входе радиоприемника.

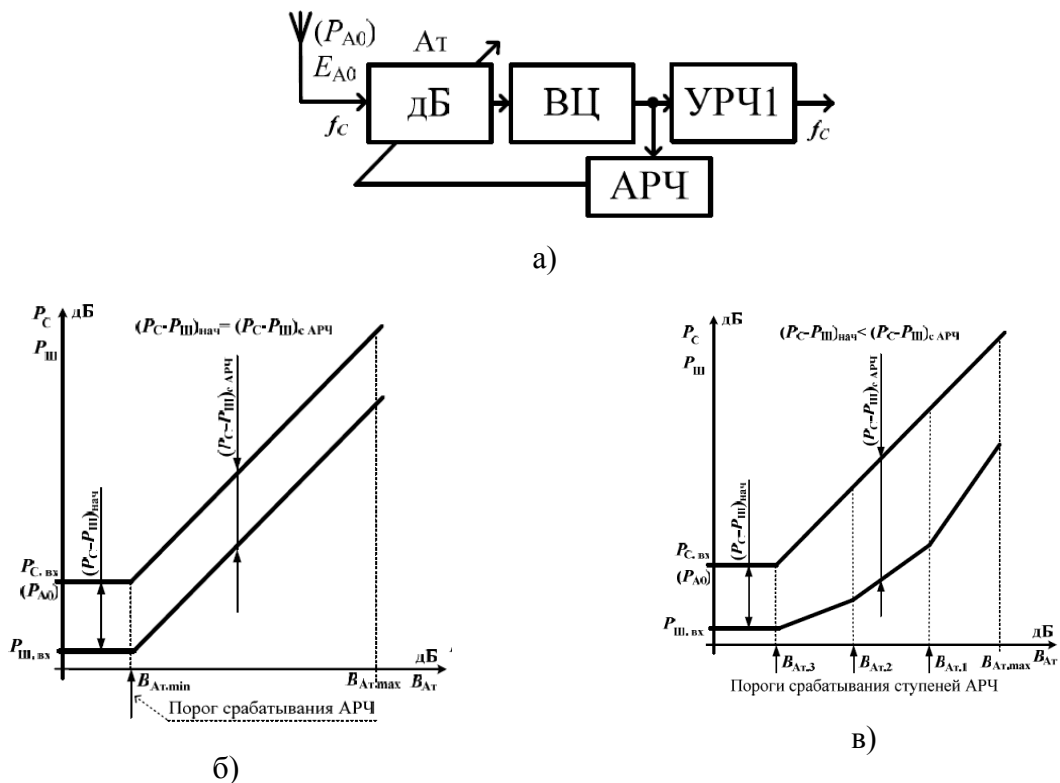


Рис.4. Автоматическая регулировка чувствительности РПрУ

а. Структурная схема. б,в. Характеристики защиты

Система автоматической регулировки чувствительности (АРЧ) может содержать один или несколько аттенюаторов (дБ) (рис. 4а), установленных на входах первых каскадов УРЧ. Управляющее аттенюаторами воздействие вырабатывается на основе измерения групповой мощности сигнала и помех, попадающих в полосу пропускания радиоприемного устройства.

Во время работы АРЧ изменяется как уровень помех и сигнала на входе на входе каскадов УРЧ где используются регулируемые аттенюаторы. Изменение уровня помех и

сигнала на входе ТРЧ приведет к изменению коэффициента и мощности шума радиоприемного устройства.

При регулировке с одним аттенюатором на входе характеристика защиты имеют вид, показанный на рис.4б [13]. Введение адаптации уровня сигнала снижает чувствительность радиоприемного устройства, сохраняет динамический диапазон тракта радиочастоты и снижает вероятность нелинейного поражения, при котором прием радиосигнала был бы вообще невозможен.

При регулировке несколькими распределенными в УТ аттенюаторами затухание вводится постепенно, в соответствии с логикой описанной выше эстафетной АРУ.

Результирующие амплитудные характеристики защиты тракта с одним аттенюатором и эстафетной АРЧ показаны на рис. 4-б,в. Из рисунка видно, что в результате регулировки, при использовании эстафетной АРЧ, уровень блокирования РПрУ изменяется аналогично АРЧ с одиночным аттенюатором, однако коэффициент шума здесь увеличивается, гораздо медленнее, поэтому соотношение сигнал шум в тракте больше чем для АРЧ с одним аттенюатором.

В случае отсутствия воздействий нелинейных явлений на РПрУ требуется автоматическое отключение АРЧ, т.к. наличие в тракте аттенюаторов приведет к ухудшению чувствительности.

