

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный  
университет им. Х.М. Бербекова»  
(КБГУ)

Институт электроники, робототехники и искусственного интеллекта

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОПОП

 Р.Ш. Тешев

« 12 » февраля 2025 г.

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**

**ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**Б1. О.24 «Устройства приема и преобразования сигналов»**

Специальность

**11.05.01 Радиозлектронные системы передачи информации**

Специализация

**Радиозлектронные системы передачи информации**

Квалификация

**Инженер**

Форма обучения

**Очная**

Нальчик 2025

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный  
университет им. Х.М. Бербекова»  
(КБГУ)**

**Институт электроники, робототехники и искусственного интеллекта**

**УТВЕРЖДАЮ**

**Руководитель ОПОП**

\_\_\_\_\_ **Р.Ш. Тешев**

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ **2025 г.**

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**

**ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**Б1. О.24 «Устройства приема и преобразования сигналов»**

Специальность

**11.05.01 Радиоэлектронные системы передачи информации**

Специализация

**Радиоэлектронные системы передачи информации**

Квалификация

**Инженер**

Форма обучения

**Очная**

**Нальчик 2025**

# 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Таблица 1

Код и формулировка компетенции	Индикаторы достижения	Планируемые результаты обучения по дисциплине (ЗУН)
<b>ПК-3.</b> Способен к проведению диагностики и проверки на работоспособность составных частей радиоэлектронных систем и комплексов	<b>ПК-3.1</b> Способен составлять алгоритм проведения диагностических операций, оценивать точность и достоверность результатов <b>ПК-3.2</b> Способен диагностировать и оценивать техническое состояние радиоэлектронных устройств и составных частей радиоэлектронных систем и комплексов. <b>ПК-3.3</b> Способен использовать необходимые виды и формы эксплуатационной документации для представления результатов диагностики.	<b>Знать</b> Способы составления алгоритмов проведения диагностических операций, оценивать точность и достоверность результатов <b>Уметь</b> диагностировать и оценивать техническое состояние радиоэлектронных устройств и составных частей радиоэлектронных систем и комплексов. <b>Владеть</b> способами использования необходимых видов и форм эксплуатационной документации для представления результатов диагностики.

## 2. Шкала оценивания планируемых результатов обучения

### 2.1 Текущий контроль

Оценка результатов текущей успеваемости в рамках контрольных точек осуществляется посредством 70-балльной системы, при этом за добросовестное посещение занятий обучающийся может набрать до 10 баллов, за качественное прохождение оценочных мероприятий - до 60 баллов.

### Карта распределения рейтинговых баллов в рамках текущего контроля

Таблица 2

№	Оценочное средство	Форма проведения	Порядок проведения	Максимальное количество баллов	Критерии оценивания
2	Лабораторная работа №1 «Входные цепи радиоприемников»	письменная	Работа включает в себя четыре задания, выполняется студентами попарно.	4	4 - все задания выполнены верно и даны правильные ответы к контрольным вопросам защиты, выводы по работе обоснованы; 2÷3 – задание выполнено верно, незначительные ошибки в результатах или выводах, даны правильные ответы на большую часть контрольных вопросов; 1 – выполнено минимальное количество заданий; выводы содержат ошибки; 0 – задания не выполнены или выполнены неверно
	Лабораторная работа №2 «Исследование амплитудного, частотного детектора»	письменная	Работа включает в себя три задания, выполняется студентами попарно.	4	4 - все задания выполнены верно и даны правильные ответы к контрольным вопросам защиты, выводы по работе обоснованы; 2÷3 – задание выполнено верно, незначительные ошибки в результатах или выводах, даны правильные ответы на большую

					часть контрольных вопросов; 1 – выполнено минимальное количество заданий; выводы содержат ошибки; 0 – задания не выполнены или выполнены неверно
	Лабораторная работа №3 «Исследование частотного детектора»	письменная	Работа включает в себя три задания, выполняется студентами попарно.	4	4 - все задания выполнены верно и даны правильные ответы к контрольным вопросам защиты, выводы по работе обоснованы; 2÷3 – задание выполнено верно, незначительные ошибки в результатах или выводах, даны правильные ответы на большую часть контрольных вопросов; 1 – выполнено минимальное количество заданий; выводы содержат ошибки; 0 – задания не выполнены или выполнены неверно
3	Лабораторная работа №4 «Усилители высокой и промежуточной частот радиоприемников»	письменная	Работа включает в себя три задания, выполняется студентами попарно.	4	4 - все задания выполнены верно и даны правильные ответы к контрольным вопросам защиты, выводы по работе обоснованы; 2÷3 – задание выполнено верно, незначительные ошибки в результатах или выводах, даны правильные ответы на большую часть контрольных вопросов; 1 – выполнено минимальное количество заданий; выводы содержат ошибки; 0 – задания не выполнены или выполнены неверно
4	Лабораторная работа №5 «Исследование преобразователя частоты»	письменная	Работа включает в себя три задания, выполняется студентами попарно.	4	4 - все задания выполнены верно и даны правильные ответы к контрольным вопросам защиты, выводы по работе обоснованы; 2÷3 – задание выполнено верно, незначительные ошибки в результатах или выводах, даны правильные ответы на большую часть контрольных вопросов; 1 – выполнено минимальное количество заданий; выводы содержат ошибки; 0 – задания не выполнены или выполнены неверно
	Лабораторная работа №6 «Исследование влияния помех в канале связи на принимаемую информацию»	письменная	Работа включает в себя три задания, выполняется студентами попарно.	4	4 - все задания выполнены верно и даны правильные ответы к контрольным вопросам защиты, выводы по работе обоснованы; 2÷3 – задание выполнено верно, незначительные ошибки в результатах или выводах, даны правильные ответы на большую часть контрольных вопросов; 1 – выполнено минимальное количество заданий; выводы содержат ошибки; 0 – задания не выполнены или выполнены неверно
7	Тесты по 1 контрольной точке	с применением ДТ	Студент проходит компьютерное тестирование в ЭИОС.	9	Количество баллов пропорционально количеству правильных ответов
8	Тесты по 2 контрольной точке	с применением ДТ	Студент проходит компьютерное тестирование в ЭИОС.	9	Количество баллов пропорционально количеству правильных ответов

9	Коллоквиум по 1 контрольной точке	письменная	Студенты отвечают письменно на вопросы коллоквиума	9	9 – ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, аргументация логична; 7÷8 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки; 4÷6- ответы недостаточно полные; 1÷3 – ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов; 0 – ответы отсутствуют или полностью неверные
10	Коллоквиум по 2 контрольной точке	письменная	Студенты отвечают письменно на вопросы коллоквиума	9	9 – ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, аргументация логична; 7÷8 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки; 4÷6- ответы недостаточно полные; 1÷3 – ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов; 0 – ответы отсутствуют или полностью неверные
<b>Итого:</b>				<b>60</b>	

### Карта распределения рейтинговых баллов в рамках итоговой аттестации

№	Оценочное средство	Форма проведения	Порядок проведения	Максимальное количество баллов	Критерии оценивания
1.	Экзаменационная работа	Устный опрос	Экзаменационный билет содержит 2 вопроса, которые студент должен ответить устно.	Теоретические вопросы - 30 баллов	<p><b>Критерии оценивания теоретических вопросов:</b></p> <p>25 до 30 баллов: Глубокий уровень владения материалом, точное знание ключевых концепций, способность анализировать и интерпретировать факты, грамотно строить высказывания, привести примеры, свободно оперировать терминологией.</p> <p>От 19 до 24 баллов: Базовое владение предметом, умение последовательно раскрыть основную мысль вопроса, грамотное применение терминов, наличие существенных элементов анализа и обобщений, но недостаточное развертывание или отдельные неточности.</p> <p>От 13 до 18 баллов: Частичное освоение материала, попытка объяснить основной смысл вопроса, использование некоторых базовых терминов, но отсутствие глубокого понимания сложных моментов, логические недостатки изложения, отсутствие выводов.</p> <p>От 7 до 12 баллов: Ошибочные представления, слабо выраженное владение основными понятиями, значительные затруднения в интерпретации вопросов, существенные фактологические ошибки, отсутствие обоснованных выводов и примеров.</p> <p>От 0 до 6 баллов: Полное непонимание темы, неспособность сформулировать адекватный ответ, грубые ошибки, несоответствие требованиям задания.</p>

### 3. Оценочные материалы для текущего и промежуточного контроля успеваемости

### 3.1. Оценочные материалы для текущего контроля

#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «ИССЛЕДОВАНИЕ ВХОДНЫХ ЦЕПЕЙ РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ»

Целью работы является изучение схем входных цепей радиоприемных устройств, экспериментальное исследование свойств входных цепей, работающих на ненастроенную антенну, и приобретение навыков расчета их параметров, настройки и регулировки.

##### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Входной цепью называют часть схемы приемника, связывающую антенно-фидерную систему с входом первого каскада приемника. Первым каскадом может быть усилитель радиочастоты или смеситель.

Основным назначением входных цепей является передача полезного сигнала от антенны к входу первого активного элемента и предварительное выделение принимаемого полезного сигнала из всей совокупности сигналов, индуцируемых в антенной цепи.

Входная цепь обычно представляет собой пассивный четырехполюсник, включающий в себя резонансную систему и элементы связи. В зависимости от диапазона частот резонансная система выполняется на сосредоточенных или распределенных элементах и состоит из одного или нескольких колебательных контуров или резонаторов (коаксиальных, полосковых, объемных). Элементы связи обеспечивают связь антенной цепи с контуром (резонатором), а при нескольких резонансных элементах, связь между ними и первым каскадом приемника.

В диапазонных приемниках наибольшее распространение получили одноконтурные входные цепи. В профессиональных приемниках могут применяться двухконтурные и многоконтурные входные цепи.

На рис.1-3 приведены часто встречающиеся схемы одноконтурных входных цепей. Схемы отличаются способами связи входного контура с антенной.

На рис.1 приведена схема с трансформаторной связью между контуром входной цепи  $L_k C_k$  и антенной А. В схеме на рис.2 использована емкостная связь входного контура с антенной. Если активным элементом будет биполярный транзистор, то может использоваться двойное неполное включение контура, рис.3. (Не часто, но находит применение комбинирование связи входной цепи с антенной, обычно это индуктивно-емкостная связь).

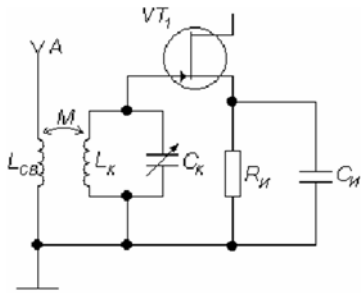


Рис. 1. Входная цепь с трансформаторной связью с антенной

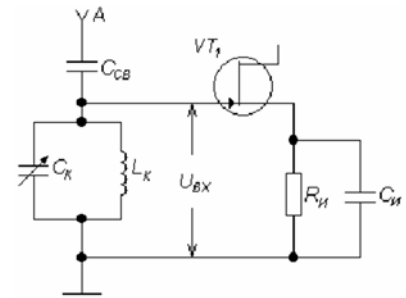


Рис. 2. Входная цепь с емкостной связью с антенной

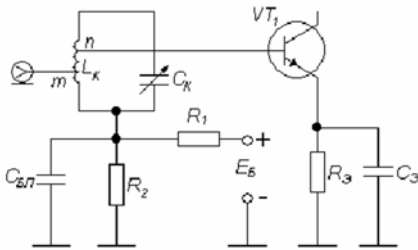


Рис.3. Входная цепь с автотрансформаторной связью с антенной

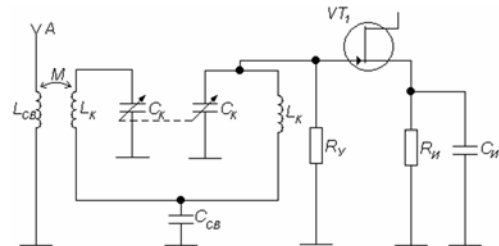


Рис.4. Входная цепь с двухконтурным полосовым фильтром

На рис.4 показана одна из часто применяемых схем двухконтурной входной цепи. Здесь связь первого контура с антенной - трансформаторная. Связь между контурами - внутриемкостная через конденсатор  $C_{св}$ . Активный прибор - полевой транзистор подключен полностью во второй контур.

Основными электрическими характеристиками входных цепей являются: коэффициент передачи напряжения (мощности), полоса пропускания, избирательность, диапазон рабочих частот.

Коэффициентом передачи входной цепи по напряжению называют отношение напряжения сигнала на входе первого активного элемента приемника  $U_{вх}$  к величине ЭДС в антенне  $E_A$ , а

в случае ферритовой антенны - к напряженности поля сигнала:

$$K = U_{\text{ex}} / E_A . \quad (1)$$

Коэффициент передачи напряжения на частоте настройки входной цепи  $f_0$  называют резонансным коэффициентом передачи  $K_0$

$$K_0 = U_{\text{ex}0} / E_A . \quad (2)$$

*Полоса пропускания* - ширина области частот, в пределах которой сохраняется допустимая неравномерность коэффициента передачи.

*Избирательность* - входных цепей определяет степень уменьшения коэффициента передачи напряжения при заданной расстройке по сравнению с резонансным значением  $\sigma = k / k_0$ .

*Диапазон рабочих частот.* Входная цепь должна обеспечить возможность настройки на любую частоту заданного диапазона приемника при удовлетворении требований, предъявляемых к изменению коэффициента передачи, полосы пропускания, избирательности. Коэффициентом перекрытия  $K_{\text{нд}}$  диапазона называют отношение максимальной частоты диапазона к минимальной:

$$K_{\text{нд}} = f_{\text{max}} / f_{\text{min}} . \quad (3)$$

Полный диапазон перестройки приемника обычно разбивают на ряд поддиапазонов. Находят применение два основных способа разбивки диапазона на поддиапазоны.

*С постоянным частотным интервалом* (рис.5). При этом

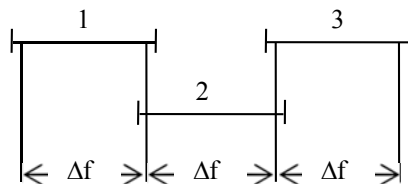


Рис.5.Разбивка на поддиапазоны  
способе разность максимальной и минимальной частот у всех поддиапазонов одинакова

$$f_{i \text{ max}} - f_{i \text{ min}} = \Delta f .$$

Коэффициент перекрытия диапазона в этом случае с ростом частоты поддиапазона уменьшается

$$k_{nd} = f_{i \max} / f_{i \min} = \frac{f_{i \min} + \Delta f}{f_{i \min}} = 1 + \Delta f / f_{i \min} .$$

*С постоянным коэффициентом перекрытия.*

При этом способе коэффициенты перекрытия всех поддиапазонов одинаковы

$$K_{nd} = f_{i \max} / f_{i \min} = \frac{f_{i \min} + \Delta f}{f_{i \min}} = 1 + \Delta f / f_{i \min} = const.$$

Этот способ более экономичный, т.к. для перекрытия всего рабочего диапазона частот требуется меньшее число поддиапазонов.

Однако из  $\Delta f = f_{i \max} - f_{i \min} = f_{i \min} k_{nd} - f_{i \min} = f_{i \min} (k_{nd} - 1)$  следует, что с увеличением частоты  $f_{i \min}$  возрастает  $\Delta f$ , следовательно, возрастает плотность настройки.

В специальной аппаратуре обычно используется первый способ перекрытия рабочего диапазона частот, в аппаратуре широкого применения - второй.

Рассмотрим основные соотношения, используемые для расчета параметров входных цепей.

Эквивалентная емкость контура складывается из емкости органа настройки (обычно конденсатор переменной емкости или варикап)  $C$ , собственной емкости катушки контура  $C_L$ , емкости монтажа  $C_M$ , емкости подстроечного конденсатора  $C_{\Pi}$  (при расчетах выбирается среднее значение), вносимой емкости со стороны электронного прибора  $C_{ex}$ , пересчитанной в контур через коэффициент трансформации (включения)  $n$ :

$$C_{\Sigma} = C + C_L + C_M + C_{\Pi} + n^2 C_{ex} . \quad (4)$$

Для усилителей на биполярных транзисторах коэффициент трансформации  $n$  может быть определен из двух условий: из условия внесения в контур со стороны первого каскада усилителя емкости, составляющей не более 10-20% от минимальной начальной емкости контура

$$C_0 = C_{\text{Э min}} = C_{\text{min}} + C_L + C_M + C_{\Pi},$$

где  $C_{\text{min}}$  - минимальная емкость органа настройки, то есть,

$$n \leq \sqrt{\frac{(0,1...0,2)C_0}{C_{\text{ax}}}}, \quad (5)$$

и из условия допустимого увеличения затухания контура

$$n \leq \sqrt{\frac{R_{\text{ax}}}{(1-\Psi)\rho Q_k}}, \quad (6)$$

здесь  $R_{\text{BX}}$  - входное сопротивление каскада, подключенного к контуру входной цепи;  $R_{\text{ax}}$  - характеристическое сопротивление контура на максимальной частоте;  $Q_k$  - конструктивная (собственная) добротность контура;  $\Psi$  - коэффициент шунтирования контура электронным прибором. Для схем на полевых транзисторах (с общим истоком) в диапазонах ДВ, СВ и КВ  $\Psi = 0,8...0,9$ . В остальных случаях  $\Psi = 0,5...0,8$ . Из двух значений  $n$  следует выбирать меньшее.

