

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических устройств

**Н. И. Листопад, А. М. Бригидин**

***ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА***

Методическое пособие  
для студентов специальности  
«Техническое обеспечение безопасности»  
заочной формы обучения

Минск БГУИР 2009

УДК 621.396.62+621.396.61(075.8)

ББК 32.849+32.848я73

Л63

Рецензент:

заведующий кафедрой «Сети и устройства телекоммуникаций»  
Учреждения образования «Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники», доктор технических наук,  
профессор В. К. Конопелько

**Листопад, Н. И.**

Л63 Приемопередающие устройства : метод. пособие для студ. спец. «Техническое обеспечение безопасности» заоч. формы обуч. / Н. И. Листопад, А. М. Бригидин. – Минск : БГУИР, 2009. – 56 с.  
ISBN 978-985-988-434-9

В пособии представлены рабочая программа, методические указания и контрольные вопросы по каждой теме дисциплины, список рекомендованной литературы, приведены таблицы вариантов двух контрольных работ с индивидуальными заданиями для каждого студента.

УДК 21.396.62+621.396.61(075.8)  
ББК 32.849+32.848я73

ISBN 978-985-988-434-9

© Листопад Н. И., Бригидин А. М., 2009  
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Рабочая программа по дисциплине «Приемопередающие устройства» .....	4
1.1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе .....	4
1.2. Содержание дисциплины .....	4
2. Учебно-методическая литература .....	12
3. Методические указания.....	12
3.1. Введение .....	12
3.2. Основы теории безынерционных ГВВ.....	14
3.3. Характеристики и принципы расчета ГВВ. Особенности работы инерционных ГВВ.....	15
3.4. Цепи согласования, питания и смещения в ГВВ.....	17
3.5. Схемы резонансных ГВВ. Сложение мощностей активных элементов (АЭ). Умножители частоты.....	18
3.6. Основы теории автогенераторов .....	20
3.7. Схемотехника и расчет АГ. Стабилизация частоты в АГ .....	22
3.8. Современные методы построения высокостабильных АГ .....	23
3.9. Современные возбудители радиопередатчиков .....	25
3.10. Амплитудная и однополосная модуляция (АМ и ОМ) .....	26
3.11. Угловая и импульсная модуляция .....	28
3.12. Методы формирования манипулированных сигналов .....	29
3.13. Основные характеристики приемных устройств.....	31
3.14. Входные цепи радиоприемника.....	33
3.15. Особенности входных цепей различных частотных диапазонов .....	34
3.16. Резонансные усилители (РУ) .....	35
3.17. Характеристики и особенности построения РУ .....	37
3.18. Преобразователи частоты (ПЧ) .....	38
3.19. Транзисторные и диодные преобразователи.....	40
3.20. Детекторы .....	42
3.21. Регулировки в радиоприемниках.....	44
3.22. Помехоустойчивость в радиоприемниках .....	45
3.23. Структурные схемы систем связи с амплитудной и частотной модуляцией.....	47
3.24. Приемопередающие тракты цифровых систем связи.....	49
3.25. Приемопередающие тракты радиолокационных систем (РЛС) .....	50
4. Контрольные работы .....	52

# РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА»

## 1.1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

### *Цель изучения дисциплины*

Дисциплина «Приемопередающие устройства» – одна из инженерных дисциплин в системе подготовки радиоинженеров специальности 1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности». Целью преподавания дисциплины является обучение выпускника современным методам анализа и синтеза устройств, предназначенных для генерирования и формирования радиосигналов, радиоприёма и обработки этих сигналов в различных диапазонах волн.

### *Задачи изучения дисциплины*

В результате изучения дисциплины студент должен:

#### **знать:**

- основные методы и средства генерирования и формирования радиосигналов;
- принципы работы и основные характеристики радиоприёмников;
- структурные и функциональные схемы приемопередающих устройств;
- элементы теории помехоустойчивости радиоприёма;

#### **уметь:**

- осуществлять эксплуатацию, ремонт и наладку радиоэлектронных устройств генерирования, формирования, приёма и обработки радиосигналов;
- определять показатели и характеристики основных устройств приемопередающей техники и использовать вычислительную технику.

Перечень дисциплин, на знаниях которых базируется изучение дисциплины «Приемопередающие устройства», представлен в табл. 1.1

## 1.2. Содержание дисциплины

Программой дисциплины «Приемопередающие устройства» предусмотрено самостоятельное изучение материала по введению и 24 темам, распределение которых по семинарам приведено в табл. 1.2. Литература, которой рекомендуется воспользоваться при изучении дисциплины, указана в конце каждой темы, а общий список литературы – в разд. 2. Особое внимание следует обратить на методические указания по каждой теме и контрольные вопросы, приведенные в разд. 3.

Умение отвечать на контрольные вопросы является гарантией успешной сдачи экзаменов. Студенты 4-го курса выполняют две контрольные работы: по одной в 7-м и 8-м семестрах.

Таблица 1.1

Название дисциплин	Раздел, тема
1. Теория колебаний и волн	Раздел 1. Основы теории колебаний Раздел 2. Основы теории волн Раздел 3. Волны в направляющих структурах Раздел 4. Распространение электромагнитных волн
2. Радиотехнические цепи и сигналы	Раздел 1. Электронные приборы Раздел 2. Физические основы полупроводниковых приборов Раздел 3. Полупроводниковые диоды Раздел 4. Электронные приборы для отображения информации <i>Радиотехнические цепи и сигналы</i> Раздел 1. Радиотехнические сигналы Раздел 2. Преобразование сигналов в линейных радиотехнических цепях Раздел 3. Преобразование сигналов в нелинейных и параметрических цепях Раздел 4. Преобразование случайных сигналов
3. Электрорадиоэлементы, узлы функциональной микроэлектроники и технологии РЭС	Тема 1. Введение. Направления функциональной электроники. Моделирование элементной базы РЭС. Тема 2. Дискретные электрорадиоэлементы для поверхностного монтажа Тема 3. Устройства акустоэлектроники Тема 4. Устройства коммутации и соединители Тема 5. Устройства на приборах с зарядной связью Тема 6. Элементы устройств памяти и логики Тема 7. Элементы устройств оптоэлектроники и устройств отображения информации Тема 8. Криотроны и другие компоненты РЭС. Перспективы функциональной электроники

**7-й семестр**  
**«Радиопередающие устройства»**

Введение

**Раздел 1. Устройства генерирования несущих и опорных радиосигналов**

Тема 1. Основы теории безынерционных генераторов с внешним возбуждением (ГВВ)

Тема 2. Характеристики и принципы расчета ГВВ. Особенности работы инерционных ГВВ

Тема 3. Цепи согласования, питания и смещения в ГВВ

Тема 4. Схемы резонансных ГВВ. Сложение мощностей активных элементов (АЭ). Умножители частоты

Тема 5. Основы теории автогенераторов (АГ)

Тема 6. Схемотехника и расчет АГ. Стабилизация частоты в АГ

Тема 7. Современные методы построения высокостабильных АГ

Тема 8. Современные возбудители радиопередатчиков

**Раздел 2. Устройства формирования модулированных и манипулированных сигналов**

Тема 9. Амплитудная и однополосная модуляция (АМ и ОМ)

Тема 10. Угловая и импульсная модуляция (УМ и ИМ)

Тема 11. Методы формирования манипулированных сигналов

Заключение

**8-й семестр**  
**«Приемопередающие устройства»**

**Раздел 3. Характеристики, основные устройства радиоприемников, элементы теории помехоустойчивости**

Тема 12. Основные характеристики приемных устройств

Тема 13. Входные цепи радиоприемника

Тема 14. Особенности входных цепей различных частотных диапазонов

Тема 15. Резонансные усилители (РУ)

Тема 16. Характеристики и особенности построения РУ

Тема 17. Преобразователи частоты (ПЧ)

Тема 18. Транзисторные и диодные преобразователи частоты

Тема 19. Детекторы

Тема 20. Регулировки в радиоприемниках

Тема 21. Помехоустойчивость в радиоприемниках

**Раздел 4. Структурные схемы приемопередающих устройств**

Тема 22. Структурные схемы систем связи с амплитудной и частотной модуляцией

**7-й семестр**

**«Радиопередающие устройства»**

**ВВЕДЕНИЕ**

Предмет, содержание, последовательность изложения разделов дисциплины, её связь с другими дисциплинами. Радиосигнал и его характеристики. Виды радиопомех. Назначение и области применения приемопередающих устройств. Этапы развития. Требования, предъявляемые к устройствам генерирования, формирования, приема и обработки радиосигналов. Основные показатели, классификация, характеристики электромагнитной совместимости. Международное сотрудничество в области радиосвязи.

[1, с. 5 – 7; 2, с. 9 – 15; 4, с. 4 – 14]

**Раздел 1. Устройства генерирования несущих и опорных радиосигналов**

Тема 1. Основы теории безынерционных генераторов с внешним возбуждением (ГВВ)

ГВВ: принцип действия, структурная схема, баланс мощностей. Активные элементы (АЭ) ГВВ, их типы. Статические характеристики и их аппроксимация. Режимы работы АЭ.

[3, с. 16 – 22; 6, с. 10 – 12; 4, с. 16 – 20]

Тема 2. Характеристики и принципы расчета ГВВ. Особенности работы инерционных ГВВ

Динамические и нагрузочные характеристики ГВВ. Расчет электронного режима ГВВ. Применение ЭВМ при проектировании ГВВ. Особенности работы биполярных транзисторов (БТ) на повышенных частотах. Коррекция частотных характеристик БТ. Особенности работы ГВВ на сверхвысоких частотах (СВЧ). Принципы расчета входной цепи инерционного ГВВ.

[2, с. 36 – 41; 4, с. 25 – 27; 2, с. 71 – 74, с. 98 – 103; 4, с. 34 – 42, с. 55 – 59]

Тема 3. Цепи согласования, питания и смещения в ГВВ

Межкаскадные, входные и выходные цепи согласования. Особенности построения широкополосных цепей согласования. Цепи питания и смещения в ГВВ.  
[2, с. 127 – 143, с. 163 – 176]

#### Тема 4. Схемы резонансных ГВВ. Сложение мощностей активных элементов (АЭ). Умножители частоты

Способы сложения мощностей АЭ ГВВ. Мостовой метод сложения мощностей. Схемы резонансных ГВВ. Транзисторные и варакторные умножители частоты.

[2, с. 176 – 199; 4, с. 93 – 105]

#### Тема 5. Основы теории автогенераторов (АГ)

Требования к АГ. Транзисторные и диодные АГ. Стационарный режим работы АГ. Условие самовозбуждения и устойчивости колебаний в АГ. Мягкий и жёсткий режимы самовозбуждения АГ.

[2, с. 222 – 232; 4, с. 120 – 133]

#### Тема 6. Схемотехника и расчет АГ. Стабилизация частоты в АГ

Схемы транзисторных автогенераторов. Расчет электронного режима АГ. Использование ЭВМ при проектировании АГ. Влияние дестабилизирующих факторов на частоту автоколебаний. Условия обеспечения высокой стабильности частоты. Кратковременная и долговременная стабильность частоты. Кварцевая стабилизация частоты автоколебаний. Схемы кварцевых АГ.

[2, с. 232 – 239, с. 240 – 246; 4, с. 144 – 147, с. 157 – 162]

#### Тема 7. Современные методы построения высокостабильных АГ

Синхронизация АГ. Кварцевые АГ на гибридных и интегральных схемах. Генераторы, управляемые напряжением (ГУН). АГ на резонаторах с поверхностными акустическими волнами (ПАВ). АГ на диодах Ганна и лавинопролетных диодах.

[6, с. 151 – 155; 4, с. 164 – 180]

#### Тема 8. Современные возбудители радиопередатчиков

Требования к современным возбудителям. Методы синтеза дискретной сетки частот. Пассивные синтезаторы. Цифровые синтезаторы частоты с кольцом фазовой подстройки.

[2, с. 222 – 225, с. 247 – 257]

## **Раздел 2. Устройства формирования модулированных и манипулированных сигналов**

### **Тема 9. Амплитудная и однополосная модуляция (АМ и ОМ)**

АМ изменением напряжения питания. Усиление АМ-колебаний. Комбинированная модуляция. Основные энергетические показатели, искажения, схемы осуществления АМ. Особенности ОМ. Методы формирования однополосных сигналов. Элементы модуляторов.

[2, с. 280 – 290; 4, с. 188 – 199]

### **Тема 10. Угловая и импульсная модуляция (УМ и ИМ)**

Основные характеристики угловой модуляции. Прямые и косвенные методы получения сигналов с УМ. Схемы частотных и фазовых модуляторов. Импульсная работа радиопередатчиков. Накопители и коммутаторы энергии. Модуляционные устройства с частичным и полным разрядом накопителя.

[2, с. 393 – 404; 3, с. 128 – 155]

### **Тема 11. Методы формирования манипулированных сигналов**

Амплитудная, частотная, фазовая манипуляция. Основные характеристики, применения, схемы осуществления. Сравнительная оценка различных видов формирования цифровых радиосигналов. Квадратурная фазовая манипуляция ОФМ-4 (QPSK). Многочастотная манипуляция. Квадратурная амплитудная манипуляция (КАМ-16).

[1, с. 135 – 139; 5, с. 99 – 112]

## **8-й семестр**

### **«Приемопередающие устройства»**

## **Раздел 3. Характеристики, основные устройства радиоприемников, элементы теории помехоустойчивости**

### **Тема 12. Основные характеристики приемных устройств**

Основные характеристики приемного устройства. Чувствительность радиоприемного устройства. Избирательность радиоприемника. Верность воспроизведения сообщения.

[3, с. 162 – 166; 7, с. 16 – 34]

#### Тема 13. Входные цепи радиоприемника

Назначение и классификация входных цепей. Структурная схема входной цепи. Основные показатели качества входных цепей.

[3, с. 166 – 169; 7, с. 35 – 36]

#### Тема 14. Особенности входных цепей различных частотных диапазонов

Пример расчета коэффициента передачи входной цепи. Избирательность входной цепи. Входные цепи на частотах ниже 100 МГц. Входные цепи радиоприемников в дециметровом и сантиметровом диапазоне волн.