### **Выбор типовых узлов и интегральных микросхем РПрУ**

#### ***Выбор средств частотной фильтрации.***

Параметры средств частотной фильтрации, используемых в приемных устройствах 3—4-го поколений, по отдельно взятым показателям существенно превосходят параметры традиционных LC- фильтров. И в то же время задача создания фильтра, совместимого с микроэлектронной технологией и полностью заменяющего LC-фильтры, на сегодняшний день еще не решена.

Особенно это заметно на примере УРЧ. Фильтры, применяемые в УРЧ, выполняют следующие функции

- частотную фильтрацию,
- трансформацию полных сопротивлений для согласования входа приемника с выходом антенны и для минимизации коэффициента шума,
- обеспечение перестройки по частоте в диапазонных приемных устройствах.

Фильтр, стоящий на входе УРЧ, должен обладать минимальными потерями. Все эти задачи одновременно решаются только с помощью пассивных индуктивных фильтров. Поэтому в приемных устройствах на ИС в качестве средств частотной фильтрации УРЧ

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

обычно используются: до частот порядка 100 МГц. Одно- и двухконтурные LC-фильтры на микрокатушках индуктивности используются на частотах от 100 до 1 2 ГГц. На частотах от 200 ÷ 500 МГц используются LC-фильтры на спиральных печатных катушках. На более высоких частотах используются фильтры на микрополосковых резонаторах.

Из-за низкой добротности спиральных печатных катушек и микрополосковых фильтров и большого коэффициента включения во входной фильтр первого транзистора УРЧ избирательность входных цепей микроэлектронных РПрУ оказывается низкой. Так, в данном диапазоне нагруженная добротность одноконтурного фильтра не превышает уровня 5 ÷ 10.

При повышенном требовании к избирательности входного фильтра можно уменьшить коэффициент включения транзистора и антенны в контур. При этом, однако, коэффициент шума УРЧ увеличивается за счет роста потерь входного сигнала в фильтре.

Для увеличения избирательности без потери чувствительности на входе УТ применяются узкополосные фильтры на диэлектрических или ферритовых объемных резонаторах. Иногда устанавливаются на входе объемные коаксиальные или спиральные резонаторы [1,2].

При достаточном коэффициенте усиления транзисторов или ИС в УРЧ потери во втором и следующих фильтрах УРЧ слабо влияют на результирующий коэффициент шума, поэтому для повышения избирательности по зеркальному каналу эти фильтры могут выполняться в виде сложных многоконтурных цепей или фильтров сосредоточенной селекции с большей, чем во входной цепи, нагруженной добротностью. При этом, однако, следуют обеспечивать требуемую перестройку фильтра в заданных диапазонных РПрУ. Перспективным здесь является применение в качестве второго фильтра УРЧ фильтров на ПАВ из-за их потенциально высокой (до 2 ГГц) рабочей частоты

Фильтры в приборах 3—4-го поколений перестраиваются плавно с помощью варикапов.

Фильтры УПЧ в усилительном тракте РПрУ реализуют основную линейную избирательность по соседнему каналу, поэтому к ним предъявляются повышенные требования. Практическая реализация избирательности в УПЧ осуществляется двумя методами: методами *распределенной и сосредоточенной избирательностей*.

В первом из них суммарная АЧХ РПрУ формируется одно- и двухконтурными LC-фильтрами либо одно- и двух-звенными пьезоэлектрическими фильтрами, установленными в каждом каскаде УПЧ.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Во втором случае суммарная характеристика образуется сразу одним сложным фильтром сосредоточенной селекции (ФСС), расположенным как можно ближе к преобразователю частоты В качестве ФСС используются ПАВ-фильтры, сложные монолитные пьезоэлектрические фильтры, многосвязные пьезокерамические фильтры и т. п. В данном случае реализация УПЧ может осуществляться не избирательными резистивными усилителями. Такая реализация имеет следующие недостатки.

1) для повышения рабочей частоты резистивного усилителя требуется увеличение потребления тока;

2) широкополосные усилители более склонны к возбуждению и более восприимчивы к интермодуляционным помехам и наводкам;

3) собственные шумы усилителей, расположенных после ФСС, усиленные в широкой полосе, могут вызвать подавление полезного сигнала.

Поэтому часто даже в УПЧ с ФСС рекомендуется установка дополнительных фильтров, не влияющие на результирующую избирательность (например широкополосные одноконтурные LC-фильтры) но подавляющих указанные помехи.

Следует учитывать также, что использование в УПЧ LC-контуров обуславливает дополнительное ограничение минимального значения промежуточной частоты, определяемого допустимыми габаритами микро-катушек индуктивности, до уровня  $2\div 3$  МГц.