Индуктивность контура входной цепи рассчитывается по формуле

$$L = \frac{1}{K \cdot (2\pi)^2 \cdot f_{\text{max}}^2 \cdot C_{\text{Э min}}}, \quad (7)$$

где  $f_{\text{max}}$  - максимальная частота поддиапазона;  $C_{\text{Э min}}$  - минимальная эквивалентная емкость.

При емкостной связи контура с антенной величина конденсатора связи  $C_{\text{CB}}$  определяется из двух условий:

$$C_{\text{CB}} \leq \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{max}}} \sqrt{\frac{C_A}{L_K \cdot Q_{\text{Э}} \cdot (q_C - 1)}}, \quad C_{\text{CB}} = \frac{C_A \cdot \Delta C}{C_A + \Delta C}, \quad (8)$$

где  $C_A$  - емкость антенны;

$q_C = \frac{C_A}{C_{A \text{ min}}}$  - коэффициент разброса емкости антенны;

$$\Delta C = 0,03 \sqrt{\frac{1}{f_{\text{max}}^3 \cdot L_K \cdot R_A \cdot q_R}}, \quad (9)$$

$R_A$  - активное сопротивление антенны;

$q_R = R_A / R_{A \min} = R_{A \max} / R_A$  - коэффициент разброса сопротивления антенны.

Из двух полученных значений емкости связи  $C_{CB}$  следует взять меньше.

Величина полной емкости контура при этом с учетом влияния емкости антенны равна  $C'_\Sigma = C_\Sigma + C'_A$ ,

где

$$C'_A = \frac{C_A \cdot C_{CB}}{C_A + C_{CB}}.$$

Резонансный коэффициент передачи напряжения входной цепью с емкостной связью определяется по формуле

$$k_0 = Q_\Sigma \cdot n \cdot \frac{C'_A}{C'_\Sigma}. \quad (10)$$

Степень расстройки антенной цепи относительно крайних частот поддиапазона при трансформаторной (индуктивной) связи в зависимости от способа настройки входной цепи, характеризуется коэффициентом удлинения  $k_{уд} = \frac{f_{\min}}{f_{0A}}$  или коэффициентом укорочения

$k_{ук} = \frac{f_{0A}}{f}$ , где  $f_{0A}$  - собственная резонансная частота антенной цепи.

max

Коэффициенты  $k_{уд}$  или  $k_{ук}$  выбираются в пределах от 1,25 до 3, но при этом необходимо следить за тем, чтобы резонансная частота антенной цепи  $f_{0A}$  не совпадала с частотами побочных каналов приема.

Индуктивность катушки связи для режимов удлинения или укорочения может быть подсчитана по формулам:

$$L_{CB}^{уд} = \left( k_{уд}^2 q_L q_C / 39,5 f_{\min}^2 C_A \right) - L_A;$$

$$L_{CB}^{ук} = \left( 1 / 39,5 f_{\max}^2 k_{ук}^2 q_L q_C C_A \right) - L_A;$$

где  $q_L$  - коэффициент разброса индуктивности антенны.

Добротность катушки связи выбирается обычно из условия  $Q_{св} = (0,3 \dots 0,4) Q_\Sigma$ . Тогда затухание антенной цепи определяется соотношением

$$d_A = \frac{(R_A + 2\pi \cdot f \cdot L_{CB} \cdot d_{CB}) \cdot q_R \cdot q_L}{2\pi \cdot f \cdot (L_{CB} + L_A)}, \quad (11)$$

где  $f = f_{\min}$  - для режима удлинения;  $f = f_{\max}$  - для режима укорочения,

$$d_{CB} = 1/Q_{CB}.$$

При этом минимальное значение коэффициента связи, обеспечивающее оптимальную связь для согласования по мощности будет равно:

$$k_{CB}^{y\partial} = \sqrt{\frac{d_{\partial}}{d_A} \left( 1 - \frac{1}{k^2} \right)}; \quad k_{CB}^{y\kappa} = \sqrt{\frac{d_{\partial}}{d_{\phi}} (k^2 - 1)}.$$

Коэффициент связи, с одной стороны, должен быть не больше того значения, при котором затухание контура увеличивается за счет реакции антенной цепи не более чем на (20-25)%, а коэффициент передачи по напряжению уменьшается не более чем на 25% от значения при оптимальной связи; при этом  $k_{CB1} = 0,5k_{CB \min}$ . С другой стороны, допустимый сдвиг резонансной частоты контура  $\beta = \Delta f_0 / f_0$ , вызываемый реактивной составляющей сопротивления антенной цепи, должен быть менее половины полосы пропускания, т.е.  $\beta \leq 0,5d_{\partial}$ . Этому условию соответствует выражение

$$k_{CB2} = k_{y\partial} \cdot \sqrt{\frac{\beta \cdot (k_{y\partial}^2 - 1) \cdot (k_{y\partial}^2 \cdot q_C^2 \cdot q_L^2 \cdot k_{nd}^2 - 1)}{q_L^2 \cdot q_C^2 \cdot k_{nd}^2 - 1}}. \quad (12)$$

При укороченной настройке в формуле для  $k_{CB2}$  нужно  $k_{y\partial}$  заменить на  $k_{y\kappa}$ .

Выбирают меньшее значение  $k_{CB1}$  или  $k_{CB2}$ , однако коэффициент связи не должен быть больше конструктивно выполнимого (для многослойных катушек 0,5 - 0,6, а для однослойных 0,4 - 0,5).

Взаимная индукция между колебательным контуром и обмоткой связи определяется соотношением

$$M = k_{CB} \sqrt{L_K \cdot L_{CB}}.$$

Резонансные коэффициенты передачи входной цепи для режимов удлинения и укорочения могут быть найдены по формулам:

$$k_0^{y\partial} = K_{CB} Q_{\partial} / (1 - f_{0A}^2 / f_0^2) \cdot \sqrt{L_k / L_{CB}}; \quad k_0^{y\kappa} = K_{CB} Q_{\partial} / (f_{0A}^2 / f_0^2 - 1) \cdot \sqrt{L_k / L_{CB}}$$

(13)

где  $f_0$  - частота настройки контура;  $f_{0A} = 1 / \left[ 2\pi \sqrt{(L_{CB} + L_A) C_A} \right]$  - собственная резонансная частота антенной цепи, соответствующая средним параметрам антенны.

При индуктивно-емкостной связи входной цепи с антенной рекомендуется выбирать  $k_{y\partial} = 1,25 \dots 1,4$ . Расчет производится в том же порядке, что и для схемы с индуктивной связью.

Дополнительно к этому определяется величина емкости связи

$$C_{CB} = C_{\partial \min} \frac{M}{L_{CB}} \cdot \frac{k_{no}^2 - 1}{k_{y\partial}^2 (k^2 - 1)} \quad (14)$$

Коэффициент передачи равен

$$k_{0И-Е} = k_{y\partial} \left( 1 + \frac{C_{CB} L_{CB}}{C_{\partial} M} \right) \quad (15)$$

Избирательные свойства одиночного резонансного контура оцениваются характеристикой избирательности («кривая избирательность»)

$$\sigma = \sqrt{1 + \xi^2} = \sqrt{1 + Q_{\partial}^2 \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2}, \quad (16)$$

где  $\xi$  – обобщенная расстройка контура;

$d_{\partial} = \frac{1}{Q_{\partial}}$  - эквивалентное затухание контура;

$f$  - текущее значение частоты;  
 $f_0$  - резонансная частота контура.

Полоса пропускания одиночного контура по уровню 0,707 (-3дБ) оценивается выражением  $\Pi_{0,707} = f_0 \cdot d_{\partial}$ .

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальная часть работы состоит в определении и сравнении характеристик входных цепей различного типа.

Лабораторная установка.

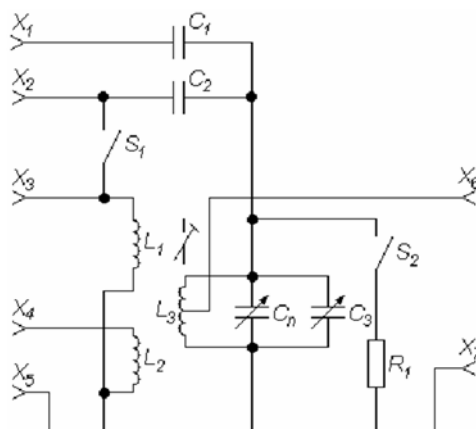


Рис.6.Схема лабораторной установки

На рис.6 показана схема лабораторной установки. Лабораторный макет позволяет исследовать три схемы входных цепей: схему с трансформаторной (индуктивной) связью антенны с колебательным контуром при использовании "удлиненной" (гнездо x3) и "укороченной" (гнездо x4) настроек входной цепи; схему с емкостной связью антенны с колебательным контуром (гнезда x1 и x2) и схему с индуктивно-емкостной связью антенны с колебательным контуром при "удлиненном" способе настройки антенной цепи (гнездо x2 или x3 при замкнутом переключателе S1).