[7, с. 37 – 48, с. 58 – 60]

#### Тема 15. Резонансные усилители (РУ)

Назначение и классификация резонансных усилителей. Принципиальная электрическая схема резонансного усилителя. Обобщенная схема РУ.

[3, с. 169 – 172; 7, с. 63 – 65]

#### Тема 16. Характеристики и особенности построения РУ

Коэффициент усиления, избирательность и полоса пропускания РУ. Особенности построения РУ ультракоротковолнового диапазона волн. Интегральные микросхемы для РУ. Каскодные схемы РУ.

[7, с. 66 – 74, с. 91 – 102]

#### Тема 17. Преобразователи частоты (ПЧ)

Назначение и классификация ПЧ. Структурная схема преобразователя частоты. Принцип работы. Эквивалентные параметры ПЧ.

[1, с. 307 – 310; 7, с. 108 – 110]

#### Тема 18. Транзисторные и диодные преобразователи частоты

Побочные каналы приема в супергетеродинных радиоприемниках. Транзисторные и диодные ПЧ. Выбор микросхемы для ПЧ.

[7, с. 110 – 123]

#### Тема 19. Детекторы

Принцип детектирования. Амплитудные детекторы, схемы и их характеристики. Детекторы импульсных и однополосных сигналов. Частотные и фазовые детекторы: принцип работы, схемы осуществления, характеристики.  
[1, с. 299 – 303, с. 303 – 307; 7, с. 177 – 182]

#### Тема 20. Регулировки в радиоприемниках

Автоматические устройства управления и регулировок. Цифровые схемы автоматической регулировки усиления и автоподстройки частоты. Дистанционное управление приемником.  
[1, с. 440 – 444; 7, с. 242 – 248]

#### Тема 21. Помехоустойчивость в радиоприемниках

Понятие о помехоустойчивости. Методы борьбы с помехами в радиоприемниках. Действие сосредоточенных помех на приемник. Действие импульсных помех на приемник. Оценка пропускной способности канала связи с шумами.  
[1, с. 454 – 460; 7, с. 276 – 292]

### **Раздел 4. Структурные схемы приемопередающих устройств**

#### Тема 22. Структурные схемы систем связи с амплитудной и частотной модуляцией

Структурные схемы приемопередающих устройств с однополосной модуляцией. Тракты формирования и приема сигналов с полярной модуляцией. Классификация и особенности построения радиосистем с угловой модуляцией.  
[2, с. 342 – 346; 7, с. 301 – 304; 2, с. 420 – 424; 7, с. 331 – 335; 2, с. 417 – 419; 7, с. 329 – 331]

#### Тема 23. Приемопередающие тракты цифровых систем связи

Структурные схемы приемопередающих трактов сотовых систем связи, бесшнуровых систем, беспроводных абонентских линий и локальных сетей. Структурные схемы спутниковых систем связи. Структурные схемы цифровых радиорелейных линий связи. Структурные схемы модуляционных и демодуляционных устройств.  
[1, с. 48 – 55, с. 59 – 61; 2, с. 527 – 533; 5, с. 76 – 86]

#### Тема 24. Приемопередающие тракты радиолокационных систем

Структурные схемы приемопередающих трактов РЛС селекции движущихся целей, РЛС с непрерывным излучением. Функциональная схема устройств формирования, приема и обработки сигналов.

[1, с. 46 – 48; 7, с. 325 – 336]

## 2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

### ОСНОВНАЯ

1. Нефедов, А. И. Основы радиоэлектроники и связи. / А. И. Нефедов. – М. : Высш. шк., 2002. – 510 с.

2. Радиопередающие устройства : учебник для вузов / под ред. В. В. Шахгильдяна. – М. : Радио и связь, 2003. – 560 с.

3. Радиотехнические устройства и элементы радиосистем : учеб. пособие / В. А. Каплун [и др.]. – М. : Высш. шк., 2002. – 294 с.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

4. Петров, Б. Е. Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах / Б. Е. Петров, В. А. Романюк. – М. : Высш. шк., 1989. – 232 с.

5. Галкин, В. А. Цифровая мобильная радиосвязь : учеб. пособие для вузов / В. А. Галкин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 432 с. ил.

6. Устройства генерирования и формирования сигналов / Л. А. Белов [и др.] ; под ред. Г. М. Уткина, В. Н. Кулешова и М. В. Благовещинского. – М. : Радио и связь, 1994. – 415 с.

3.7. Головин, О. В. Радиоприемные устройства : учебник для техникумов / О. В. Головин – М. : Горячая линия – Телеком, 2002. – 324 с. ил.

## 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### 3.1. Введение

В арсенале технических средств обеспечения безопасности ключевая роль принадлежит системам сбора и передачи, приема и обработки информации, основу которых составляют приемопередающие устройства. Учебный курс состоит из двух частей: радиопередающие устройства и приемопередающие устройства. Необходимо хорошо представлять структурную схему радиотехнического канала передачи информации, назначение отдельных её устройств как в передающей, так и в приемной частях. Особое внимание следует обратить на обоснование необходимости выполнения основных операций обработки сигнала – модуляции и демодуляции, изучить диапазоны частот, используемые в радиосвязи, познакомиться с историей развития радиотехники.

В первой части учебного курса рассматриваются радиопередающие устройства, формирующие радиокосебание в соответствии с требованиями, предъявляемыми к системе, где работает радиопередатчик, который подводит его к системе или линии связи. Для оценки работы радиопередатчика, нужно знать, что такое радиосигнал, каковы его характеристики, в каком месте передатчика происходит то или иное преобразование радиосигнала. Структурная схема передатчика помогает ответить на этот вопрос. Любой радиопередатчик характеризуется набором показателей, которые должны удовлетворять нормативным требованиям. Эти показатели можно разделить на три группы: энергетические характеристики, показатели качества модуляции, параметры электромагнитной совместимости. Необходимо понимать основные соотношения, описывающие эти показатели. Важно знать, по каким признакам классифицируется данное радиотехническое устройство.

Важнейшим устройством передатчика является генератор с внешним возбуждением (ГВВ). Его назначение основное – усиление мощности сигнала. Ряд особенностей работы ГВВ лежит в основе работы умножителей частоты и модуляторов, а автогенератор – это по сути дела ГВВ, охваченный положительной обратной связью. Принцип действия ГВВ поясняют временные диаграммы токов и напряжений. Необходимо уметь начертить принципиальную схему ГВВ, объяснить назначение элементов в схеме, изобразить временные диаграммы, сформулировать выводы.

Во второй части учебного курса рассматриваются приемные устройства и их структурные схемы.

### ***Контрольные вопросы***

1. Изобразите структурную схему радиолинии и поясните назначение радиоблоков, входящих в схему.
2. Поясните термины «симплексная радиосвязь», «дуплексная радиосвязь».
3. В чем состоит назначение передатчика?
4. Что такое радиосигнал? Запишите его аналитическое выражение и объясните назначение параметров, образующих эту аналитическую запись.
5. Какие показатели характеризуют спектр радиосигнала?
6. Перечислите важнейшие параметры передатчика. Как аналитически определяется КПД и выходная мощность передатчика?
7. Изобразите структурную схему радиопередатчика. Объясните его работу.
8. Что такое модуляция? Виды модуляций, их особенности.
9. Дайте определение генератора с внешним возбуждением. Какую роль ГВВ выполняет в передатчике?
10. Почему изучение ГВВ для радиопередающих устройств является первоочередным?
11. Нарисуйте принципиальную схему ГВВ. Назовите основные элемен-

ты ГВВ.

12. Что является нагрузкой в ГВВ? Какую роль выполняет источник смещения? Колебательный контур?

13. Изобразите временные диаграммы токов и напряжений в ГВВ.

14. Запишите выражения для мгновенных значений входного и выходного напряжений.

15. Объясните фазировку напряжений на входе и выходе активного элемента ГВВ.

## 3.2. Основы теории безынерционных ГВВ

### (Тема 1)

При изучении этой темы следует обратить внимание на то, что структурная схема ГВВ создает определенные удобства при анализе работы. Так, с помощью структурной схемы легко составляются уравнения баланса мощностей для входной и выходной цепей ГВВ, выводятся расчетные соотношения для коэффициента полезного действия, коэффициенты усиления ГВВ по мощности и т.д. Необходимо понимать, что затраты мощности во входной цепи ГВВ являются бесполезными с точки зрения КПД, однако без этой мощности не работает само устройство. Поскольку ГВВ – энергоёмкое устройство, то вопросы увеличения его КПД являются наиболее важными. Нужно разобраться, почему другие способы повышения КПД не получили столь широкого распространения, как работа ГВВ с отсечкой выходного тока.

В связи с этим необходимо изучить статические характеристики активных элементов (лампа, транзистор, диод), их аппроксимацию, уметь применять параметры аппроксимированных характеристик при анализе ГВВ, освоить метод проекций и с его помощью построить импульс выходного тока, значение угла отсечки при расчете энергетических параметров ГВВ. Следует вспомнить из курса «Радиотехнические цепи и сигналы» сущность метода гармонического анализа выходного тока усилителя и записать аналитические выражения для постоянной составляющей и первой гармоники выходного тока.

Наряду с аппроксимацией статических характеристик нужно научиться строить динамические аппроксимированные характеристики активных элементов (АЭ). Как известно, динамические характеристики АЭ строятся как в системе координат проходных характеристик, так и в системе координат выходных характеристик АЭ. Только с помощью динамических характеристик можно построить импульсы выходного тока ГВВ, работающие в недонапряженном, критическом и перенапряженном режимах. Следует также отметить, что статические и динамические аппроксимированные характеристики могут в полной мере применяться только при анализе безынерционных ГВВ.

## *Контрольные вопросы*

1. Изобразите структурную схему ГВВ. Объясните назначение блоков.
2. Составьте уравнение баланса мощностей для выходной цепи ГВВ.
3. Составьте уравнение баланса мощностей для входной цепи ГВВ.
4. Почему в ГВВ радиопередатчиков используется режим работы АЭ с отсечкой выходного тока ?
5. Перечислите показатели ГВВ и запишите их в аналитической форме.
6. Какие электронные приборы применяются в передатчиках различного назначения? Назовите их характеристики.
7. Нарисуйте три характеристики АЭ в аппроксимированном виде: входную, выходную, проходную.
8. Какие параметры аппроксимированных характеристик используются при расчетах режима АЭ?
9. В чём состоит сущность гармонического анализа выходного тока АЭ с помощью метода отсечки?
10. Что такое угол отсечки? Какие классы режимов активных элементов различают в зависимости от угла отсечки?
11. Запишите выражение для определения постоянной составляющей и первой гармоники выходного тока АЭ.
12. Каковы условия, при которых электронные приборы работают в недонапряженном, критическом или перенапряженном режимах при колебаниях класса А или В?
13. Что такое динамические характеристики АЭ? С помощью динамической характеристики постройте импульсы выходного тока в недонапряженном, критическом, перенапряженном режимах.
14. Нарисуйте формы импульсов выходного тока в недонапряженном, критическом и перенапряженном режимах. Почему в перенапряженном режиме на вершине импульса выходного тока образуется провал?
15. Нарисуйте аппроксимированные проходную и выходную динамические характеристики и с их помощью покажите, как изменяются напряженность режима АЭ при увеличении амплитуды входного сигнала и напряжении питания.

### **3.3. Характеристики и принципы расчета ГВВ. Особенности работы инерционных ГВВ**

#### **(Тема 2)**

Для поиска оптимального по напряженности режима полезными оказываются нагрузочные характеристики активных элементов (АЭ). Нужно уметь строить нагрузочные характеристики, используя зависимости токов и напряжений, а также энергетических параметров ГВВ от сопротивления нагрузки. Анализ полученных характеристик позволяет установить, что в усилителе мощно-

сти предпочтительны граничный или слегка перенапряженный режим (ПР). Поэтому необходимо знать порядок расчета граничного режима безынерционного ГВВ, условия выбора угла отсечки, максимальное значение выходного тока, напряжение питания. Чтобы не ошибиться при расчетах режимов ГВВ, надо учесть различия в моделях безынерционного и инерционного биполярного транзисторов. Векторные диаграммы токов и напряжений в биполярном транзисторе (БТ) на низких и повышенных частотах отражают важные процессы, протекающие в его структуре. Для ослабления зависимости от частоты и увеличения стабильности параметров ГВВ применяют различного рода корректирующие цепочки. Следует знать типы корректирующих цепочек, условия, при которых они используются. При применении в усилителе мощности мощного биполярного транзистора требуется знать особенности его включения во входную согласующую цепь. Важным этапом проектирования мощных ГВВ является расчет входного сопротивления (или проводимости) транзистора. Усилители мощности на сверхвысоких частотах выполняются по схеме с общей базой. Нужно знать главные особенности такого ГВВ.

### *Контрольные вопросы*

1. Что такое нагрузочные характеристики АЭ?
2. Нарисуйте зависимость токов и напряжений от сопротивления нагрузки. Почему в ПР первая гармоника и постоянная составляющая выходного тока уменьшаются?
3. С помощью уравнения баланса мощностей в выходной цепи АЭ объясните нагрузочные характеристики.
4. Какие электрические величины необходимо определить в ходе расчета выходной цепи АЭ? Запишите формулы.
5. Из каких условий выбираются угол отсечки, максимальное значение импульса выходного тока, напряжение питания?
6. Какие электрические величины необходимо найти при расчете входной цепи АЭ? Запишите формулы.
7. Составьте структурную схему алгоритма расчета биполярного транзистора.
8. Нарисуйте векторную диаграмму токов и напряжений в безынерционном АЭ. Приведите схему эмиттерного перехода БТ при  $w_p < 0,5 \omega_b$ .
9. Изобразите эквивалентную схему открытого эмиттерного перехода мощного БТ. Поясните принцип работы транзистора.
10. Каким образом проявляется инерционность БТ. Приведите эквивалентную схему БТ.
11. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений БТ, работающего на повышенных частотах ( $w_p \geq 0,5 \omega_b$ ).
12. Опишите виды корректирующих цепочек, их достоинство и недостат-

ки.