В качестве усилителей с распределенной фильтрацией могут использоваться активные RC-фильтры, осуществляющие одновременно как частотную селекцию, так и усиление сигнала.

### ***Выбор активных элементов интегральных микросхем.***

С точки зрения минимизации стоимости прибора, времени разработки, массы и габаритов устройства наиболее эффективна реализация усилительного тракта целиком на одной БИС. Однако при этом разработчик сталкивается с необходимостью применять I структурную схему и идеологию построения приемника, которая была заложена ее проектировщиком. Обычно монолитные БИС изготавливаются только для массовой продукции - радиовещательных переносных приемников и обладают средними электрическими характеристиками. Компромиссным решением является использование специализированной гибридной БИС усилительного тракта. Такая БИС изготавливается на предприятии - разработчике приемных устройств и может иметь параметры и идеологию построения, более близкие к требованиям на разрабатываемое приемное устройство при приемлемой стоимости, малых массе и габаритах.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

По мере снижения степени интеграции применяемых БИС и ИС задача реализации выбранной структурной схемы и высоких электрических характеристик облегчается, однако такие показатели качества, как масса, габариты, при этом становятся хуже.

При выборе типа ИС малой и средней степени интеграции для усилительного тракта руководствуются следующими соображениями [1]:

- При высоких требованиях к чувствительности РПрУ входной усилитель УРЧ выполняется на транзисторах или в виде ГИС на бескорпусных транзисторах. На частотах выше 5 ГГц используются полевые транзисторы, у которых коэффициент шума на высоких частотах меньше, чем у биполярных. На более низких частотах полевые транзисторы применяются вместо биполярных только при повышенных требованиях к линейности амплитудной характеристики приемника.
- При выборе ИС для УПЧ учитывают динамический и частотный диапазоны работы схемы, а также коэффициент регулирования усиления при наличии АРУ. Современные ИС имеют относительно малые нелинейные искажения и высокие граничные частоты усиления. Однако следует иметь в виду, что в резистивных усилителях эти параметры часто реализуются за счет повышенного потребления мощности ИС.
- В качестве преобразователей частоты на высоких частотах используются ГИС диодных двойных балансных смесителей, на частотах ниже 300–500 МГц - ИС аналоговых перемножителей. Иногда функции преобразователей частот в этом диапазоне выполняют полевые транзисторы, обладающие меньшим уровнем паразитных комбинационных составляющих и большим динамическим диапазоном, чем биполярные. Однако ИС аналоговых перемножителей не очень уступают полевым транзисторам по этим параметрам и обладают лучшей стабильностью характеристик.
- Успешно используются преобразователи частоты на аналоговых перемножителях с фазовым подавлением зеркального канала (схема Хартли), позволяющие существенно ослабить требования к частотной избирательности УРЧ (подавление до 30 ... 40 дБ).

В приемниках инфранизкого типа внимание следует уделять расширению динамического диапазона входных усилителей и смесителей. Это повышает многосигнальную избирательность устройства и дает возможность использовать входные цепи с минимальной частотной фильтрацией.

Зеркальный канал подавляется фазовым методом или применяется преобразование частоты вверх. Вся основная фильтрация осуществляется в фильтре УПЧ, стоящем после смесителя. Динамический диапазон усилителей расширяется с помощью отрицательных обратных связей или с помощью использования на входе мощных маломощных транзисторов [1].

**Литература к разделу 2**

1. Банков В.Н., Л.Г. Барулин и др. Радиоприёмные устройства / Под ред. Л.Г. Барулина. – М.: Радио и Связь, 1984.
2. Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин и др.; Под ред. Н.Н. Фомина. Радиоприемные устройства: Учебник для ВУЗов /- М.: Горячая линия, 2007. - 520 с.
3. У. Томаси. Электронные системы связи /- М.: Техносфера, 2007. - 1360 с.
4. Справочник по учебному проектированию приемно-усилительных устройств /М.К.Белкин и др. - 2-е изд., перераб., доп. - Киев: Вища шк., 1988.- 471 с.
5. Прототипирование программно-определяемых радиосистем с помощью NI LabVIEW FPGA/ URL: <http://www.ni.com>
6. Галкин В.А. Основы программно-конфигурируемого радио//М.: Горячая линия – Телеком, 2015. - 375 с.
7. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.
8. Задорин А. С., Максимов А.В., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов (УПО-ДАС). Методические указания по выполнению лабораторных работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 77 с.
9. Остапенков П.С., Смольский С.М. Особенности обработки сигналов в современных измерительных системах: учеб. пособие / - М.: КУРС, 2018. - 208 с.
10. ГОСТ 24375-80 Радиосвязь. Термины и определения
11. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
12. Кононович Л.М. Современный радиовещательный приемник. - М.: Радио и связь, 1986.- 144 с.
13. Радиоприемные устройства: учебное пособие / В. Т. Еременко, А. П. Фисун, В. В. Казанов, И.Ф. Малайчук, А.В. Ноздрачёв. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2018. – 165 с.