Настройка колебательного контура  $K$  производится с помощью переменного конденсатора  $C_3$ .

Гнезда x1 - x5 предназначены для подключения генератора высокой частоты (Г4-102, Г4-116 или им подобным), а гнезда x6, x7 - милливольтметра (В3-38, В3-58) или осциллографа (С1-49, С1-55).

Влияние сопротивления нагрузки на параметры входной цепи оцениваются при замыкании выключателя S2, при этом резистор R1 шунтирует контур входной цепи.

## 2.2 Домашнее задание

1. Рассчитайте коэффициент включения контура входной цепи к входу активного прибора.

2. Определите величины элементов связи контура с антенной для схем с емкостной и трансформаторной (индуктивной) связью.

3. Данные для расчета:  $f_{max}=1600$  кГц;  $f_{min}=520$ кГц;  $Q_{\Sigma}=30$ ;

$L_A = 20$ мкГ;  $C_A = 100$ пФ;  $R_A = 100$ Ом;  $q_C=q_L=q_R=1,5$ ;

$C_{max} = 500$ пФ;  $C_{min} = 12$ пФ;  $R_{BX} = 2$  кОм;  $C_n = 4 - 15$ пФ;

$C_M = 6$ пФ;  $C_L = 12$  пФ;  $C_{BX} = 40$  пФ.

### 2.3 Порядок выполнения работы

1. Определить экспериментально коэффициент перекрытия диапазона входной цепи.

Для этого подключить ко входу схемы (гнезда X2 и X5) генератор сигналов высокочастотный (ГСВ) с напряжением 0,1В, а к выходу (гнезда X6, X7) - осциллограф. Тумблеры S1 и S2 поставить в положение “Откл.”. Установив ручку конденсатора C3 в одно из крайних положений и перестраивая ГСВ в пределах от 450 до 2000кГц, определить частоту резонанса контура входной цепи. Установить ручку C3 в другое крайнее положение и повторить измерение. Определить коэффициент перекрытия диапазона входной цепи. Повторить измерения для остальных схем входной цепи. Объяснить разницу в получающихся цифрах.

2. Определить частоты настройки антенной цепи при трансформаторной связи.

Для этого подключить ГСВ к обмотке связи с “укороченной” настройкой (гнезда X4 и X5), установив на выходе ГСВ напряжение 0,1В. К выходу схемы (гнезда X6, X7) должен быть подключен милливольтметр. Поставить C3 в положение, при котором его емкость минимальна.

Генератор сигналов следует перестраивать в пределах от верхней частоты диапазона до частоты  $\sim 4500$  кГц. Найти собственную резонансную частоту антенной цепи  $f_A$  и вычислить коэффициент укорочения.

Собственную резонансную частоту с “удлиненной” настройкой можно определить только при условии внесения в нее минимального затухания. Для этого подключить ГСВ к обмотке связи с “удлиненной” настройкой (гнезда X3, X5) и повторить измерения, перестраивая ГСВ от нижней частоты диапазона до частоты  $\sim 150$ кГц. Найти резонансную частоту и вычислить коэффициент удлинения.

3. Снять зависимость резонансного коэффициента передачи напряжения от частоты при емкостной, индуктивной (с “удлиненной” и “укороченной” настройками антенной цепи) и индуктивно-емкостной связи с антенной.

Для этого соединить корпус ГСВ с гнездом X5. Подключая выход ГСВ поочередно к гнездам X1, X2, X3 (тумблер S1 разомкнут или замкнут), X4 и устанавливая ротор переменного конденсатора в одно из четырех положений, соответствующих примерно  $f_{max}$ ,  $f_{min}$  и двум промежуточным значениям в рабочем диапазоне входной цепи, измерять величину напряжения при настройке контура в резонанс по милливольтметру, подключенному к гнездам X6, X7. Амплитуду высокочастотного напряжения на выходе ГСВ следует поддерживать постоянной (примерно на уровне 0,1В). Подстройку контура с помощью С3 необходимо производить при каждом измерении. Результаты измерений для исследуемых схем занести в табл. 2.1. Построить график  $k_0 = \psi(f)$ .

Таблица 2.1

$\Delta f, \text{кГц}$	
$U_{\text{вых}}, \text{В}$	
$K_0$	

4. Получить кривые избирательности при ненагруженном и нагруженном контуре входной цепи в начале и конце диапазона для схемы с емкостной связью.

Для этого высокочастотное напряжение соответствующей частоты с напряжением 0,1В подать на гнезда X2 и X5. Ручкой конденсатора С3 настроить контур в резонанс. Измерить напряжение на выходе схемы милливольтметром, подключенным к гнездам X6, X7. Расстраивая ГСВ относительно резонансной частоты контура, записывать величины расстроек и напряжений в табл. 2.2. Расстройки выбирать такими, чтобы полученные 7 - 9 точек достаточно полно описывали ход кривой. Построить графики  $\sigma = \psi(\Delta f)$ .

Таблица 2.2

$\Delta f, \text{кГц}$	
$U_{\text{вых}}, \text{В}$	
$\sigma = U_{\text{вых}0} / U_{\text{вых}}$	

5. Определить зависимость полосы пропускания и эквивалентной

добротности контура от частоты при емкостной связи с антенной.

Для этого ГСВ с выходным напряжением 0,1В должен быть подключен к гнездам Х2, Х5, а милливольтметр - к гнездам Х6, Х7. Установить ротор переменного конденсатора С3 в положение, соответствующее  $f_{max}$ . Изменяя частоту на входе ГСВ, найти положение, при котором напряжение на выходе схемы будет максимально. Отметить это значение. Затем изменить частоту ГСВ вверх и вниз от полученного значения до частот, при которых напряжение, фиксируемое милливольтметром, станет равным 0,707 от первоначального значения. Отметить эти частоты, разность их равна полосе пропускания входной цепи. Повторить измерения на частотах  $0,3(f_{max} + 2f_{min})$ ,  $0,3(2f_{max} + f_{min})$ ,  $f_{min}$ .

Данные занести в табл. 2.3. При измерениях, для повышения точности, следует пользоваться частотомером, подключенным ко второму выходу ГСВ.

Таблица 2.3

$f, \text{кГц}$	
$P, \text{кВт}$	
$Q_3$	

Построить графики  $P_{0,707} = \psi(f)$ ,  $Q_3 = \psi(f)$ .

6. Определить влияние величины емкости связи антенны с контуром на ширину полосы пропускания входной цепи и на величину расстройки контура со стороны антенны.

Для этого ГСВ с выходным напряжением 0,1В должен быть подключен к гнездам Х2 и Х5, а милливольтметр - к гнездам Х6, Х7. Установить на ГСВ частоту 600 кГц и настроить контур в резонанс. Определите полосу пропускания входной цепи, Затем, не изменяя положения ротора С3, подключить выход ГСВ к гнезду Х1. Определить, перестраивая ГСВ, частоту резонанса контура. Оценить смещение настройки. Найти полосу пропускания входной цепи. Сделать выводы.

### Контрольные вопросы

1. Поясните назначение входной цепи.

2. Какими основными параметрами характеризуется работа входной цепи? Что они собой представляют?

3. Что такое коэффициент перекрытия диапазона входной цепи? От чего он зависит?

4. Каков характер и в чем состоят причины изменения резонансного коэффициента передачи входной цепи с "удлиненной" и "укороченной" настройкой антенного контура?

5. Каковы соображения при выборе величины емкости связи с антенной?

6. Что такое избирательность? Каким соотношением можно определить избирательность одноконтурной входной цепи?

7. Как изменяется избирательность и коэффициент передачи входной цепи при подключении нагрузки и почему?

8. При каких случаях используются ненастроенные и настроенные антенны?

9. На каких частотах диапазона избирательность входной цепи хуже и почему?

10. Какой следует выбирать собственную частоту антенной цепи при индуктивно-емкостной связи входной цепи с антенной?

11. Что такое коэффициент удлинения и коэффициент укорочения? Каковы соображения по их выбору?

12. Что такое полоса пропускания входной цепи? От чего она зависит?

13. Каковы особенности выполнения входных цепей декаметрового, метрового диапазонов?

14. Сравните варианты настройки входных цепей с помощью емкости и индуктивности.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 АМПЛИТУДНЫЙ ДЕТЕКТОР

### Общие сведения

Амплитудным детектором (АД) называется устройство, предназначенное для получения на выходе напряжения, изменяющегося в соответствии с законом изменения огибающей входного амплитудно-модулированного сигнала.