13. Назовите особенности расчета входной цепи инерционного мощного транзистора.

14. Почему мощный БТ включается последовательно во входную согласующую цепь?

15. В чём заключаются особенности работы ГВВ на сверхвысоких частотах?

### **3.4. Цепи согласования, питания и смещения в ГВВ**

#### **(Тема 3)**

В простейшем случае цепью согласования (ЦС) является колебательный контур, который согласует входное (выходное) сопротивление, фильтрует высшие гармонические составляющие. Сложная цепь согласования представляется в виде системы двух (или более) контуров. Наиболее высокие требования предъявляются к цепям согласования оконечных ГВВ, т. к. они, как правило, являются согласующим звеном между выходом ГВВ и антенной и способствуют наибольшей передаче мощности в нагрузку. Такая согласующая цепь является выходной ЦС. Различают простую схему выхода, когда нагрузка включается в колебательный контур, и сложную схему выхода, при которой нагрузка подключается к активному элементу с помощью связанных контуров. Каждая из схем обладает определенными достоинствами и недостатками.

В современных передатчиках находят применение широкодиапазонные ЦС, выполненные на основе фильтров низкой частоты, а также трансформаторы с магнитной связью между обмотками, ЦС на трансформаторах-линиях (ТЛ). Для усиления широкополосных сигналов используют также усилители с распределенным усилением, усилители с отдельными полосами частот.

Источники питания в ГВВ включаются по параллельной и последовательной схемам. При параллельной подаче питания активный элемент (АЭ), ЦС и питание включаются параллельно. Последовательная схема также определяется последовательным соединением названных элементов.

Источники смещения в ГВВ служат для выбора рабочей точки и определяют угол отсечки входного и выходного токов АЭ. Схему включения источника смещения образуют входные электроды активного элемента, клеммы подачи сигнала возбуждения и напряжения смещения. Они могут быть соединены параллельно или последовательно. Если напряжение смещения подается от отдельного источника, оно называется фиксированным. В случае, когда напряжение смещения образуется в результате падения напряжения на резисторе автосмещения из-за протекания по нему постоянной составляющей базового или эмиттерного токов активного элемента, его называют автоматическим.

## Контрольные вопросы

1. Назначение согласующих цепей в ГВВ и их классификация.
2. Что такое простая цепь выхода? Приведите схему и опишите порядок настройки схемы.
3. Как определяется реактивное сопротивление в простой цепи согласования? Достоинства и недостатки простой схемы выхода.
4. Почему в простой цепи выхода колебательный контур частично подключается к АЭ? Приведите схему. Порядок расчета КПД схемы.
5. Нарисуйте сложную схему выхода. Перечислите операции по настройке сложной схемы выхода.
6. Объясните почему ГВВ при настроенной сложной схеме выхода работает в недонапряженном режиме? Порядок расчета КПД схемы.
7. В чем состоят основные принципы построения широкодиапазонных ГВВ? Как это отражается на построении цепей связи для них.
8. Что такое трансформатор-линия? Опишите вариант включения ТЛ, позволяющий получить коэффициент включения  $N = 4$ .
9. Нарисуйте схему трансформатора на отрезках длинных линий с коэффициентом трансформации сопротивлений  $N = \frac{1}{9}$ .
10. Запишите выражение для коэффициента трансформации сопротивлений трансформатора с магнитной связью. На каких частотах применяется такая цепь согласования?
11. Нарисуйте схему параллельного включения источника смещения в транзисторном ГВВ.
12. В чем состоят особенности параллельного и последовательного включения источника смещения в ГВВ?
13. Нарисуйте схемы включения автосмещения в транзисторном ГВВ.
14. Каким образом осуществляется питание и смещение от одного источника? Приведите схему.
15. Перечислите достоинства и недостатки параллельного и последовательного включения источника питания в ГВВ.

### 3.5. Схемы резонансных ГВВ. Сложение мощностей активных элементов (АЭ). Умножители частоты

#### (Тема 4)

Когда мощности одного АЭ недостаточно, чтобы при реализации передатчика обеспечить заданную мощность, осуществляют их сложение.

При параллельном включении однотипные электроды АЭ соединяют вместе. При двухтактном включении последовательно по току первой гармоники

объединяются два обычных ГВВ, имеющие общую нагрузку и возбуждаемые в противофазе. При мостовом сложении мощностей используется мостовое устройство, называемое многополюсник, с помощью которого обеспечивается совместная и независимая работа двух (и более) источников колебаний на общую нагрузку. Принцип действия мостового сложения мощностей удобно рассматривать на примере обычного моста Уитстона. Важным свойством мостовых устройств является сохранение коэффициента передачи мощности при изменении соотношения амплитуд и фаз обоих АЭ, что несвойственно ГВВ при параллельном и двухтактном включении АЭ. Например, при уменьшении соотношения напряжений от 1 до 0,5 или увеличении фазового сдвига между колебаниями от 0 до 40° коэффициент передачи уменьшается только на 10 %. В диапазоне метровых и более коротких волн широкое распространение получили квадратурные мосты.

Умножителем частоты называется устройство, увеличивающее частоту радиоколебаний в целое число раз. Они используются в передатчиках для расширения частотного диапазона без расширения последнего у задающего генератора, а также для увеличения стабильности частоты. По типу используемых АЭ умножители частоты делятся на два класса: активные и пассивные. В умножителях активного действия в качестве АЭ используются электронные лампы или транзисторы, в пассивных – диоды, варакторы. При составлении принципиальных электрических схем резонансных ГВВ используются способы, применяемые при включении ЦС, напряжений питания и смещения. Если вход и выход активного элемента имеют общий электрод, то схема включения, например, транзистора носит название либо с общим эмиттером, либо с общей базой, либо с общим коллектором. Как правило, общая точка соединяется с корпусом, хотя нередко бывают и исключения. Схема включения с общим эмиттером имеет наибольший коэффициент усиления по мощности на рабочих частотах АЭ. Так как коллектор мощного транзистора конструктивно связан с корпусом, то удобнее такой транзистор включать по схеме с общим коллектором, хотя его коэффициент усиления по мощности будет ниже, чем в схеме с общим эмиттером. Схема с общей базой используется на предельных рабочих частотах транзистора.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какие цели преследует суммирование мощностей АЭ ?
2. Перечислите способы сложения мощностей АЭ.
3. В чём состоит суть сложения мощностей АЭ параллельным способом? Достоинства и недостатки способа.
4. Нарисуйте схему двухтактного усилителя мощности. Назовите достоинства и недостатки.
5. Каким образом изменяются энергетические показатели ГВВ при сложении мощностей?

6. В чём состоит принцип мостового суммирования мощностей АЭ?
7. Перечислите наименования мостовых сумматоров. Начертите схему квадратурного моста и объясните принцип работы.
8. Назначение умножителей частоты. Их виды.
9. Какой физический принцип лежит в основе работы умножителей?
10. Почему энергетические показатели умножителя хуже, чем ГВВ?
11. Что такое варактор? Приведите его характеристику, схему включения.
12. Нарисуйте схему варакторного умножителя частоты и объясните принцип его работы.
13. Перечислите основные характеристики умножителя на пассивных активных элементах.
14. Нарисуйте принципиальную схему усилителя мощности с ОЭ с заземленным коллектором.
15. Нарисуйте принципиальную схему двухтактного ГВВ на трансформаторах из отрезков длинных линий. Поясните принцип работы ГВВ.

### **3.6. Основы теории автогенераторов**

#### **(Тема 5)**

Устройства, в которых энергия источника питания преобразуется в энергию ВЧ-колебаний без внешнего возбуждения, называются автогенераторами (АГ). АГ – первичные источники колебаний, частота и амплитуда которых определяются собственными параметрами АГ и не должны зависеть от внешних условий. В состав АГ входит активный элемент, управляющий поступлением порций энергии от источника питания в колебательную систему. Резонатор (колебательная система) задает частоту автоколебаний, обычно близкую к одной из её собственных частот. Можно сказать, что АГ – это ГВВ, охваченный положительной обратной связью. Стационарный режим работы АГ обеспечивается балансом амплитуд и балансом фаз. При балансе амплитуд потери энергии в контуре компенсируются энергией, поступающей от источника питания через регулятор – активный элемент. При балансе фаз цепь положительной обратной связи поддерживает неизменной фазу колебаний на входе регулятора. В зависимости от типа АЭ различают транзисторные и диодные АГ. В транзисторных АГ внешняя положительная обратная связь создается с помощью собственной колебательной системы (обычно в виде емкостной или индуктивной трехточки), которая формирует управляющий сигнал регулятора определенной амплитуды и фазы. Диодные автогенераторы обеспечивают стационарные колебания за счет специфических процессов в генераторных диодах, механизм обратной связи здесь работает автоматически без применения специальных элементов. Баланс амплитуд и фаз указывает на возможность существования стационарно-

го режима, однако установится ли он на практике, зависит от его устойчивости к малым электрическим возмущениям. Анализ устойчивости стационарных режимов удобно производить с помощью обобщенного годографа.

Условие самовозбуждения можно получить, сравнивая мощность, отдаваемую АЭ, и мощность, потребляемую колебательной системой. Режим возбуждения, в котором колебания возникают самопроизвольно, называется мягким. В АГ с мягким возбуждением состояние покоя неустойчиво. Режим возбуждения, в котором генерация возникает только при наличии внешнего воздействия, создающего колебания с амплитудой больше некоторого порогового значения, называется жестким. Этот режим обладает лучшими энергетическими характеристиками, чем мягкий режим, но необходимость дополнительного источника неоправданно усложняет задачу получения автоколебаний. Поэтому в транзисторных автогенераторах, как правило, совмещают эти два режима. Наиболее распространенными задающими АГ являются генераторы на биполярных транзисторах. Чаще всего применяют схему с емкостной обратной связью (например схему Клаппа).

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое автогенератор? В каких областях он применяется? В чем заключается назначение элементов, образующих АГ?
2. Перечислите требования предъявляемые к автогенераторам. Приведите современные нормы на параметры автогенератора.
3. Запишите и объясните уравнение стационарного режима АГ.
4. Какие задачи решаются с помощью уравнений баланса амплитуд и фаз?
5. Запишите и объясните условия устойчивости и самовозбуждения в АГ.
6. Поясните преимущества мягкого режима самовозбуждения.
7. С какой целью в АГ используется жесткий режим?
8. Изобразите эквивалентные трехточечные схемы АГ. Запишите выражения для нахождения полного сопротивления для колебательных систем этих схем.
9. Перечислите достоинства, недостатки и области применения АГ по емкостной и индуктивной трехточечным схемам. Изобразите принципиальную электрическую схему генератора Колпитца.
10. Изобразите принципиальную электрическую схему АГ по емкостной трехточечной схеме.
11. Объясните применение комбинированного смещения в транзисторных автогенераторах.
12. Почему у емкостного трехточечного АГ повышенная стабильность частоты? Изобразите и опишите схему автогенератора Клаппа.

13. Объясните принцип работы диода Ганна. Изобразите топологию автогенератора на диоде Ганна в микрополосковом исполнении.

14. Что такое отрицательное сопротивление? Нарисуйте статическую и динамическую характеристики ЛПД.

15. Представьте топологическую схему автогенератора на ЛПД в микрополосковом исполнении и объясните принцип ее работы.

### **3.7. Схемотехника и расчет АГ. Стабилизация частоты в АГ**

#### **(Тема 6)**

При работе транзистора в классах АВ, В, С и использовании корректирующих цепей коллекторный ток имеет форму косинусоидальных импульсов, и поэтому расчет электронного режима транзистора можно проводить по стандартной методике с использованием  $\alpha$ - или  $\gamma$ -коэффициентов. Помимо расчета электронного режима транзистора необходимо определить параметры колебательной системы, цепей смещения и питания. По известным формулам следует составить блок-схему расчета автогенератора на компьютере и путем изменения угла отсечки и значения высоты импульса коллекторного тока найти оптимальные параметры рассчитываемого автогенератора.

Сигнал, генерируемый АГ, не является абсолютно монохроматическим. Из-за различных физических причин происходит изменение амплитуды и фазы сигнала, которые носят как регулярный, так и случайный характер. Эти флуктуации влияют на стабильность частоты АГ. Различают долговременную и кратковременную нестабильность частоты. Факторы, влияющие на стабильность частоты АГ, называются дестабилизирующими. Из-за нестабильности частоты нарушается надежность радиосвязи, её бесперебойность для обеспечения уверенного приема, бесперебойного вхождения в связь и максимальной оперативности связи. Анализ показывает, что для уменьшения нестабильности частоты АГ необходимо снижать температурные коэффициенты емкости и индуктивности резонатора и увеличивать их добротность. Для получения высокой точности и стабильности частоты генерируемых колебаний в АГ в качестве колебательной системы используется кварц: такие АГ называются кварцевыми. Кварцевый резонатор относится к колебательным системам с распределёнными параметрами. Однако вблизи резонансных частот он может быть заменен эквивалентным электрическим контуром с сосредоточенными параметрами. Различные виды механических колебаний в кварцевой пластине могут происходить на основной частоте или на одной из нечетных механических гармоник.

Как правило, основная частота кварцевых резонаторов не превышает 30 МГц, нестабильность частоты кварцевых резонаторов –  $10^{-6}$ , а в особых случаях –  $10^{-8} \dots 10^{-9}$ . Для построения схем высокостабильных АГ кварцевый резонатор используют либо как высокоэталонную индуктивность, замещая им катушку в емкостной трехточечной схеме, либо как высокочастотный последовательный контур в цепи положительной обратной связи АГ. В соответствии с местом включения кварца в схему АГ различают две группы кварцевых АГ: осцилляторы и фильтровые.