**Приложение А. Форма бланка задания на курсовой проект**

"УТВЕРЖДАЮ"

Зав. кафедрой РСС \_\_\_\_\_ А.В.Фатеев  
26 февраля 2018 г.

**З А Д А Н И Е № 1**

на курсовое проектирование по дисциплине  
«Устройства приёма и обработки сигналов»  
студенту группы 147-М1 *Иванову Петру Сидоровичу*

Тема проекта: Бытовой радиовещательный приемник Б-РВП).

Назначение: бытовой радиоэлектронный аппарат предназначен для приема и воспроизведения радиовещательных программ в соответствии с ГОСТ 5651-89

2. Исходные данные к проекту:
  - 2.1. Диапазон частот - ДВ (0,144-0,415 МГц);
  - 2.2. Условия эксплуатации - стационарный;
  - 2.3. Группа сложности - вторая;
  - 2.4. Чувствительность, ограниченная шумами, при отношении сигнал/шум не менее - 20 дБ  
по напряжению со входа для внешней антенны, мкВ, не хуже - 200;
  - 2.5. Односигнальная избирательность по соседнему каналу при расстройке  $\pm 9$ кГц, дБ, не менее - 30;
  - 1.6. Односигнальная избирательность по зеркальному каналу, дБ, не менее: 10
  - 1.7. Глубина ручной регулировки усиления, дБ - 50.
  - 1.8. Действие ручной автоматической регулировки усиления: изменение уровня сигнала на входе, дБ, - 30  
изменение уровня сигнала на выходе, дБ, не более - 10
  - 1.9. Технологическая платформа структурной схемы РПрУ- аналоговый инфрадинный приемник с с технологией программно-определяемого радиоприема (Software Defined Radio).
3. Перечень вопросов, подлежащих разработке:
  - 2.5. Разработку структурной схемы радиоприемника и ее эскизный расчет;
  - 2.6. Электрический расчет принципиальной схемы и симуляция работы в среде к.-л. CAD-системы следующих блоков приёмника:  
Усилитель высокой частоты и преселектор;  
Первый преобразователь;  
Фильтр усилителя первой промежуточной частоты;
  - 2.7. Сравнение расчётных характеристик приёмника с заданными ТЗ.
4. Перечень обязательных чертежей:
  - 3.2. Структурная схема приёмника;
  - 3.3. Принципиальная и монтажная схемы перечисленных выше каскадов приёмника, выполненные в системе P-Cad.
  - 3.4. Перечень элементов.
  - 2.8. Топологическая схема и АЧХ ПАВ-фильтра.
5. Перечень обязательных чертежей:
  - 3.5. Структурная схема приёмника;
  - 3.6. Принципиальная схема преселектора и ПрЧ приёмника,
  - 3.7. Перечень элементов.
6. Список литературы:
  - 4.5. Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин и др.; Под ред. Н.Н. Фомина. Радиоприемные устройства: Учебник для ВУЗов /- М.: Горячая линия, 2007. - 520 с.
  - 4.6. ГОСТ 5651-89. Аппаратура радиоприемная бытовая. Общие технические условия.
  - 4.7. У. Томаси. Электронные системы связи /- М.: Техносфера, 2007. - 1360 с.
  - 4.8. Задорин А. С., Максимов А.В., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов (УПО-ДАС). Методические указания по курсовому проектированию: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 77 с.

Дата выдачи задания 26.02 2018 г. Срок сдачи готового проекта на кафедру 20.05 2018 г.

Руководитель \_\_\_\_\_ А.С.Задорин

Подпись студента \_\_\_\_\_

**Приложение Б. Пример оформления титульного листа**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

**ПРОТОТИПИРОВАНИЕ УКВ-FM SDR-ПРИЕМНИКА НА ПЛАТФОРМЕ  
БЛОКАUSRP-2920**

Пояснительная записка к курсовому проекту

по дисциплине «Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов»

Студент группы 148-1М

\_\_\_\_\_ П.С. Иванов

Руководитель

Доцент кафедры РЗИ, к.т.н.

\_\_\_\_\_ И.Ю.Кузьменко

2019