Процесс детектирования амплитудно-модулированных (АМ) сигналов заключается в воспроизведении модулирующего сообщения  $x(t)$  с наименьшими искажениями. В аналитической форме АМ сигнал имеет вид

$$u_c(t) = u_a \cos(\omega_c t), \quad (1)$$

где  $u_a(t) = U_c[1 + m_a x(t)]$ ,  $m_a \leq 1$  – коэффициент глубины модуляции;  $U_c$  – амплитуда несущего колебания с частотой  $\omega_c$ . Спектр сообщения  $x(t)$  сосредоточен в области низких частот (частот модуляции), а спектр сигнала  $u_c(t)$  – в области частоты  $\omega_c$ , значение которой обычно намного превышает значение наивысшей частоты модуляции. Преобразование спектра при демодуляции возможно только в устройствах, выполняющих нелинейное или параметрическое преобразование входного сигнала  $u_c(t)$ .

При использовании нелинейного устройства, обладающего квадратичной вольт-амперной характеристикой, выходной ток имеет вид

$$i = Vu_c^2(t) = Vu_a^2(t)[0,5 + 0,5\cos(2\omega_c t)] \quad (2)$$

где  $V$  – постоянный коэффициент. После устранения фильтром низких частот (ФНЧ) составляющей с частотой  $2\omega_c$  получим

$$i = 0,5Vu_c^2[1 + 2m_a x(t) + m_c^2 x^2(t)] \quad (3)$$

В этом токе содержится составляющая вида  $Vu_c^2 m_a x(t)$ , пропорциональная передаваемому сообщению, а также составляющая  $0,5Vu_c^2 m_a^2 x^2(t)$ , которая определяет степень нелинейных искажений модулирующего сообщения  $x(t)$ .

Параметрическое преобразование осуществляется путем умножения  $u_c(t)$  на опорное колебание, имеющее вид  $u_0(t) = U_0 \cos(\omega_c t)$ . В этом случае результат перемножения определяется следующим выражением:

$$u_c(t)u_0 = u_a(t)U_0[0,5 + 0,5\cos(2\omega_c t)] \quad (4)$$

Составляющая с частотой  $2\omega_c$  устраняется ФНЧ, и в результате формируется низкочастотный сигнал вида  $0,5U_0 u_a(t)$ . Отделяя постоянную составляющую  $0,5U_0 U_c$ , например, при помощи разделительного конденсатора, получаем сигнал вида  $0,5U_0 U_c m_a x(t)$ , форма которого определяется передаваемым сообщением  $x(t)$ .

### Основные характеристики и параметры амплитудного детектора

Детекторная характеристика представляет собой зависимость постоянной составляющей  $U$  – выходного напряжения от изменения амплитуды  $U_c$  немодулированного сигнала  $u_c(t) = U_c \cos(\omega_c t)$ . Уровень нелинейных искажений, имеющих место при детектировании, определяется видом детекторной характеристики. По детекторной характеристике можно определить диапазон изменения амплитуды  $u_a(t)$  модулированного сигнала (4.1), при котором нелинейные искажения модулирующего сообщения  $x(t)$  не будут превышать определенного предела.

Крутизна детекторной характеристики определяется как производная:

$$S_{ад} = \frac{dU}{dU_c}$$

является безразмерной величиной и по аналогии с показателями любого усилительного узла характеризует передаточные свойства детектора.

Коэффициент нелинейных искажений – численная мера нелинейных искажений модулирующего сообщения  $x(t)$  при гармонической модуляции с частотой  $\Omega = 2\pi F$ :

$$k_H = \sqrt{U_{2\Omega}^2 + U_{3\Omega}^2 + \dots + U_{n\Omega}^2} / U_{1\Omega}$$

где  $U_{n\Omega}$  – амплитуда колебания с частотой  $n\Omega$  на выходе амплитудного детектора.

Коэффициент передачи амплитудного детектора определяется при гармонической модуляции с частотой  $\Omega$  отношением

$$k\Omega = U\Omega / m * U_{ac}$$

где  $U_\Omega$  – амплитуда колебания с частотой  $\Omega$  на выходе амплитудного детектора.

Частотная характеристика является зависимостью коэффициента передачи амплитудного детектора от частоты модуляции  $k_\Omega = f(\Omega)$ .

Коэффициент фильтрации амплитудного детектора задается отношением

$$k\phi = U_c / U_\omega,$$

где  $U_\omega$  – амплитуда первой гармоники высокочастотного колебания на выходе амплитудного детектора.

### Принцип действия и характеристики диодного детектора

Схема амплитудного диодного детектора изображена на рис. 1. На вход детектора поступает высокочастотный сигнал  $u_c(t)$ . Детектор представляет собой

последовательное соединение диода VD и нагрузочной цепи (фильтра): конденсатора  $C_H$  и резистора  $R_H$ , включенных параллельно. С нагрузочной цепи снимается выходное колебание  $u_{\text{ВЫХ}}(t)$ .

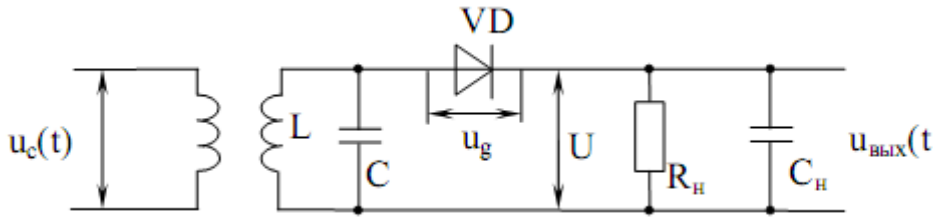


Рис. 1. Принципиальная схема амплитудного диодного детектора

Значение тока через диод  $i_g$  для режима покоя  $u_c(t) = 0$  может быть найдено из уравнений:

$$\begin{cases} i_g = f(u_g), \\ i_g = -\frac{u_g}{R_i} \end{cases} \quad (5)$$

где  $U_g$  – напряжение на диоде VD (см. рис. 1).

Первое уравнение – это уравнение вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода как безынерционного нелинейного элемента. Из-за нелинейного характера ВАХ форма тока через диод  $i_g$  при синусоидальной форме сигнала  $u_c(t)$  не является синусоидальной. В составе тока появляется постоянная составляющая, которая, протекая по резистору  $R_H$ , создает падение напряжения  $U=$ , которое смещает положение рабочей точки. При увеличении амплитуды входного напряжения смещение рабочей точки увеличивается и ток через диод будет приближаться по форме к однополярным импульсам, открывающим диод при положительных значениях входного напряжения.

На рис. 2 приведены формы напряжений и токов на входе детектора для двух случаев, когда амплитуды входных сигналов удовлетворяют неравенству  $U_c^{(1)} < U_c^{(2)}$ . Тогда постоянные составляющие напряжений  $U_{\text{ср}}^{(1)} < U_{\text{ср}}^{(2)}$  и  $I_{\text{ср}}^{(1)} < I_{\text{ср}}^{(2)}$ . На этом же рисунке условно изображена зависимость  $i_g = f(t)$ .

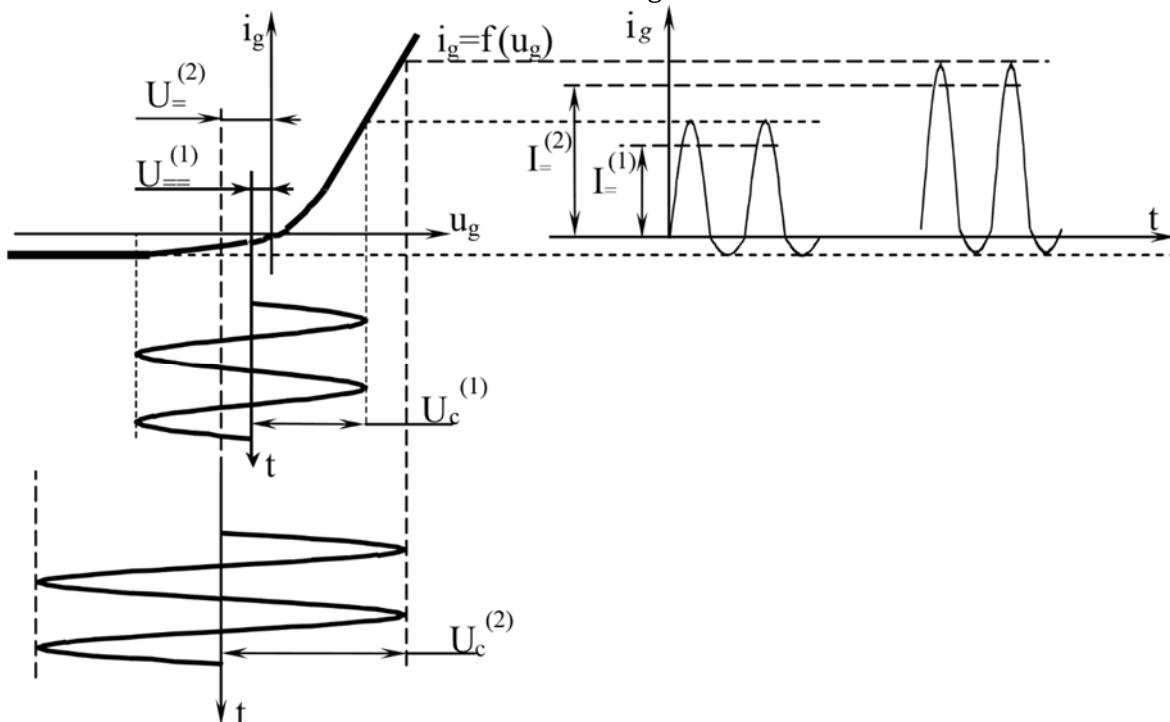


Рис. 2. Детектирование амплитудно-модулированных сигналов

Вольт-амперная характеристика диода в широком диапазоне токов достаточно точно аппроксимируется экспоненциальной зависимостью:

$$i_g = I_{o6} \left( e^{\frac{u_g(t)}{\varphi_T}} - 1 \right) \quad (6)$$

где  $I_{o6}$  – абсолютное значение величины обратного тока диода;  $\varphi_T$  – температурный потенциал, равный 26 мВ при  $T = 300$  К. Полагая напряжение на диоде равным  $u_g(t) = u_a(t) \cos(\omega_c t) - U_{\omega}$ , подставляя  $u_g(t)$  в (6) и раскладывая в ряд по функциям Бесселя  $J_k$ , получаем:

$$i_g = I_{o6} \left\{ e^{-U_g/\varphi_T} \left[ J_0 \left( \frac{u_a(t)}{\varphi_T} \right) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_k(u_a(t)/\varphi_T) \cos k\omega_c t \right] - 1 \right\} \quad (7)$$

Выделим в (4.7) следующие компоненты токов:

постоянного 
$$i_g = I_{o6} \left[ e^{-U_g/\varphi_T} J_0 \left( \frac{u_a(t)}{\varphi_T} \right) - 1 \right],$$

переменного с частотой 
$$i_g = 2I_{o6} \left[ e^{-U_g/\varphi_T} J_1 \left( \frac{u_a(t)}{\varphi_T} \right) - 1 \right] \quad (8)$$

переменного с частотой 
$$i_{2g} = 2I_{o6} \left[ e^{-U_g/\varphi_T} J_2 \left( \frac{u_a(t)}{\varphi_T} \right) - 1 \right]$$

и так далее.

Зависимость постоянной составляющей  $U_{\omega}$  от амплитуды приложенного напряжения  $U_c$  дается детекторной характеристикой (рис. 3).

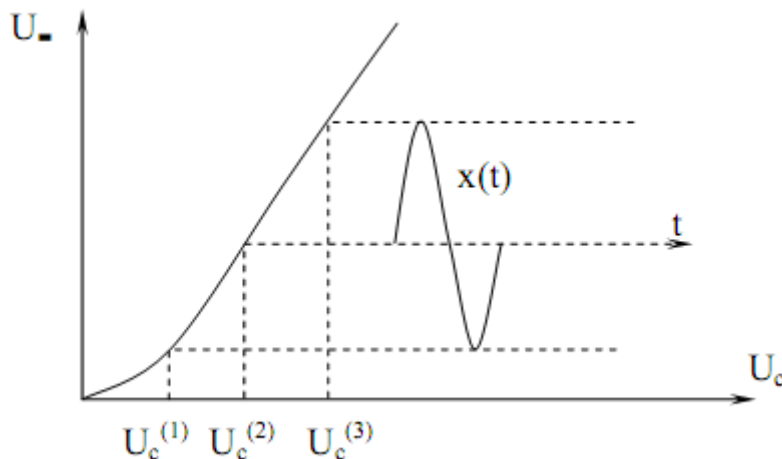


Рис. 3. Детекторная характеристика диодного детектора

Из (8) и (1) следует, что при  $x(t) = 0$  детекторная характеристика может быть записана в виде

$$U_{\omega} = -I_{o6} R_H \left[ e^{-U_g/\varphi_T} J_0 \left( \frac{u_a(t)}{\varphi_T} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

Анализ выражения (4.9) позволяет сделать два основных вывода:

- с увеличением  $R_H$  возрастает крутизна детекторной характеристики;
- с увеличением уровня сигнала снижается степень нелинейности детекторной характеристики, и наоборот, детектирование «слабых» сигналов сопровождается значительными нелинейными искажениями закона модуляции.

В этой связи различают два режима работы диодного амплитудного детектора:

- детектирование «слабых» сигналов;
- детектирование «сильных» сигналов.

В режиме «слабых» сигналов, представив функцию  $J_0(u_a(t)/\varphi_T)$  в виде ряда, нетрудно показать, что детекторная характеристика имеет квадратичный вид, т. е.

$$U_{\omega} = AU_c^2 [1 + m_a x(t)]^2 \quad (10)$$

и соответственно коэффициент нелинейных искажений в этом случае при  $x(t) = 0$  равен

$$k_H = \frac{AU_c^2 0,5m_a^2}{AU_c^2 2m_a} = \frac{m_a}{4} \quad (11)$$

Допустимое значение  $k_H$ , например, в системах радиовещания, не превышает нескольких процентов ( $k_H \leq 5\%$ ), что налагает ограничения на допустимый коэффициент глубины амплитудной модуляции в передатчике. Дополнительным недостатком работы на квадратичном участке детекторной характеристики является малый коэффициент передачи, затрудняющий работу последующих усилительных каскадов.

В режиме «сильных» сигналов вольт-амперная характеристика диода аппроксимируется линейной зависимостью  $i_g = f(U_g)$  (5). В этом случае появляется заметное напряжение смещения на аноде диода из-за значительной величины  $U_=\$ , т. е. диод работает в режиме отсечки, и ток проходит через него только в течение тех интервалов времени, когда  $U_c - U_=> 0$ . На рис. 4 показан угол отсечки  $\theta$  тока диода. На интервале времени, соответствующем углу  $2\theta$ , происходит быстрый заряд конденсатора  $C_H$  (рис. 1) через открытый диод. В течение времени, когда диод закрыт, конденсатор  $C_H$  разряжается через резистор  $R_H$ .

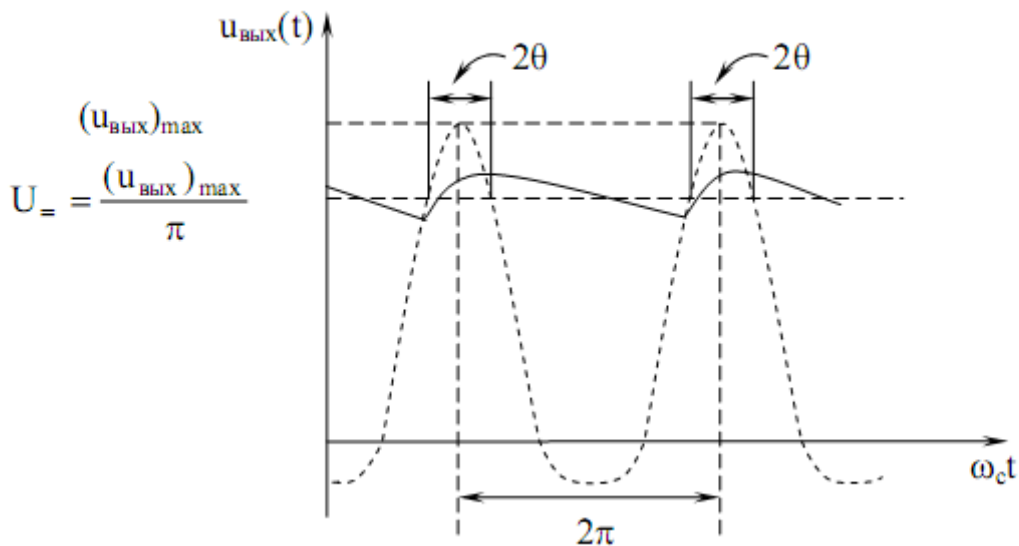


Рис. 4. Форма выходного напряжения диодного детектора

Полагая, что  $u_c(t) = U_c \cos \omega_c t$ , ток открытого диода определяется выражением

$$i_g = S(U_c \cos(\omega_c t - U_)) = SU_ \left( \cos \left( \omega_c t - \frac{U_}{U_c} \right) \right) \quad (12)$$

где  $U_ / U_c = \cos \theta$  – косинус угла отсечки,  $S$  – крутизна вольт-амперной характеристики на рабочем участке.

Интегрируя (12) на интервале  $[0, 2\pi]$ , можно получить выражение для  $U_ =$  в виде

$$U_ = = \frac{SU_c R_1}{\pi} (\sin \theta - \cos \theta) \quad (13)$$

Учитывая, что  $U_ = / U_c = \cos \theta$ , для малых значений угла  $\theta$  получаем

$$\theta \approx \sqrt[3]{\frac{3\pi}{SR_H}} \quad (14)$$

т. е. угол отсечки определяется лишь значениями  $S$  и  $R_H$  и не зависит от величины  $U_c$ .