### ***Контрольные вопросы***

1. Приведите порядок расчета режима транзистора в автогенераторе.
2. Каким образом нестабильность частоты влияет на работу передатчика?
3. В чем разница между понятием долговременной и кратковременной нестабильности частоты?
4. Приведите примеры дестабилизирующих факторов и объясните механизм их влияния на нестабильность частоты АГ.
5. Перечислите условия обеспечения высокой стабильности частоты АГ.
6. Нарисуйте спектр автоколебаний и объясните механизм его образования.
7. Приведите порядок расчета внешних цепей автогенератора.
8. В чем заключается особенность последовательного и параллельного резонансов кварца?
9. Особенности построения осцилляторных и фильтрующих схем кварцевых АГ. Приведите эквивалентные схемы АГ.
10. Приведите примеры осцилляторной схемы кварцевого АГ.
11. Что такое гармониковый АГ? Изобразите принципиальную электрическую схему такого АГ.
12. Приведите принципиальную схему кварцевого АГ, работающего на основной частоте последовательного резонанса кварца.
13. Что такое диапазонно-кварцевая стабилизация частоты?
14. Нарисуйте принципиальную схему кварцевого автогенератора.
15. Для каких целей в кварцевых автогенераторах применяются корректирующие цепочки? Принципы их расчета.

### **3.8. Современные методы построения высокостабильных АГ**

#### **(Тема 7)**

АГ приобретает новые качественные возможности при синхронизации его автоколебаний внешним сигналом. Синхронизация – это процесс взаимодействия внешнего источника колебаний с АГ, при котором частота последнего становится равной частоте взаимодействующего источника сигнала. Область применения синхронизации обширна. Наиболее широко синхронизацию ис-

пользуют в радиопередающей технике на СВЧ, где затруднительно получить мощный сигнал со стабильной частотой.

В современной технике радиосвязи успешно применяются генераторы, управляемые напряжением (ГУН). Согласно стандарту Международной электротехнической комиссии управляемый напряжением кварцевый генератор определяется как генератор, стабилизированный кварцем, частоту которого можно изменять или модулировать согласно определенной зависимости воздействием управляющего напряжения. В ГУНе в качестве управляющего элемента обычно применяют варикап.

В настоящее время большинство применяемых устройств – активные на основе полупроводниковых приборов и пассивные (фильтры, мостовые устройства, согласующие звенья и др.) – изготавливают по интегральной технологии. Интегральные устройства подразделяют на три основных типа: полупроводниковые, пленочные и гибридные. При гибридном исполнении желательно выбирать схемы АГ, не содержащие частотно-избирательных цепей с индуктивностями из-за трудностей их изготовления с нужной точностью. Автогенераторы с кварцем в интегральном исполнении выполняют на базе интегральных усилителей. При этом кварцевые резонаторы являются выносными элементами.

При построении высокостабильных АГ на частотах вплоть до 2 ГГц в настоящее время все большее применение находят линии задержки и резонаторы на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Такие АГ отличаются высокой технологичностью и большой механической прочностью. Стабильность частоты их колебаний лишь на один-полтора порядка хуже стабильности частоты кварцевых АГ. Схемы АГ с резонаторами на ПАВ подобны схемам с кварцевыми резонаторами.

Самосинхронизация – это процесс воздействия на АГ части собственного сигнала, поступающего в автоколебательную систему АГ с помощью специально созданной внешней дополнительной обратной связи (ВДОС). В самосинхронизированном АГ возможно осуществлять перестройку частоты, различные виды модуляции и манипуляции, автоподстройку частоты и стабилизацию частоты с помощью высокодобротного резонатора.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое синхронизация частоты? Что такое режим биений?
2. Области применения синхронизации частоты. Как осуществляется усиление колебаний с помощью схемы синхронизации?
3. Нарисуйте схему, осуществляющую синхронизацию автоколебаний.
4. Запишите формулу для определения полосы синхронизации и объясните ее сущность.
5. Дайте определение кварцевого генератора, управляемого напряжением (КГУН) и приведите эквивалентные схемы этих устройств.
6. Приведите принципиальную электрическую схему КГУН и объясните

назначение элементов в схеме.

7. Объясните различие между гибридными и интегральными схемами автогенераторов.

8. Нарисуйте принципиальную электрическую схему кварцевого генератора, положенную в основу гибридной схемы АГ.

9. Перечислите достоинства устройств на поверхностных акустических волнах.

10. Объясните принцип действия одноходового резонатора на ПАВ и приведите конструктивную схему такого резонатора.

11. Что такое встречно-штыревой преобразователь? Нарисуйте схему конструкции устройства на поверхностных акустических волнах.

12. Нарисуйте схему автогенератора на туннельном диоде, где использован резонатор на ПАВ.

13. Что такое самосинхронизация?

14. Приведите структурную схему самосинхронизированного генератора.

15. Назовите области применения генераторов с внешней положительной дополнительной обратной связью.

### **3.9. Современные возбудители радиопередатчиков**

#### **(Тема 8)**

Возбудитель современного радиопередатчика – сложное и дорогостоящее устройство, состоящее из синтезатора частот (СЧ), вырабатывающего одно или несколько выходных когерентных колебаний с заданными частотами, формирователя видов работ на фиксированной поднесущей частоте, тракта переноса (ТП) сформированных колебаний в рабочий диапазон частот и блока питания (БП). Возбудители обеспечивают значительное число частот (20...30 тыс. и более) при относительной стабильности частоты  $10^{-6} \dots 10^{-7}$ . В синтезаторах рабочие частоты формируются в результате когерентных преобразований частоты одного опорного высокостабильного автогенератора. Синтезаторы частот строятся на основе метода либо прямого, либо косвенного синтеза.

В синтезаторах, построенных на основе прямого синтеза, выходные колебания получаются с помощью операций сложения, вычитания, умножения, деления эталонной опорной частоты. К таким устройствам относятся следующие аналоговые системы синтеза частот: гетеродинные (интерполяционные) с использованием генератора гармоник, декадные и др. Цифровые системы синтеза частот на основе суммирования импульсных последовательностей и с цифровым накоплением фазы имеют лучшие характеристики, чем аналоговые. При косвенном (активном) синтезе выходной сигнал формируется самостоятельно в перестраиваемом по частоте автогенераторе, частота которого непрерывно сравнивается с эталонной и подстраивается при помощи систем автоматиче-

ской подстройки частоты. Основной трудностью аналоговой системы синтеза частот с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) является построение делителя с переменным коэффициентом деления (ДПКД), обеспечивающего большое число возможных коэффициентов деления. Более эффективной системой синтеза частот является цифровой синтезатор, в котором аналоговый фазовый детектор и ДПКД заменены соответственно на импульсно-фазовый детектор и цифровой ДПКД.

Наибольшую стабильность частоты получают в синтезаторе на основе квантовых стандартов частоты. Однако здесь возникают две определенные трудности: чрезмерно высокая частота квантового стандарта и чрезмерно малая мощность его выходных колебаний. Применение схемы переноса стабильности квантового эталона с вычитанием позволяет решить эти задачи.

### *Контрольные вопросы*

1. Нарисуйте структурную схему возбuditеля РПДУ, поясните назначение отдельных ее частей.
2. Приведите современные нормы на параметры возбuditелей.
3. Перечислите основные характеристики синтезаторов частоты.
4. Укажите основные принципы построения синтезаторов частот.
5. Что такое «генератор гармоник»? Приведите схему.
6. Изобразите структурную схему интерполяционного метода и поясните работу схемы.
7. Нарисуйте структурную схему синтезаторов, выполненных по принципу цифрового прямого синтеза.
8. Сформируйте и поясните теорему Котельникова.
9. Назовите основные элементы системы ФАПЧ и поясните принцип ее работы.
10. Объясните назначение фильтра низких частот в системе ФАПЧ и в синтезаторах, построенных по прямому синтезу.
11. Какой элемент используется в качестве управления частоты в системе ФАПЧ? Как он включается в схему? В чем заключается процесс управления частотой?
12. Изобразите структурную схему синтезатора частот с ДПКД и поясните принцип ее работы.
13. В чем состоят особенности построения цифрового синтезатора частот (СЧ)? Нарисуйте структурную схему СЧ и поясните принцип ее работы.
14. Изобразите структурную схему синтезатора частот на основе квантового стандарта частоты и поясните принцип ее работы.
15. Объясните принцип работы импульсно-фазового детектора.

### 3.10. Амплитудная и однополосная модуляция (АМ и ОМ)

#### (Тема 9)

Процесс управления колебаниями радиочастоты с помощью колебаний низкой частоты называется модуляцией. Модуляция осуществляется с помощью устройства, называемого модулятором. На один вход модулятора подается напряжение радиочастоты, а на второй – напряжение низкой частоты. В процессе амплитудной модуляции (АМ) изменению подвергаются напряжения радиочастоты по закону передаваемой информации. Амплитудная модуляция может осуществляться путем изменения напряжения возбуждения – в этом случае происходит усиление модулированных колебаний. Амплитудную модуляцию изменением напряжения смещения называют в транзисторных модуляторах базовой, а модуляцию изменением напряжения питания – коллекторной.

В последние годы получила распространение комбинированная амплитудная модуляция, которая осуществляется при одновременном изменении напряжения возбуждения и питания. Статическими модуляционными характеристиками при амплитудной модуляции называют зависимости постоянной составляющей и первой гармоники коллекторного (выходного) тока от модулирующего фактора (напряжений возбуждения, смещения или питания). Зависимость индекса (глубины) модуляции от амплитуды модулирующего сигнала называется динамической характеристикой. Эти характеристики определяют искажения сигнала при модуляции. Достоинствами амплитудной модуляции является узкая полоса, занимаемая модулированным сигналом, а недостатком – низкая помехоустойчивость.

Поскольку спектр амплитудно-модулированного сигнала состоит из нижней и верхней боковых полос, в которых содержится идентичная информация, и несущего колебания, не содержащего информации о модулирующем сигнале, на который приходится наибольшая мощность передатчика, то в современных передатчиках используют однополосную модуляцию. Однополосная модуляция осуществляется в маломощных каскадах с последующим усилением однополосного сигнала, для получения которого применяют метод балансной модуляции и фильтрации. В балансном модуляторе происходит подавление несущей, затем с помощью фильтра – подавление одной из боковых полос. Кроме фильтрового способа для получения однополосного сигнала используют фазофильтровый и фазокомпенсационный методы. При однополосной модуляции полезная информация заложена в амплитуде и фазе, поэтому иногда её называют амплитудно-фазовой модуляцией.

## **Контрольные вопросы**

1. Для какой цели предназначен модулятор? Что характеризует коэффициент модуляции?
2. Запишите аналитическое выражение, описывающее процесс амплитудной модуляции. Что такое «глубина модуляции»?
3. Нарисуйте временную и векторную диаграммы АМ-колебания.
4. Объясните спектральную диаграмму АМ-колебания. Какую полосу частот занимает АМ-колебание?
5. Запишите формулы для определения максимальной, минимальной и средней мощности АМ-колебания.
6. Нарисуйте СМХ при модуляции изменением напряжения смещения и возбуждения.
7. Почему нельзя получить  $m > 0.6$  при модуляции смещением?
8. Изобразите структурную схему АМ при модуляции изменением напряжения питания. Перечислите достоинства и недостатки этого вида АМ.
9. Что такое однополосная модуляция? Изобразите временную диаграмму однополосного сигнала при  $m = 1$  и подавленной несущей.
10. Сущность фильтрового способа получения сигнала при ОМ.
11. Энергетические показатели при ОМ. Перечислите схемы, повышающие эффективность передатчиков с ОМ.
12. Поясните работу балансного модулятора.
13. Какие виды излучений используются при однополосной модуляции?
14. Запишите аналитическое выражение для сигнала при однополосной модуляции.
15. Изобразите векторную диаграмму сигнала при однополосной модуляции.

### **3.11. Угловая и импульсная модуляция**

#### **(Тема 10)**

К угловой модуляции относятся фазовая и частотная модуляции. При фазовой модуляции (ФМ) изменяется фаза радиосигнала под действием модулирующего сигнала, а при частотной модуляции (ЧМ) – частота радиосигнала. Статическими характеристиками при фазовой и частотной модуляции соответственно являются зависимости фазового угла либо резонансной частоты контура от амплитуды модулирующего сигнала. Зависимости девиации частоты и индекса модуляции при фазовой и частотной модуляции от модулирующей частоты называются динамическими характеристиками.

Различают прямые и косвенные методы получения фазовой и частотной модуляции. При прямом методе в контур ГВВ, в который включен варикап, подают модулирующее напряжение, а на вход ГВВ поступает сигнал радиочастоты

ты. С выхода фазового модулятора снимается фазомодулированный сигнал. При прямом методе получения частотной модуляции в контур автогенератора, в который включен варикап, подают сигнал информации, а на выходе автогенератора образуется частотно-модулированное колебание.

Косвенным методом можно получить частотную модуляцию, если на фазовый модулятор через интегрирующую цепь подать напряжения модулирующего сигнала. Если на частотный модулятор через дифференцирующую цепь подать сигнал информации, то можно получить фазомодулированное колебание косвенным образом. Среди управителей частоты кроме варикапа можно назвать следующие: реактивные транзисторы, вариконды, ключевые диоды и т. д. Импульсную модуляцию (ИМ) применяют в радиолокации, радионавигации, радиорелейных линиях и т. п. При этом передатчик вырабатывает мощность за интервалы времени, разделенные паузами. Виды импульсной модуляции характеризуются скважностью – отношением периода повторения импульсов к длительности импульса. Импульсную модуляцию осуществляют главным образом путем включения на время импульса источника высокого напряжения, отключая его на время паузы. Эту процедуру выполняет модуляционное устройство, которое состоит из коммутатора, накопителя энергии, источника питания, генератора импульсов. В качестве коммутаторов используют электронные лампы, транзисторы либо тиратроны и тиристоры. Конденсаторы, катушки индуктивности, отрезки длинных линий или их эквиваленты применяются как накопители энергии.

### ***Контрольные вопросы***

1. Запишите аналитическое выражение для тока (напряжений) при угловой модуляции и проанализируйте его.
2. Запишите выражение для определения полосы пропускания, занимаемой сигналом при угловой модуляции.
3. Как связаны девиация частоты и индекс угловой модуляции с параметрами модулирующего сигнала при ЧМ и ФМ?
4. Как определить, какой вид модуляции (ЧМ или ФМ) осуществляется в передатчике?
5. Начертите и поясните статические и динамические характеристики при ФМ и ЧМ.
6. Как получить ЧМ-колебания, располагая фазовым модулятором ?
7. Перечислите виды управителей частоты. Что такое варикап ?
8. Изобразите принципиальную схему автогенератора с ЧМ-варикапом.
9. Приведите примеры схем фазовой модуляции.
10. В чем состоит сущность импульсной модуляции? Что такое скважность?
11. Изобразите спектр импульсно-модулированного колебания. Чему равна ширина главного лепестка?
12. Перечислите принципы построения модуляционного устройства.