Для амплитудно-модулированного сигнала имеем

$$u_{\text{вых}}(t) = \cos \theta U_c [1 + m_a x(t)] = U_c \cos \theta + m_a U_c x(t) \cos \theta, \quad (15)$$

т. е., несмотря на наличие угла отсечки, диодный детектор и в режиме «сильных»

сигналов является линейным детектором.

Нелинейные искажения при детектировании «сильных» сигналов определяются:

- Нелинейностью начального участка вольт-амперной характеристики диода. При этом, чтобы гарантировать работу вне существенно нелинейного участка, например, в области  $0 \leq U_c \leq U_c^{(1)}$  на рис. 2, необходимо выбирать значение  $U_c$  исходя из неравенства

$$U_c \geq \frac{U_c^{(1)}}{1-m_a} \quad (16)$$

Различием сопротивлений детектора по постоянному и переменному токам. При использовании усилителя с входным сопротивлением  $R_{yHЧ} \geq (5 \dots 10)R_H$  и выборе величины емкости разделительного конденсатора  $C_p$ , обеспечивающей его малое сопротивление по переменному току по сравнению с  $R_{yHЧ}$  из условия

$$C_p > \frac{1}{\Omega_{\min} R_{yHЧ}} \quad (17)$$

где  $\Omega_{\min}$  – минимальная частота модулирующего сигнала, этим видом нелинейных искажений можно пренебречь.

- Нелинейностью процесса заряда и разряда конденсатора  $C_H$ . При этом возникает фазовый сдвиг между напряжениями  $U_+$  и  $u_a(t)$ . В моменты времени, когда  $u_a(t) < U_+$ , конденсатор  $C_H$  будет разряжаться через резистор  $R_H$  по экспоненциальному закону. Анализ показывает, что малый уровень нелинейных искажений этого вида обеспечивается при условии

$$R_H C_H \Omega_{\max} \leq \frac{\sqrt{1-m_a^2}}{m_a} \quad (18)$$

где  $\Omega_{\max}$  – максимальная частота модулирующего сигнала.

Кроме рассмотренных выше нелинейных искажений в режиме детектирования «сильных» сигналов возникают частотные искажения, обусловленные присутствием в выходном напряжении гармоник высокочастотного колебания. С целью уменьшения уровня колебания высокой частоты на выходе амплитудного детектора величина емкости конденсатора  $C_H$  выбирается из условия

$$\frac{1}{\omega_c C_H} \ll R_H \quad (19)$$

а коэффициент фильтрации в этом случае определяется выражением

$$k_\phi = \omega_c C_H r_g \quad (20)$$

где  $r_g$  – сопротивление диода в открытом состоянии.

### Транзисторный детектор

Основным преимуществом такого детектора, по сравнению с диодным, является возможность одновременного детектирования и усиления сигнала, что облегчает работу последующих каскадов. В транзисторных детекторах детектирование может выполняться за счет нелинейной вольт-амперной характеристики базового, коллекторного и эмиттерного токов; причем далеко не всегда возможно создание чисто базового, коллекторного или эмиттерного детектирования и на практике используют смешанные режимы, например, коллекторно-базовый или эмиттерно-базовый режим детектирования.

Входное сопротивление  $R_{вх}$  и входную емкость  $C_{вх}$  транзисторного детектора при малых и средних амплитудах входного сигнала в первом приближении находят так же, как аналогичные параметры для усилительных схем в режиме короткого замыкания на выходе. При наличии отсечки базового тока (в режиме «сильных» сигналов) входное сопротивление транзисторного детектора оказывается выше, чем у диодного.

Благодаря указанным преимуществам в интегральных микросхемах, как правило, используются транзисторные детекторы. Примером является микросхема, состоящая из усилителя промежуточной частоты с автоматической регулировкой усиления и

амплитудного транзисторного детектора.

### Синхронный детектор

Для реализации синхронного детектора обычно используется аналоговый перемножитель сигналов. При этом на один из входов аналогового перемножителя поступает амплитудно-модулированный сигнал  $u_c(t)$  (1), на другой вход – опорное когерентное колебание  $u_0(t)$ . В результате перемножения колебаний на выходе образуются низкочастотная составляющая  $0,5u_a(t)U_0$  и высокочастотная составляющая  $0,5u_a(t)U_0 \cos(2\omega_c t)$ , которая устраняется на выходе с помощью фильтра низкой частоты  $C_H R_H$ . К основным преимуществам синхронного детектора относятся:

- малые нелинейные искажения  $u_{\text{вых}}(t)$ , вследствие работы при достаточно больших напряжениях опорного колебания в режиме детектирования «сильных» сигналов;
- возможность подключения в качестве нагрузки ФНЧ с полосой прозрачности, величина которой не зависит от значений частоты  $\Omega_{\text{max}}$  модулирующего колебания;
- высокое входное и низкое выходное сопротивления, что обеспечивает хорошее согласование с соседними каскадами устройств обработки сигналов.

Однако преимущества синхронного детектирования амплитудно-модулированных сигналов реализуются лишь при точной синхронизации опорного и несущего колебаний. В реальных устройствах возможен фазовый сдвиг  $\psi$  между указанными колебаниями, вызванный задержкой в цепи формирования опорного колебания.

При наличии фазового сдвига  $\psi \neq 0$  амплитуда колебания на выходе синхронного детектора будет равна

$$u_\psi(t) = \sqrt{u_0^2(t) + u_c^2(t) + 2u_0(t)u_c(t)\cos\psi} \quad (21)$$

Разлагая (21) в степенной ряд и ограничиваясь первыми членами разложения, можно получить

$$u_\psi(t) \cong u_0(t) + u_c(t)\cos\psi + u_c^2(t)\sin^2\psi$$

Если входной сигнал  $u(t)$  имеет амплитудную модуляцию вида  $u_a(t) = U_c[1 + m_a \cos\Omega t]$ , то полезный сигнал на выходе синхронного детектора (без учета коэффициентов усиления) равен

$$u_{\text{вых}}(t) = 0,5U_c[1 + m_a \cos\Omega t]U_0 \cos\psi \quad (22)$$

Из выражения (22) следует, что максимальное значение  $u_{\text{вых}}(t)$  достигается при величине  $\psi = 2k\pi$ , что и следовало ожидать.

### Лабораторная работа «Амплитудный детектор»

Цель лабораторной работы – экспериментальное исследование основных характеристик и параметров амплитудных детекторов, выполненных на основе:

- диодного детектора (тип 1);
- транзисторного детектора (тип 2);
- синхронного детектора на основе аналогового перемножителя (тип 3).

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для автоматизированных экспериментальных исследований и может использоваться в автономном режиме и режиме использования внешних измерительных приборов.



Рис. 5. Вид лицевой панели

Вид лицевой панели лабораторной установки приведен на рис. 5. На левом верхнем поле изображена функциональная схема установки. На нижнем поле расположена панель ручного управления с переключателями режимов работы, на правом поле – цифробуквенный дисплей с кнопками управления.

*Состав установки*

Лабораторная установка включает в себя генератор входного сигнала и блок детекторов (см. рис. 5).

Генератор входного сигнала формирует амплитудно-модулированный сигнал с регулируемой амплитудой, частотой и состоит:

- из генератора высокой частоты (ГВЧ) с частотой генерации  $f_c = 465 \text{ кГц}$  и регулируемой в диапазонах 0–0,1 В и 0,1–1,0 В амплитудой колебания  $U_G$ ;
- генератора низкой частоты (ГНЧ) с регулируемой в пределах 30 Гц– 15 кГц частотой генерации и постоянной амплитудой колебания  $U_M$ ;
- модулятора, формирующего амплитудно-модулированный сигнал с постоянным коэффициентом глубины модуляции  $m_a = 30 \%$ .

Блок детекторов содержит:

- диодный детектор, к выходу которого подключены коммутируемые независимо элементы нагрузки – резисторы и конденсаторы: R1, R2, C1 и C2;
- транзисторный детектор с коммутируемыми элементами нагрузки R1, R2, C1 и C2 на выходе;
- синхронный детектор, выполненный на основе аналогового перемножителя.

Значения параметров для диодного детектора: R1 = 20 кОм, R2 = 10 кОм, C1 = 4700 пФ, C2 = 1000 пФ.

К выходам детекторов через разделительный конденсатор  $C_p = 0,47 \text{ мкФ}$  подключен нагрузочный резистор  $R = 20 \text{ кОм}$ . На задней стенке установки имеются контрольные выходы: «Вых 1» – напряжение  $u_c(t)$ , «Вых 2» – напряжение  $U_\Omega$ , «Вых 3» – напряжение  $U_+$ .