13. Типы и принципы действия накопителей и коммутаторов модуляционных устройств.

14. Нарисуйте принципиальную электрическую схему модуляционного устройства с частичным разрядом накопителя.

15. Нарисуйте и объясните работу модуляционного устройства с полным разрядом накопителя.

### **3.12. Методы формирования манипулированных сигналов**

#### **(Тема 11)**

Модуляция при передаче дискретных сигналов называется манипуляцией. В зависимости от параметра несущего колебания, который подвергается изменению по закону передаваемого сообщения (первичный сигнал), различают следующие основные виды манипуляции: амплитудную, частотную, фазовую. При манипуляции закодированный первичный сигнал представляется в виде непрерывно чередующихся плюсов и минусов – посылок (токовых или бестоковых). Скорость передачи символов (символьная скорость) обратно пропорциональна длительности символов в цифровом сигнале и измеряется в бодах. Скорость передачи информации (битовая скорость) пропорциональна длительности символов. Для двоичного (бинарного) сигнала символьная и битовая скорости совпадают.

Полоса частот, занимаемая цифровым сигналом, определяется расстоянием от нулевой частоты до первого нуля спектральной плотности мощности сигнала и зависит от скорости передачи символов, но не от скорости передачи информации.

При амплитудной манипуляции один электрический сигнал кода соответствует излучению полной энергии передатчика – посылке, другой сигнал – отсутствию этого излучения: паузе. В чистом виде амплитудная манипуляция в цифровой радиосвязи применяется редко из-за низкой помехоустойчивости.

При частотной манипуляции токовой посылке соответствует работа передатчика на одной частоте, а бестоковой – работа на другой частоте. Разность частот называется частотным сдвигом, разносом частот или дискретом частоты. Половина частотного сдвига есть девиация частоты при бинарной частотной манипуляции.

При фазовой манипуляции токовым посылкам и паузам соответствуют колебания, различающиеся по фазе на  $180^\circ$ . Альтернативной формой бинарной фазовой манипуляции является относительная (дифференциальная) фазовая манипуляция.

На практике широко используются как многоуровневые системы с линейной модуляцией, так и многопозиционные системы с нелинейной модуляцией. Среди них 4-уровневая фазовая манипуляция, 16-уровневая квадратурная амплитудная манипуляция. При использовании таких видов манипуляции су-

щественно уменьшается полоса, занимаемая цифровым сигналом. При графическом представлении сигналов с квадратурной манипуляцией вместо понятия «векторная диаграмма» используются термины: «сигнальная конструкция», «пространственная диаграмма», «созвездие». На практике используются «созвездия», содержащие от четырех точек до нескольких тысяч.

### **Контрольные вопросы**

1. Что понимается под скоростью манипуляции? В чем состоит различие битовой и символьной скоростей?
2. Дайте определение основной частоте манипуляции. Как определяется полоса, занимаемая сигналом манипуляции?
3. Изобразите временные диаграммы сигнала при амплитудной манипуляции.
4. Запишите аналитическое выражение сигнала при амплитудной манипуляции и нарисуйте спектр сигнала.
5. Запишите аналитическое выражение сигнала при частотной манипуляции.
6. Что такое частотный сдвиг и девиация частоты при частотной манипуляции?
7. Нарисуйте схему частотного манипулятора.
8. Чем отличается дифференциальная (DPSK) и относительная фазовая манипуляция  $ОФМ_{n-2}$  от  $ФМ_n$ ? Почему на практике большее распространение получила  $ОФМ$ ?
9. Нарисуйте схему балансного модулятора.
10. Почему бинарная амплитудная манипуляция получила меньшее распространение, чем  $ЧМ_{n-2}$  и  $ФМ_{n-2}$ ?
11. В чем сущность многоуровневой манипуляции?
12. Как осуществляется квадратурная фазовая манипуляция (QPSK)? Чему равна ширина спектра при  $ОФМ_{n-2}$  и  $ОФМ_{n-4}$ ?
13. Изобразите пространственную диаграмму («созвездие») для выходного сигнала при  $ОФМ_{n-4}$  (QPSK).
14. Перечислите принципы построения и изобразите пространственную диаграмму сигнала при КАМ-16.
15. Как осуществляется квадратурная амплитудная манипуляция КАМ-16?

### **3.13. Основные характеристики приемных устройств**

#### **(Тема 12)**

Радиоприемным называется устройство, которое улавливает, усиливает, преобразовывает радиосигналы и извлекает из них информацию. Для выделения полезного сигнала необходимо использовать все возможные виды различия между другими сигналами и помехами: по частоте, амплитуде, фазе, направлению прихода радиоволны и т. д. Наибольшее различие сигналов и помех – по

частоте. Поэтому во всех приемниках применяется частотная селекция. Эта селекция осуществляется с помощью резонансных систем, настроенных на несущую частоту радиосигнала, т. е. на входе приемника. Должен быть, как минимум, одиночный колебательный контур, амплитудно-частотную характеристику (резонансная кривая) которого определяет зависимость выходного напряжения от частоты при постоянной амплитуде напряжения на входе. Структурные схемы приемников делятся на две основные группы: прямого усиления и супергетеродинные. Несмотря на простоту конструкции приемники прямого усиления не получили широкого распространения из-за непостоянства полосы пропускания, избирательности и усиления в диапазоне частот, а также трудностей получения необходимого коэффициента усиления на метровых и более коротких волнах. Недостатком супергетеродинных приемников являются дополнительные каналы приема и комбинационные свисты на некоторых частотах сигналов.

Важнейшими характеристиками приемников являются чувствительность и избирательность. Способность приемника принимать слабые сигналы называется чувствительностью. Количественно чувствительность приемника равна минимальной ЭДС или номинальной мощности в антенне, при которых мощность сигнала на выходе (на входе детектора) равна заданной величине при определенном отношении сигнала к шуму. Чем меньше ЭДС или мощность на входе, тем выше чувствительность.

Избирательность – это способность приемника отделять полезный сигнал от помехового по признакам, свойственным радиосигналу. Различают односигнальную и реальную избирательность. Односигнальная избирательность определяется амплитудно-частотной характеристикой фильтров радиоприемника без учета нелинейных явлений при действии на входе радиотракта только одного сигнала. Эту избирательность может характеризовать ослабление помех по соседнему, зеркальному, комбинационным каналам приема. Полезный сигнал часто принимается на фоне нескольких значительных по уровню внеполосных помех. При этом в радиотракте возникают ухудшающие избирательность эффекты: перекрестная модуляция, блокирование, интермодуляция. Для оценки способности приемника выделять полезный сигнал при одновременном действии нескольких помех используется реальная избирательность. Увеличить реальную избирательность можно двумя путями: повышением избирательности входной цепи и повышением линейности усилительного радиотракта.

### ***Контрольные вопросы***

1. Дайте определение радиоприёмного устройства. В чем состоит сущность частотной селекции? Что такое добротность колебательного контура?
2. Перечислите функции радиоприёмного устройства.
3. Составьте структурную схему РПрУ и дайте характеристику каждому блоку.
4. По каким признакам классифицируются РПрУ?

5. В чём состоит сущность супергетеродинного радиоприема?
6. Перечислите основные характеристики РПрУ.
7. Что такое чувствительность РПрУ? Как она определяется в зависимости от частоты?
8. Что такое избирательность по соседнему каналу, по зеркальному каналу?
9. Какие каскады оказывают наибольшее влияние на избирательность по зеркальному каналу?
10. Что такое одиосигнальная избирательность?
11. Сформируйте понятие реальная (многосигнальная) избирательность.
12. В чем состоит сущность эффекта «перекрестная модуляция»?
13. Каким образом влияет блокирование на избирательность приемника?
14. Как производится количественная оценка эффекта интермодуляции приемника?
15. Что такое коэффициент шума и шумовая температура радиоприемника? Влияние шума на чувствительность приемника.

### **3.14. Входные цепи радиоприемника**

#### **(Тема 13)**

Входная цепь – это часть приемника, соединяющая антенну с первым каскадом. Входная цепь позволяет из всех сигналов, принятых антенной, выделить полезный сигнал за счет своих избирательных свойств и представляет собой пассивный четырехполюсник, включающий в себя резонансную систему и элементы связи.

Бытовые (вещательные) приемники работают в заданном диапазоне частот, и их антенна заранее не настроена ни на один передатчик. Характер выходного сопротивления такой антенны комплексный, либо активно-емкостный, либо активно-индуктивный (чаще всего активная составляющая мала). Такая антенна называется ненастроенной. В профессиональных приемниках антенна настроена на частоту передатчика, ее сопротивление активное. Эта антенна называется настроенной. При работе с настроенными антеннами основным показателем входной цепи является максимальный коэффициент передачи и коэффициент шума. Основными показателями входной цепи при работе с ненастроенными антеннами является коэффициент передачи, избирательность по зеркальному и прямому каналам. Так как ненастроенная антенна вносит в контур входной цепи значительную реактивность, то для уменьшения этой составляющей применяют реактивные элементы связи: емкость или индуктивность. По числу резонансных контуров входная цепь бывает одноконтурной, двухконтурной или многоконтурной. По способу настройки входные цепи могут быть настроены на одну частоту, иметь плавную или дискретную настройку. Входные цепи по способу связи с антенной подразделяются на емкостные, индуктивные, трансформаторные, автотрансформаторные или комбинированные.

С целью упрощения определения коэффициента передачи входной цепи последнюю рассматривают в виде структурной схемы, состоящей из трех кас-

кадов: цепи связи с антенной, фильтра (контура), цепи связи с усилительным элементом. Тогда коэффициент передачи определяют как произведение коэффициентов передачи трех каскадов. При емкостной связи с антенной зависимость коэффициента передачи от частоты квадратична, что является существенным недостатком схемы при ее простоте. При индуктивной связи входной цепи с антенной коэффициент передачи практически не зависит от частоты, но схема сложнее.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое входная цепь (ВЦ) радиоприемника? Что такое нагруженная добротность колебательной системы?
2. Изобразите структурную схему входной цепи.
3. Перечислите основные характеристики входной цепи.
4. Нарисуйте эквивалентную схему антенны.
5. Что понимается под настроенной и ненастроенной антеннами?
6. Изобразите входные схемы (принципиальные электрические).
7. Почему не применяется простейшая входная цепь?
8. Какие бывают входные цепи по числу используемых контуров? Приведите принципиальную электрическую схему двухконтурной цепи.
9. Составьте эквивалентную схему ВЦ с емкостной связью с антенной.
10. Каким образом определяется коэффициент передачи? Запишите выражения для коэффициентов передачи элементов входной цепи.
11. Сформулируйте теорему об эквивалентном генераторе ЭДС.
12. Запишите выражения для коэффициента передачи входной цепи с емкостной связью с антенной.
13. Что такое коэффициент затухания контура? Как он определяется на уровне 0,707 от значения резонансного напряжения.
14. Запишите выражения для коэффициента передачи входной цепи с индуктивной связью с антенной.
15. Сформулируйте достоинства и недостатки входных цепей с индуктивной связью антенной.

### **3.15. Особенности входных цепей различных частотных диапазонов**

#### **(Тема 14)**

Процедура нахождения коэффициента передачи входной цепи показала, что из всех каскадов, составляющих входную цепь, основное влияние на коэффициент передачи оказывает фильтр (колебательный контур). Чем выше добротность контура, тем выше коэффициент передачи.

Амплитудно-частотная, фазочастотная характеристики и избирательность входной цепи определяются в основном амплитудно-частотной, фазочастотной характеристиками и селективностью фильтра и зависят от эквивалентного затухания контура, которое определяется его конструктивными параметрами и вносимыми затуханиями со стороны антенной цепи и со стороны последующего каскада. Максимальный коэффициент передачи входной цепи обеспечивается при оптимальной связи антенной цепи и входа усилительного каскада с контуром, при которой вносимое в контур затухание из антенной цепи равно вносимому затуханию от усилительного каскада. Для получения максимального коэффициента передачи контур должен иметь малые потери. На избирательность входной цепи по соседнему каналу влияет в основном только избирательность контура. Полоса пропускания входной цепи также определяется в основном фильтром.

На частотах ниже 100 МГц контур входной цепи выполняется на сосредоточенных  $LC$ -элементах. В диапазоне волн короче 1 м в качестве колебательного контура входной цепи используются цепи с распределенными параметрами, в диапазоне дециметровых длин волн – отрезки коаксиальных и полосковых линий. Применение полосковых линий позволяет выполнить узлы и резонансные цепи приемника в едином технологическом цикле по интегральной технологии. В диапазоне сантиметровых и более коротких длин волн наряду с полосковыми линиями в качестве избирательных систем входных цепей применяются объемные резонаторы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое резонансная характеристика контура?
  2. Составьте эквивалентную схему колебательной системы входной цепи.
- Что такое конструктивные и эквивалентные параметры контура?
3. Запишите формулу, определяющую полное сопротивление контура.
  4. Что такое волновое сопротивление контура?
  5. Как определяется добротность последовательного контура, параллельного контура? Что такое затухание контура?
  6. Запишите уравнение резонансной характеристики контура и изобразите её графически.
  7. Каким выражением определяется полоса частот входной цепи?
  8. Запишите формулу для определения селективности входной цепи.
  9. От чего зависит селективность входной цепи по соседнему каналу, по зеркальному каналу?
  10. Как объяснить максимальный коэффициент передачи входной цепи?
  11. Где применяются входные цепи с емкостной связью с антенной?
  12. Приведите принципиальную электрическую схему входной цепи для частоты выше 100 МГц.
  13. Нарисуйте схему входной цепи на отрезках коаксиальной линии.

14. Приведите выражение, определяющее входное сопротивление коаксиальной линии.

15. Перечислите преимущества входных цепей на полосковых линиях.

### 3.16. Резонансные усилители (РУ)

#### (Тема 15)

Устройство, служащее для повышения коэффициента усиления в радиоприёмнике и для получения необходимой частотной избирательности, называется резонансным усилителем (РУ). Каскад РУ состоит из активного элемента и резонансной нагрузки. Частотной характеристикой каскада является резонансная кривая контура, который шунтируется выходным сопротивлением активного элемента каскада и входным сопротивлением усилительного элемента следующего каскада. Основными характеристиками резонансного усилителя являются: резонансный коэффициент усиления, избирательность по зеркальному каналу, диапазон рабочих частот, коэффициент шума, линейные и нелинейные искажения, динамический диапазон. Для определения модуля коэффициента усиления РУ, его амплитудной и фазочастотной характеристик обычно на основе электрической принципиальной схемы составляется эквивалентная схема усилительного каскада. Модуль резонансного коэффициента усиления РУ прямо пропорционален крутизне активного элемента, коэффициентам включения контура как со стороны АЭ РУ, так и со стороны следующего каскада и обратно пропорционален эквивалентной проводимости контура. В том случае, когда эквивалентное затухание контура мало изменяется внутри рассматриваемого поддиапазона, резонансный коэффициент усиления и полоса пропускания возрастают с повышением частоты и минимальны на минимальной частоте поддиапазона. При переходе от одного поддиапазона к другому в сторону повышения частоты при постоянных коэффициентах включения уменьшаются резонансное сопротивление и соответственно коэффициент усиления каскада. Соответствующим изменением значений коэффициентов включения в более длинноволновых поддиапазонах за счёт уменьшения коэффициентов усиления во всех поддиапазонах можно получить одинаковые значения коэффициента усиления в поддиапазонах, но неравномерность коэффициента усиления остаётся. В некоторых приёмниках применяются многокаскадные усилители, состоящие из нескольких одноконтурных каскадов.

#### *Контрольные вопросы*

1. Назначение усилительного каскада. Какие активные элементы используются в РУ?
2. Нарисуйте обобщенную схему усилительного каскада (УК).

3. Перечислите основные характеристики усилительного каскада.
4. Нарисуйте принципиальную схему усилительного каскада.
5. Каким образом обеспечивается стабилизация режима в УК?
6. Изобразите эквивалентную схему усилительного каскада.
7. Объясните принцип пересчета сопротивлений к контуру.
8. Каким образом пересчитываются реактивные элементы к контуру?
9. Как определяется неравномерность коэффициента усиления в поддиапозоне?
10. Запишите выражение для модуля коэффициента усиления.
11. Что такое обобщенная расстройка в области больших расстроек, малых расстроек?
12. Запишите уравнение частотной и фазовой характеристик усилительного каскада.
13. Нарисуйте частотные и фазовые характеристики каскада.
14. Приведите выражение для нормированного коэффициента усиления многокаскадного усилителя.
15. Как объяснить неизменную полосу многоканального усилителя? Перечислите способы расширения полосы пропускания такого усилителя.

### **3.17. Характеристики и особенности построения РУ**

#### **(Тема 16)**

Избирательность резонансного усилителя зависит от типа избирательной системы. Форма результирующей резонансной кривой зависит от числа контуров и величины эквивалентного затухания. Если величина избирательности не удовлетворяет заданному значению, то увеличивают число каскадов или применяют более сложные избирательные системы, например фильтры сосредоточенной селекции. При этом изменяется форма результирующей кривой. Оценочной характеристикой является коэффициент прямоугольности.

Полоса пропускания приёмника зависит от частоты принимаемого сигнала. Только супергетеродинная схема приёмника уменьшает значение несущей частоты, что позволяет создавать узкую полосу пропускания. Избирательность по соседнему каналу и полоса пропускания многокаскадного усилителя промежуточной частоты взаимно связаны. Источниками шумов в транзисторах в диапазоне радиочастот являются дробовой шум коллекторного и эмиттерного переходов; шум перераспределения; тепловой шум базы. Коэффициент шума усилителя зависит от частоты и шумовых параметров транзистора. Для его уменьшения необходимо выбирать малошумящие активные элементы. Так как коэффициент шума зависит от коэффициентов включения контура, то следует выбирать их такими, при которых шум минимален.

В метровом диапазоне широко применяются каскодные усилители, обеспечивающие устойчивое усиление. Каскодом называют схему, содержащую два каскада, в которой выход первого и вход второго каскадов соединены непосредственно. Каскодные схемы применяют в первых каскадах резонансных усилителей и усилителей промежуточной частоты. Они часто применяются в интегральных схемах. С ростом частоты вместо контуров с сосредоточенными параметрами используют резонансные цепи с распределёнными параметрами, в частности, полосковые резонансные линии, выполняемые по технологии печатного монтажа на поверхности диэлектрических пластин.

Для обеспечения избирательности по соседнему каналу применяют усилители промежуточной частоты, которые работают на фиксированной частоте и содержат несколько каскадов усиления. Существует два варианта построения усилителей промежуточной частоты: с распределённой и сосредоточенной селективностью.

### *Контрольные вопросы*

1. От чего зависит избирательность резонансного усилителя?
2. Запишите выражение для результирующей нормированной резонансной кривой.
3. Каким образом можно регулировать форму результирующей резонансной кривой?
4. Дайте определение избирательности по зеркальному каналу.
5. Запишите выражение, определяющее избирательность по соседнему каналу.
6. Перечислите меры, предпринимаемые в случае, если величина избирательности не удовлетворяют заданному значению.
7. Каким выражением определяется полоса пропускания РУ на уровне 0,707 нормированной резонансной кривой?
8. Запишите выражение, определяющее полосу пропускания в многокаскадном РУ.
9. Назовите источники шума в транзисторе.
10. Нарисуйте эквивалентную схему шумящего транзистора.
11. Запишите выражение для коэффициента шума РУ.
12. Изобразите зависимость коэффициента шума транзистора от частоты и объясните характерные особенности этой характеристики.
13. Нарисуйте принципиальную электрическую схему каскодного усилителя и поясните его работу.
14. Поясните особенности транзисторного усилителя дециметрового диапазона.
15. Нарисуйте принципиальную электрическую схему усилителя промежуточной частоты и назовите особенности построения ФСС.

### 3.18. Преобразователи частоты (ПЧ)

#### (Тема 17)

Преобразователи частоты (ПЧ) предназначены для переноса спектра из одной области в другую без изменения характера модуляции. Они являются частью супергетеродинного приёмника. Для преобразования частоты в приёмниках используются линейные цепи с периодически меняющимися параметрами. Схема ПЧ содержит: нелинейный элемент (смеситель), генератор и фильтр. Режим работы нелинейного элемента периодически меняется во времени под действием высокочастотного напряжения генератора. При строго квадратичной вольт-амперной характеристике (ВАХ) нелинейного элемента и косинусоидальном напряжении гетеродина крутизна нелинейного элемента (НЭ) также изменяется по косинусоидальному закону и содержит постоянную составляющую и первую гармонику. Если на входе смесителя действует очень малый по амплитуде сигнал, то на его выходе появятся три составляющие: колебание с частотой и фазой полезного сигнала, колебание с суммарной частотой (сигнал плюс генератор) и колебание с разностной частотой (генератор минус сигнал). Настраивая фильтр на колебание с разностной частотой, получим колебание промежуточной частоты без изменения закона модуляции.

Для нахождения характеристик ПЧ, таких, как коэффициент передачи, входные и выходные проводимости и т. д., шестиполусник, каким является смесительный элемент, заменяют четырёхполусником. Полученная схема замещения четырёхполусника в режиме преобразования частоты аналогична схеме замещения четырёхполусника в режиме усиления. Хотя она является формальной, так как справедлива для амплитуд токов и напряжений, но не отображает различия частот входного и выходного напряжений, схема позволяет определить основные характеристики ПЧ: коэффициент передачи прямого преобразования, коэффициент передачи обратного преобразования, внутреннюю проводимость преобразователя, входную проводимость преобразователя для частоты сигнала. Схема диодного ПЧ взаимная, поэтому параметры прямого и обратного преобразования равны между собой. Зная эквивалентные параметры диодного преобразователя, его расчёт производят по формулам усилителя, в которых усилительные параметры заменяют на преобразовательные.

#### *Контрольные вопросы*

1. Объясните назначение преобразователя частоты. Что такое параметрическая резистивная цепь?
2. Составьте структурную схему ПЧ. Какова функция смесителя в ПЧ? Роль фильтра в схеме?
3. Чем принципиально отличаются спектры токов в резистивном параметрическом и нелинейном двухполуснике?
4. Начертите графики изменения крутизны НЭ под действием постоян-

ного и гармонического напряжений.

5. Что такое дифференциальная крутизна вольт-амперной характеристики (ВАХ) смесителя?
6. Классификация преобразователей частоты.
7. Покажите аналитически, что закон модуляции при преобразовании частоты не изменяется.
8. Нарисуйте схему замещения четырехполюсника в режиме преобразователя частоты.
9. Запишите эквивалентные параметры ПЧ и дайте им физическое толкование.
10. Нарисуйте принципиальную эквивалентную схему ПЧ.
11. Зарисуйте диаграммы периодического изменения тока и крутизны в диодном преобразователе в предположении, что диод имеет идеальную линейную характеристику.
12. Что такое «угол отсечки» в ПЧ? Приведите примеры.
13. Для чего необходимо знание значения постоянного тока в диодном СВЧ-преобразователе?
14. Представьте в аналитической форме эквивалентные параметры диодного преобразователя частоты.
15. Каким образом производится расчет ПЧ?

### 3.19. Транзисторные и диодные преобразователи

#### (Тема 18)

Преобразование частоты возможно на любой гармонике крутизны:

$$f_{\text{пр}} = Kf_{\text{г}} + f_{\text{с}}; f_{\text{пр}} = Kf_{\text{г}} - f_{\text{с}} \text{ при } Kf_{\text{г}} > f_{\text{с}};$$

$$f_{\text{пр}} = f_{\text{с}} - Kf_{\text{г}} \text{ при } Kf_{\text{г}} < f_{\text{с}}$$

где  $f_{\text{пр}}$ ,  $f_{\text{г}}$ ,  $f_{\text{с}}$  – соответственно частоты: промежуточная, гетеродинная, сигнала.

$K$  – номер гармоники крутизны.

Из этих значений используется только одно. Если при

$$K = 1 \quad f_{\text{пр}} = |f_{\text{г}} - f_{\text{с}}|,$$

то преобразование частоты называется простым. Если при

$$K > 1 \quad f_{\text{пр}} = |Kf_{\text{г}} - f_{\text{с}}|,$$

то преобразование частоты называют комбинационным; оно возможно из-за появления гармоник крутизны. При  $K = 0$  преобразование частоты не происходит и преобразователь частоты работает как обычный усилитель сигнала. Преобразование частоты в супергетеродинном приёмнике приводит к образованию

ряда каналов приёма. Из всех каналов только один является полезным, называемым основным. За основной может быть принят любой канал, за исключением канала при  $K = 0$ , так как в нём не происходит преобразования частоты. Если преобразование частоты простое ( $K = 1$ ), то за основной принимают канал с частотой  $f_2 = f_{\text{пр}} = f_r - f_c$  или  $f_3 = f_c + 2f_{\text{пр}}$ . Обычно основным выбирают канал с частотой  $f_2$ , остальные каналы называют побочными (паразитными). Канал, симметричный относительно основного (для канала с частотой  $f_3$  – это канал с частотой  $f_2$ ), называют зеркальным. Принятый антенной сигнал с зеркальной частотой должен быть подавлен во входной цепи или каскадах резонансного усиления, иначе, поступив на вход ПЧ, он вызовет катастрофические искажения полезного сигнала.

Транзисторные ПЧ выполняются на биполярных и полевых транзисторах. В ПЧ на биполярном транзисторе источник сигнала включается в базовую цепь, а гетеродин – в цепь эмиттера. В качестве фильтра часто применяют фильтр сосредоточенной селекции. При использовании двухзатворных полевых транзисторов в качестве АЭ в ПЧ достигается хорошая развязка цепей сигнала и гетеродина. В современных приёмниках широко применяются балансные диодные преобразователи частоты, напряжение на выходе которых в два раза больше, чем в обычных диодных преобразователях. В настоящее время они выполняются на базе интегральных микросхем.

Детектором называется устройство, служащее для создания напряжения, изменяющегося в соответствии с законом модуляции одного из параметров. Различают два режима амплитудного детектирования: линейный и квадратичный. В схеме линейного амплитудного детектора диод включают последовательно с низкочастотным фильтром. Напряжение на выходе определяется падением напряжения на резисторе нагрузки за счёт постоянной составляющей тока. Коэффициент передачи амплитудного детектора зависит от угла отсечки, который зависит от произведения крутизны диода на сопротивление нагрузки. Входное сопротивление диодного детектора равно половине сопротивления нагрузки.

### **Контрольные вопросы**

1. С помощью зависимости промежуточной частоты от частоты сигнала найдите «зеркальные» частоты при  $K = 1, 2$ .
2. В чём «смысловая нагрузка» частотной характеристики ПЧ?
3. Почему помеха на зеркальной частоте при попадании в ПЧ представляет опасность для радиоприёмника?
4. Нарисуйте эквивалентную схему транзисторного ПЧ.
5. Почему нежелательно включать в одну цепь источник сигнала и гетеродина?
6. Изобразите принципиальную электрическую схему ПЧ на биполярном

транзисторе.

7. В чем достоинство ПЧ на двухзатворном полевом транзисторе? Нарисуйте принципиальную электрическую схему ПЧ.

8. Изобразите эквивалентную схему диодного балансного ПЧ.

9. Перечислите преимущества балансного ПЧ по сравнению с ПЧ на одном диоде.

10. Что представляют собой современный преобразователь частоты?

11. Что такое детектор? Его основные характеристики.

12. Классификация детекторов. Дайте им краткую характеристику.

13. В чем заключается процесс линейного детектирования АМ-сигнала?

14. Нарисуйте принципиальную электрическую схему АМ-детектора. Запишите неравенство, связывающие внутреннее сопротивление диода  $R_i$  и низкочастотный фильтр  $R_H C_H$ .

15. Объясните диаграмму токов и напряжений в амплитудном детекторе.

### 3.20. Детекторы

#### (Тема 19)

При малых амплитудах модулированного сигнала характеристика нелинейного элемента наиболее точно аппроксимируется полиномом второй степени. После подстановки в полином выражения амплитудно-модулированного сигнала и несложной математической обработки можно получить выражение, из которого следует, что полезный эффект детектирования пропорционален квадрату амплитуды амплитудно-модулированного сигнала, а высокочастотные составляющие отфильтровываются низкочастотной цепью. Поэтому такое детектирование называется квадратичным. Чтобы уменьшить нелинейные искажения, вносимые детектором, необходимо уменьшать глубину модуляции передаваемого сигнала. Следует отметить, что сегодня широко применяются детекторы на операционных усилителях (ОУ), где одновременно осуществляется усиление полезного сигнала.

Для детектирования радиоимпульсов применяются последовательные диодные детекторы. При этом происходит искажение фронта и спада импульса. Так как время установления протектированного импульса значительно меньше времени его спада, то искажение импульса оценивают по времени его спада. Для детектирования импульсов постоянного тока (видеоимпульсов) используют пиковый детектор, напряжение на выходе которого пропорционально пиковому напряжению видеоимпульсов. При высокой скважности видеоимпульсов их детектирование осуществляют с помощью параллельного диодного детектора. При детектировании однополосных сигналов применяют синхронный детектор, в котором под действием гетеродина периодически меняется крутизна преобразовательного элемента, т. е. принцип действия синхронного амплитуд-

ного детектора во многом аналогичен принципу работы преобразователя частоты (только в последнем всегда выполняется неравенство  $f_s \neq f_c$ ).

При детектировании сигналов с угловой модуляцией они предварительно преобразуются в колебания с неглубокой амплитудной модуляцией, а затем детектируются амплитудным детектором. Подобное преобразование необходимо потому, что нелинейные элементы реагируют на изменение только амплитуды, а не частоты или фазы.

Частотным детектором (ЧД) называется устройство, служащее для получения напряжения, изменяющегося в соответствии с законом изменения частоты входного сигнала. Частотное детектирование осуществляется в устройствах, соединяющих в себе линейные и безынерционные нелинейные элементы. Принцип частотного детектирования состоит в преобразовании частотно-модулированного колебания в линейной системе в колебание с другим видом модуляции с последующим детектированием преобразованного колебания безынерционной нелинейной цепью. Преобразование частотно-модулированного колебания может осуществляться в резонансном контуре на наклонном участке его АЧХ, при этом возникает сопутствующая модуляция, при которой закон изменения амплитуды напряжения на контуре соответствует закону изменения частоты. Распространенной является схема частотного детектора со связанными контурами, принцип работы которой поясняется с помощью векторных диаграмм. Современные частотные детекторы выполняют на аналоговых интегральных умножителях.

Фазовое детектирование осуществляется с помощью параметрической цепи, в которой источник опорного напряжения должен быть синхронным с источником сигнала.

Однотактный диодный фазовый детектор (ФД) можно рассматривать как параметрическую цепь либо как цепь с амплитудным детектором, на входе которого действует суммарное напряжение входного сигнала и опорного колебания. Форма характеристики детектирования фазового детектора зависит от соотношения амплитуд сигнала и опорного генератора. Балансный фазовый детектор – это сочетание двух однотактных фазовых детекторов, каждый из которых работает на свою нагрузку и создаёт на них взаимно противоположные напряжения; разность этих напряжений определяет продетектированное напряжение на выходе балансного детектора. Характеристика балансного детектора по сравнению с однотактным более симметрична и проходит через нуль. В фазовом детекторе на логических дискретных элементах фазомодулированное колебание преобразуется в импульсное напряжение, скважность которого зависит от фазы входного сигнала. Импульсный фазовый детектор реализуется в интегральном исполнении.

## **Контрольные вопросы**

1. Перечислите виды детекторов. Приведите их схемы.
2. Опишите схему линейного АМ-детектора. От чего зависит его коэффициент передачи?
3. В чем состоит отличие линейного и квадратичного детектирования АМ-сигнала?
4. Составьте схему АМ-детектора на ОУ.
5. Составьте схему детектора радиоимпульсов и объясните принцип его работы.
6. Что такое пиковый детектор? Для чего он предназначен?
7. Составьте схему синхронного детектора.
8. Поясните принцип работы детектора для детектирования однополосных сигналов.
9. На чем основан принцип детектирования ЧМ-сигнала?
10. Составьте схему ЧД со связанными контурами.
11. Объясните работу ЧД со связанными контурами с помощью векторных диаграмм.
12. Нарисуйте характеристику ЧД со связанными контурами. Каковы преимущества этого типа ЧД?
13. Составьте схему ЧМ-детектора на аналоговых перемножителях и перечислите его достоинства.
14. Для каких целей в фазовом детекторе используется источник опорного напряжения?
15. Поясните работу ФД с помощью векторной диаграммы.

### **3.21. Регулировки в радиоприемниках**

#### **(Тема 20)**

Для получения наилучшего качества приёма приходится регулировать ряд его показателей: коэффициент усиления, частоту настройки, полосу пропускания и др. Для этих целей используют регуляторы. Регулировка бывает ручной и автоматической. Ручная регулировка служит для установки исходных показателей. Выбранные показатели радиоприёмника поддерживает автоматическая регулировка. В современных радиоприёмниках для регулировок, управления и контроля используют микропроцессоры, а также предусматривается дистанционное управление.

Принцип действия автоматической регулировки усиления (АРУ) основан на автоматическом изменении коэффициента усиления отдельных каскадов усилителей приёмника при изменении уровня входного сигнала. Главный элемент

системы – амплитудный детектор АРУ, который подключается ко входу или выходу усилителя.

Автоматическая подстройка частоты (АПЧ) применяется для предотвращения самопроизвольной расстройки приёмника с приёма выбранной станции, обусловленной нестабильностью частот передатчика и гетеродина приёмника.

Системы цифровой АРУ и цифровой АПЧ основаны на цифровой реализации известных аналоговых структурных схем. Как правило, отдельные узлы систем, а зачастую и вся система выполняются на интегральной основе.

Регулировка полосы пропускания в бытовых приёмниках осуществляется в последетекторной части, а в профессиональных – в тракте промежуточной частоты. Регулировка выполняется как плавно, так и дискретно. Регулировка полосы в последетекторной части приёмника производится изменением АЧХ в области верхних и нижних частот с помощью как пассивных регуляторов тембра, так и активных регуляторов, выполняемых на основе операционного усилителя.

Для дистанционного управления используются ультразвуковые и инфракрасные колебания. По экологическим соображениям и быстродействию наибольшее применение нашли инфракрасные линии управления с импульсно-кодовой модуляцией.

Перспективы развития техники радиоприёма безусловно связаны с цифровыми системами обработки информации.

### ***Контрольные вопросы***

1. В чем состоит назначения регулировок РПрУ? Виды регулировок.
2. Для каких целей в схему приемника вводится АРУ?
3. Назовите основные элементы АРУ.
4. Нарисуйте схему цифровой системы АРУ.
5. С какой целью в РПрУ выводится АПЧ?
6. Перечислите основные элементы цепи АПЧ.
7. Изобразите схему цифровой фазовой АПЧ.
8. С какой целью осуществляется в приемниках регулировка полосы пропускания?
9. Изобразите схему регулировки полосы пропускания в последетекторной части РПрУ.
10. Приведите структурную схему дистанционного управления РПрУ.
11. Перечислите основные каскады цифрового радиоприемника. В чем состоит их назначение?
12. Нарисуйте характеристики пассивного регулятора тембра.
13. Приведите схему активного регулятора тембра и объясните принцип его работы.
14. Почему в устройствах дистанционного управления используются инфракрасные колебания?

15. Объясните назначения блока ЦАП в структурной схеме цифрового приемника.

### 3.22. Помехоустойчивость в радиоприемниках

#### (Тема 21)

Способность приёмника обеспечивать приём сообщений в условиях действий помех называется помехоустойчивостью. Для оценки несоответствия воспроизводимого приёмником напряжения принятому сообщению вводится понятие верности приёма, являющегося количественной мерой помехоустойчивости. Максимально возможная верность приёма при заданных условиях определяет потенциальную помехоустойчивость приёма сообщений. Она показывает, до какого предела можно улучшить помехоустойчивость устройства. Помехоустойчивость изготовленного приёмника называется реальной. Реальная помехоустойчивость всегда хуже потенциальной.

Большинство помех, действующих в реальном канале связи, можно представить с помощью четырёх моделей: сосредоточенной, импульсной, квазиимпульсной, флуктуационной. Под сосредоточенной понимают помеху, частотный спектр которой находится в узкой полосе частот. Импульсные помехи представляют собой непериодическую последовательность одиночных импульсов. Квазиимпульсные помехи характеризуются тем, что нестационарные процессы от отдельных импульсов частично накладываются друг на друга. Под флуктуационной помехой обычно понимают непрерывный во времени случайный процесс с нормальным распределением мгновенных значений и нулевым средним значением. Методы борьбы с помехами в приёмниках основаны на различии характеристик сигнала и помехи: по частоте, фазе, амплитуде, направлении прихода сигнала и помехи и т. д. Для подавления помех используются такие устройства, как синхронный амплитудный детектор, система широкая полоса – ограничитель – узкая полоса (ШОУ), ограничители амплитуды по максимуму и минимуму, система компенсационного подавления помех, системы корреляционного и автокорреляционного приёма и т. д. Для уменьшения нежелательных нелинейных эффектов применяют различные способы повышения линейности радиотрактов.

Количественная оценка пропускной способности канала связи с шумами производится по полученному Х. Шенноном аналитическому соотношению, из которого видно, что повысить скорость передачи информации можно либо за счёт расширения полосы пропускания, либо за счёт повышения отношения сигнал/шум.

## *Контрольные вопросы*

1. Что такое помехоустойчивость радиоприёмника?
2. Каким образом количественно оценивается верность приёмника?
3. Чем различаются реальная и потенциальная помехоустойчивость?
4. Перечислите принятые модели помех. Что такое импульсная и квази-импульсная помеха?
5. Дайте определение аддитивной и мультипликативной помехи.
6. Для каких целей используется синхронный детектор? Приведите пример.
7. Объясните эффект «блокирования» в радиоприёмнике.
8. Чем вызваны такие нелинейные эффекты, как интермодуляция и перекрёстная модуляция?
9. Объясните работу системы ШОУ.
10. Составьте принципиальные электрические схемы ограничителей по «максимуму» и по «минимуму». Объясните их работу.
11. Составьте структурную схему системы компенсационного подавления помех.
12. Нарисуйте схему, реализующую автокорреляционный приём.
13. Покажите аналитически, каким образом осуществляется подавление флуктуационной помехи.
14. Выведите формулу оценки пропускной способности канала связи с шумами.
15. От чего зависит пропускная способность канала связи?

### **3.23. Структурные схемы систем связи с амплитудной и частотной модуляцией**

#### **(Тема 22)**

Основными областями применения радиосистем связи с амплитудной модуляцией являются радиовещание на длинных, средних и коротких волнах, телевидение в метровом и дециметровом диапазонах. Для целей радиосвязи АМ применяется в авиации в диапазоне 118...136 МГц (ближняя радиосвязь). Исследуется использование варианта однополосной модуляции, совместимой с используемой в настоящее время и сохраняющейся на ближайшее будущее амплитудной модуляцией. Угловая модуляция применяется в системах профессиональной радиосвязи различных диапазонов частот, в радиорелейной связи прямой видимости, тропосферной и космической связи и других системах.

Приемопередающие устройства различного назначения классифицируются по следующим признакам: по диапазону частот, способу транспортировки, назначению, числу одновременно принимаемых частот, виду модуляции, виду принимаемых сигналов и т. д.

В многоканальных системах сигнал модулируется дважды: сначала формируется сигнал на нескольких поднесущих, а затем промодулированные поднесущие модулируют несущую.

Многоканальные радиоприёмные устройства выполняются с частотным либо временным разделением каналов.

Воспроизведение стереофонического звучания является одним из направлений повышения качества радиовещания, особенно это относится к музыкальным программам. Стереосигнал образуется из низкочастотных сигналов, создаваемых отдельными разнесёнными в пространстве микрофонами: левым и правым. Объединив эти два микрофонных канала, можно создать стереосигнал, который, произведя модуляцию несущего передатчика по частоте, может быть передан потребителю по радиолинии. При этом, однако, не достигается совместимости стереофонической системы радиовещания с монофоническими приёмниками, которые будут находиться в эксплуатации ещё долгое время. Задача совместимости решается с помощью принципиально нового метода модуляции радиосигналов – полярной модуляции. Существует несколько способов формирования полярно-модулированного сигнала (ПМК), но наиболее эффективным и простым представляется создание ПМК с помощью дифференциальной системы. В передатчиках в качестве модулирующего сигнала используется комплексный стереосигнал (КСС), который отличается от ПМК тем, что спектр ПМК подвергается дополнительной коррекции. К передатчикам с КСС предъявляются повышенные требования по стабильности частоты, хотя по структуре их схемы практически ничем не отличаются от обычных ЧМ-передатчиков. В приемнике после детектирования в ЧМ-детекторе КСС поступает в стереодемодулятор для разделения спектра КСС на сигналы правого и левого микрофонов. Далее происходит раздельное усиление этих сигналов и их воспроизведение в соответствующих акустических системах. В стереодемодуляторе осуществляются также преобразования КСС в ПМК, детектирование ПМК и коррекция предискажений. Структурная схема приемника однополосных сигналов существенно отличается от схем «классических» приемников. Особые требования предъявляются к стабильности частоты несущего колебания. Для детектирования однополосных сигналов применяют синхронный детектор.

### ***Контрольные вопросы***

1. Перечислите области применения приемопередающих комплексов с АМ и ЧМ.
2. Классификация радиосистем с АМ и ЧМ.

3. Нарисуйте структурную схему АМ-передатчика и объясните принцип его работы.
4. Назовите достоинства и недостатки передатчиков с ЧМ и ФМ.
5. Нарисуйте структурную схему супергетеродинного приемника АМ-ЧМ-сигналов и объясните принцип его работы.
6. По какому принципу работают приемники сигналов с двукратной модуляцией?
7. Поясните сущность частотного разделения каналов.
8. Нарисуйте схему многоканального приемника с временным разделением каналов.
9. Объясните временную диаграмму полярно-модулированного сигнала.
10. Нарисуйте структурную схему полярного модулятора.
11. Запишите аналитическое выражение полярно-модулированного сигнала и представьте его спектрограмму.
12. Что такое комплексный стереосигнал? Где он используется?
13. Составьте структурную схему стереоприемника и объясните его работу. В чем состоит назначение стереодетектора.
14. Перечислите области применения радиосистем с ОМ. Каковы перспективы их развития?
15. Нарисуйте структурную схему приемника однополосных сигналов и объясните его работу.

### **3.24. Приемопередающие тракты цифровых систем связи**

#### **(Тема 23)**

Все системы подвижной радиосвязи (ПРС) построены по методу многостанционного доступа, под которым понимается возможность обращения к одной базовой станции или спутниковому ретранслятору нескольких мобильных станций (МС), причем последние могут одновременно принимать и передавать через нее информацию. Различают три основных метода многостанционного доступа: с частотным, временным и кодовым разделением каналов. Аналоговая часть любой станции включает в себя высокочастотные и низкочастотные передающие и приемные устройства, которые выполнены по классической для любой системы радиосвязи схеме. Цифровая часть МС формирует и обрабатывает передаваемые и принимаемые информационные и служебные сигналы. Она включает в себя цифровой сигнальный процессор, память, SIM-карты (модуль подлинности абонента) АЦП, ЦАП (цифроаналоговый преобразователь), канальный эквалайзер (выравниватель амплитуд сигналов, в данном случае импульсных), канальный кодер/декодер, цифровую клавиатуру, дисплей. Логическая часть выполняет операции кодирования/ декодирования, сжатия и восста-

новления сигнала, обрабатывает информацию, вводимую с клавиатуры и другое.

В настоящее время очень популярны беспроводные линии связи, использующие технологию расширенного спектра. В мобильной связи она известна как множественный доступ с кодовым разделением каналов.

Основной принцип создания спутниковых систем связи заключается в размещении ретрансляторов на искусственном спутнике Земли. На спутнике-ретрансляторе расположены специальная антенная система и приемопередающая аппаратура, осуществляющая прием, преобразование, обработку и передачу сигналов в направлении земных станций – станций радиосвязи, расположенных на земной поверхности и предназначенных для обеспечения собственной связи. В последние годы спутниковая связь все более переводится в плоскость персонального обслуживания.

Радиорелейные линии (РРЛ) представляют собой цепочку приемопередающих радиостанций (оконечных, промежуточных, узловых), которые осуществляют последовательную, многократную ретрансляцию (прием, преобразование, усиление и передача) передаваемых сигналов. Для передачи цифровой информации в стандартном телефонном канале в РРЛ используются модемы. Принцип работы модема заключается в следующем: гармоническое напряжение опорного генератора перемножается в балансном модуляторе с входным двоичным сигналом, ограниченным по полосе фильтром низкой частоты, т. е. производится предмодуляционная фильтрация. Когда ограничение полосы при передаче сигнала осуществляется полосовым фильтром, то имеет место послемодуляционная фильтрация. При приеме полосовой фильтр устраняет внеполосные шумы и помехи. Схема восстановления несущей формируется из принимаемого модулируемого сигнала. Балансный модулятор приемника детектирует принятый сигнал, который поступает на аналого-цифровой преобразователь, стробируемый сигналом тактовой частоты. Эта частота формируется схемой восстановления тактовой частоты (СВТЧ).

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое многостанционный доступ?
2. Перечислите основные методы многостанционного доступа и дайте им краткую характеристику.
3. Нарисуйте структурную схему организации системы сотовой связи.
4. Изобразите структурную схему передатчика мобильной станции.
5. Что такое кодер речи и кодер канала? Их функции в РПДУ.
6. Изобразите структурную схему приемника мобильной станции.
7. Объясните назначение в приемнике малошумящего усилителя (МШУ) и эквалайзера.
8. Для каких целей предназначен стандарт DECT? В чем его отличие от стандарта GSM?

9. Нарисуйте структурную схему цифровой системы связи с использованием расширенного спектра.

10. Что такое локальная сеть? Какое значение для локальных сетей имеет беспроводная связь?

11. Какими преимуществами обладают системы связи с использованием расширенного спектра?

12. Нарисуйте структурную схему спутниковой системы связи.

13. Объясните назначение радиорелейных линий связи.

14. Каким образом работает модем цифровой линии связи?

15. Нарисуйте схему когерентного модема. В чем отличие когерентного модема от некогерентного?

### 3.25. Приемопередающие тракты радиолокационных систем (РЛС)

#### (Тема 24)

РЛС предназначены для обнаружения, определения координат и параметров движения удаленных объектов (целей) путем приема отраженной от них электромагнитной энергии. РЛС бывают с импульсными и непрерывными сигналами.

Импульсные РЛС с селекцией движущихся целей (СЦД) предназначены для регистрации слабых сигналов, отраженных от движущихся целей при мешающем влиянии отражений от местных предметов (облака, земная поверхность и т.д.). Принцип работы РЛС с СЦД основан на том, что разница во времени поступления предыдущего и последующего импульсов несет в себе информацию о скорости движения объекта, которую можно оценить в фазовом детекторе по сдвигу фаз  $\Delta\varphi$  отраженных от объекта колебаний и сигнала опорного гетеродина. Сигнал на выходе устройств вычитания и индикации появится только тогда, когда значение  $\Delta\varphi$  изменилось, т. е. при отражении сигнала от движущегося объекта.

Для увеличения дальности РЛС необходимо длительность излучаемого импульса выбирать большой, что затрудняет подавление прямого прохождения излучаемого высокочастотного импульса на вход приемника и усложняет обеспечение требуемого разрешения по дальности. Чтобы этого не происходило, необходимо использовать высокочастотные импульсы с широким спектром, что можно достичь, применяя линейную частотную или фазовую манипуляцию. Таким образом, передатчик РЛС излучает импульсы большой длительности, а на выходе приемника получают отраженные импульсы малой длительности, т. е. обеспечивается сжатие отраженных импульсов с помощью линии задержки (ЛЗ) в приемнике.

РЛС с непрерывным излучением предназначена для определения скорости движения объекта. В основе ее работы лежит эффект Доплера, состоящий в

том, что частота принимаемых колебаний, отраженных от объекта, отличается от частоты излучаемых передатчиком колебаний на частоту Доплера:

$$F_g = 2 \gamma_r f_0 / c,$$

где  $\gamma_r$  – радиальная скорость движения объекта относительно РЛС;

$f_0$  – частота излучаемых колебаний;

$c$  – скорость света.

Выделяя и измеряя сравнительно низкую частоту  $F_g$ , можно определить скорость движения объекта.

В высотомерах малых высот используют непрерывные частотно-модулированные колебания. В них обычно применяется широкополосная частотная модуляция по пилообразному закону с низкой модулирующей частотой. Мгновенная частота излучаемого передатчиком РЛС колебания равна

$$f_1 = f_0 (1 \pm \gamma t),$$

где  $f_0$  – средняя частота излучения;

$\gamma$  – коэффициент, характеризующий скорость изменения частоты.

Частота принимаемого отраженного сигнала равна

$$f_2 = f_0 [1 \pm \gamma(t - 2R/c)],$$

где  $R$  – расстояние от РЛС до отражающего объекта.

На выходе преобразователя частоты образуется сигнал разностной частоты:  $f = (f_2 - f_1) = 2f_0\gamma R/c$ , частота  $f$  пропорциональна расстоянию до объекта.

### **Контрольные вопросы**

1. Классификация РЛС в зависимости от структуры излучаемого сигнала.
2. На каком принципе базируется работа импульсной РЛС?
3. Нарисуйте упрощенную структурную схему РЛС с СДЦ.
4. Почему после фазового детектора ФД в схеме РЛС с СДЦ включен видеоусилитель?
5. Какую роль выполняет когерентный генератор?
6. Нарисуйте схему передатчика с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).
7. Почему сигналы с ЛЧМ нашли распространение в радиолокации?
8. Нарисуйте упрощенную структурную схему РЛС с ЛЧМ.
9. С помощью графиков объясните работу устройства сжатия (ЛЗ).
10. На каких принципах базируется работа РЛС с непрерывным излучением?
11. Нарисуйте упрощенную структурную схему РЛС с немодулированным излучением.
12. Что такое квадратный преобразователь? Его назначение в РЛС?
13. Нарисуйте структурную схему высотомера малых высот.
14. Объясните назначение ограничителя в схеме высотомера.

15. На примере любой РЛС объясните роль передатчика и роль приемника. Какие резервы повышения качества работы РЛС имеются у этих устройств?

#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

При изучении дисциплины «Приемопередающие устройства» студенты 4-го курса специальности «Техническое обеспечение безопасности» выполняют две контрольные работы. Поскольку дисциплина фактически состоит из двух частей, то первую часть «Радиопередающие устройства» студенты осваивают в 7-м семестре с выполнением контрольной работы №1. Вторая часть курса «Приемопередающие устройства» изучается студентами в 8-м семестре с выполнением контрольной работы №2.

*Внимание!* Самостоятельное выполнение контрольных работ – это гарантия успешной сдачи экзамена в зимнюю сессию 7-го семестра и получение зачета в весеннюю сессию 4-го курса.

Студентам следует иметь в виду, что контрольные работы должны быть выполнены и сданы до приезда на сессию. В этом случае контрольная работа проверяется преподавателем и засчитывается даже при наличии в ней некоторых незначительных ошибок, а студент допускается к сдаче экзамена либо зачета.

Если в первый день сессии контрольная работа в деканате будет отсутствовать, а будет сдана в последующие дни сессии, то перед сдачей экзамена или зачета студентом проводится защита этой работы. При этом студент подробно объясняет ход выполнения работы. В случае отсутствия знаний по тематике контрольной работы студент не допускается к сдаче экзамена или зачета.

При выполнении контрольных работ необходимо учитывать следующие требования.

1. Работы выполняются в тетрадях или на стандартных листах бумаги формата А4, скрепленных в папку, с обязательными полями шириной 3,5 см для замечаний преподавателя. На обложке тетради (или первом листе А4) должна быть сделана надпись:

Контрольная работа № ...  
по дисциплине «Приемопередающие устройства»  
студента Николаюка Наума Ивановича  
вариант № ... , курс 4, учебная группа .....  
Адрес:

2. Записываются номер и содержание вопроса. Схемы и графики вычерчиваются аккуратно с соблюдением ЕСКД желательно на миллиметровке или на принтере с использованием ПЭВМ. Оси координат должны иметь обозначения аргументов и функций, их размерность, а также деления с цифровыми данными в соответствующем масштабе. Формулы должны быть написаны четко, используя общепринятые буквенные обозначения с их обязательной расшифровкой. Например,

$$R_o = \frac{U_o}{I_o},$$

где  $R_o$  – сопротивление резистора,  $U_o$  – падение напряжения на резисторе,  $I_o$  – ток, протекающий по резистору.

Ответ на поставленный вопрос должен быть развернутым, с приведением конкретных примеров.

3. В конце работы приводится список использованной литературы и представляется подпись студента.

### Контрольная работа №1

В соответствии с номером варианта, установленного для студента преподавателем, по табл. 4.1 определяется номер темы, обозначенный в разд. 3, и номер контрольного вопроса темы, на который необходимо дать развернутый ответ в ходе выполнения контрольной работы.

Таблица 4.1

Номер темы	Номер контрольного вопроса														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
2	30	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
3	28	29	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
4	26	27	30	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
5	24	25	28	29	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
6	22	23	26	27	30	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
7	20	21	24	25	28	29	1	3	5	7	9	11	13	15	17
8	18	19	22	23	26	27	30	2	4	6	8	10	12	14	16
9	16	17	20	21	24	25	28	29	1	3	5	7	9	11	13
10	14	15	18	19	22	23	26	27	30	2	4	6	8	10	12
11	12	3	16	17	20	21	24	25	28	29	1	3	5	7	9
12	10	11	14	15	18	19	22	23	26	27	30	2	4	6	8

#### Пример

Для студента Николаюка Н. И. определен вариант №30. В соответствии с табл. 4.1 студенту устанавливается следующее задание:

1. Контрольный вопрос №1 темы 2.
2. Контрольный вопрос №3 темы 4.
3. Контрольный вопрос №5 темы 6.
4. Контрольный вопрос №7 темы 8.
5. Контрольный вопрос №9 темы 10.
6. Контрольный вопрос №11 темы 12.

## Контрольная работа №2

Определение задания по выполнению контрольной работы №2 аналогично, только необходимо воспользоваться табл. 4.2.

Таблица 4.2

Номер темы	Номер контрольного вопроса														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
13	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
14	33	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
15	32	33	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
16	31	30	33	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
17	29	32	28	22	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
18	27	30	31	23	22	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
19	25	28	30	32	31	20	1	2	5	7	9	11	13	15	17
20	23	26	27	29	32	31	19	2	4	6	8	10	12	14	16
21	21	24	25	28	30	32	26	18	1	3	5	7	9	11	13
22	19	22	23	26	27	29	31	24	18	2	4	6	8	10	12
23	17	20	21	24	25	28	30	32	27	16	1	3	5	7	9
24	16	18	19	22	23	26	27	29	31	28	15	2	4	6	8
25	11	15	17	20	21	24	25	28	30	29	26	13	14	12	10

Учебное издание

**Листопад Николай Измайлович  
Бригидин Анатолий Михайлович**

***ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА***

Методическое пособие  
для студентов специальности  
«Техническое обеспечение безопасности»  
заочной формы обучения

Редактор Н. В. Гриневич  
Корректор Е. Н. Батурчик

---

Подписано в печать 25.09.2009.	Формат 60×84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 3,37.
Уч.-изд. л. 3,0.	Тираж 100 экз.	Заказ 117.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6