*Панель ручного управления*

Панель ручного управления состоит из трех полей:

Поле «ГВЧ» – генератора высокочастотного сигнала УГ:

«УРОВЕНЬ» – кнопка переключения уровня сигнала;

«АМПЛИТУДА» – потенциометр регулировки амплитуды сигнала.

Поле «ГНЧ» – генератора низкой частоты:

«ВКЛ» – кнопка включения генератора;

«ЧАСТОТА» – потенциометр плавной регулировки частоты ГНЧ;

«<<», «>>» – кнопки переключения диапазонов («меньше», «больше»).

Поле «ДЕТЕКТОРЫ» – детекторов сигнала:

«ТИП» – кнопка переключения типа исследуемого детектора; «НАГРУЗКА» – кнопки подключения нагрузок резисторов и конденсаторов: R1, R2, C1, C2.

#### *Поле цифробуквенного дисплея*

На цифробуквенном дисплее отображаются измеряемые величины и номер пункта работы. Под дисплеем расположены следующие кнопки:

«<<<» – кнопка перелистывания страниц с пунктами работы к началу; «>>>» – кнопка перелистывания страниц с пунктами работы к концу; «Т» – кнопка сброса контроллера управления.

### **Программа и порядок выполнения работы**

Ознакомившись с описанием лабораторной установки и составив план проведения эксперимента, включить питание и саму установку нажатием кнопки «Вкл».

Все переключения производятся с помощью кнопок на передней панели установки, включенное состояние кнопки индицируется светодиодом. Измерения выполняются встроенными приборами под управлением микроконтроллера, а результаты измерений выводятся на цифробуквенный дисплей, расположенный на лицевой панели. Выбор измеряемых величин и подключение их к индикатору производятся кнопками выбора пункта лабораторной работы («<<<», «>>>»), расположенными вместе с кнопкой «сброс» («Т») под цифробуквенным дисплеем.

Для выполнения лабораторной работы предлагаются следующие задания.

#### **Задание 1.**

Измерение детекторной характеристики диодного детектора (тип 1)

Цель: получить зависимость постоянной составляющей  $U_{\text{ср}}$  на нагрузке диодного детектора от эффективного значения  $U_{\text{с}}$  входного сигнала без модуляции. Измерения провести для режимов «слабых» и «сильных» сигналов и для 2 значений нагрузки: R1, C1 и R2, C1.

Порядок проведения 1. Провести измерения:

в режиме «слабых» сигналов значение  $U_{\text{с}}$  изменять в интервале 0–250 мВ;

в режиме «сильных» сигналов значение  $U_{\text{с}}$  изменять в интервале 250 мВ–2,0 В.

2. Результаты измерений занести в таблицы.

#### **Задание 2.**

Измерение детекторной характеристики транзисторного детектора (тип 2)

Цель: получить зависимость постоянной составляющей  $U_{\text{ср}}$  на нагрузке транзисторного детектора от эффективного значения  $U_{\text{с}}$  входного сигнала без модуляции.

#### **Порядок выполнения**

1. Провести измерения для двух значений нагрузки: R1, C1 и R2, C1, изменяя значение  $U_{\text{с}}$  в интервале 0–30 мВ.

2. Результаты измерений занести в таблицы.

### Задание 3.

Измерение детекторной характеристики синхронного детектора (тип 3)

Цель: получить зависимость постоянной составляющей  $U_{\Omega}$  на нагрузке синхронного детектора от эффективного значения  $U_c$  входного сигнала без модуляции.

#### Порядок выполнения

1. Провести измерения, изменяя значение  $U_c$  в интервале 0–100 мВ.
2. Результаты измерений занести в таблицы.

### Задание 4.

Измерение частотных характеристик детекторов Цель: снять частотные характеристики детекторов  $U_{\Omega} = f(F)$ .

#### Порядок выполнения

1. Измерить эффективное значение  $U_{\Omega}$  низкой частоты на «закрытом» (без постоянной составляющей) выходе, изменяя частоту модуляции  $F$  в диапазоне 30 Гц–15 кГц при постоянном значении амплитуды сигнала  $U_c = \text{Const}$  (коэффициент глубины модуляции должен быть постоянным и равным  $m_a = 30\%$ ).

2. Для диодного детектора (тип 1) поддерживать значение амплитуды  $U_c \cong 1-1,5$  В. Измерения проводить при сопротивлении нагрузки  $R_1$  для трех значений нагрузочного конденсатора:  $C_1, C_2, C_1+C_2$ .

3. Для транзисторного детектора (тип 2) поддерживать значение амплитуды  $U_c = 10-15$  мВ. Измерения проводить при сопротивлении нагрузки  $R_1$  для трех значений нагрузочного конденсатора:  $C_1, C_2, C_1+C_2$ .

4. Для синхронного детектора (тип 3) поддерживать значение амплитуды  $U_c \cong 100$  мВ.

5. Результаты измерений занести в таблицы.

### Задание 5.

Определение коэффициента передачи детекторов

Цель: измерить зависимость коэффициента передачи для трех типов детекторов от величины эффективного значения напряжения входного сигнала  $k = U_{\Omega}/(m_a U_c)$  при фиксированных значениях коэффициента глубины модуляции  $m_a = 30\%$  и частоты модуляции  $F \approx 1$  кГц.

#### Порядок выполнения

1. Для диодного детектора (тип 1) измерения проводить при нагрузке  $R_1, C_1$ , изменяя величину  $U_c$  в пределах 250 мВ–2,0 В.

2. Для транзисторного детектора (тип 2) измерения проводить при нагрузке  $R_1, C_1$ , изменяя величину  $U_c$  в пределах 0–30 мВ.

3. Для синхронного детектора (тип 3) выполнить измерения в диапазоне изменения  $U_c$  0–100 мВ.

4. Результаты измерений занести в таблицы.

#### Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы исследуемых амплитудных детекторов.
3. Результаты измерений для трех типов амплитудных детекторов.

• Таблицы с результатами измерений и графики экспериментальных зависимостей постоянной составляющей на выходе  $U_{\Omega}$  от эффективного значения  $U_c$  входного сигнала без модуляции.

Для диодного детектора (задание 1):

в режиме «слабых» сигналов при нагрузке  $R_1, C_1$  и  $R_2, C_1$ ; в режиме

«сильных» сигналов при нагрузке R1, C1 и R2, C1.

Для транзисторного детектора (задание 2): при нагрузке R1, C1 и R2, C1.

Для синхронного детектора (задание 3).

• Таблицы с результатами измерений частотной характеристики и графики экспериментальных зависимостей  $U_{\Omega} = f(F)$  при фиксированных значениях амплитуды входного сигнала  $U_c$  и индекса модуляции  $m_a = 30\%$ .

Для диодного детектора: в режиме «сильных» сигналов для трех значений нагрузки: R1, C1; R1, C2; R1, (C1 + C2).

Для транзисторного детектора: для трех значений нагрузки R1, C1; R1, C2; R1, (C1 + C2).

Для синхронного детектора.

• Таблицы с результатами измерений коэффициента передачи детекторов и экспериментальные зависимости  $k = f(U_c)$  при фиксированных значениях частоты модуляции  $F = 1$  кГц и индекса модуляции  $m_{am} = 30\%$  в диапазоне изменения величины входного сигнала  $U_c$ .

Для диодного детектора: с нагрузкой R1, C1.

Для транзисторного детектора: с нагрузкой R1, C1.

Для синхронного детектора.

4. Анализ полученных результатов.

- Объяснить характер зависимостей  $U = f(U_c)$  (задания 1–3).
  - Провести анализ частотных свойств детекторов (задание 4).
  - Сравнить коэффициенты передачи различных типов детекторов (задание 5).
5. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняют амплитудные детекторы? По каким признакам классифицируются такие детекторы и каковы их параметры?
2. Каковы принципы работы и схемы амплитудных детекторов? В чем их достоинства и недостатки? Какие особенности синхронных детекторов?
3. Как можно представить эквивалентную схему детектора? Как определить коэффициент передачи и входное сопротивление детектора на полупроводниковом диоде?
4. Какие искажения могут претерпевать сигналы в детекторах? Какие меры следует предпринимать для уменьшения искажений сигналов?
5. Какие процессы происходят при детектировании двух высокочастотных напряжений с различными частотами? Как определяется отношение сигнал/помеха на выходе детектора?
6. Что происходит при совместном действии сигнала и шума на амплитудный детектор? Как изменяется спектр сигнала и шума на выходе амплитудного детектора?
7. Какова методика измерения детекторной характеристики детектора?
8. Какова методика измерения частотных характеристик детекторов?
9. Какова методика измерения коэффициента передачи детектора?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ЧАСТОТНЫЙ ДЕТЕКТОР

### Общие сведения

Частотным детектором (ЧД) называется устройство, предназначенное для получения на выходе напряжения, изменяющегося в соответствии с законом изменения частоты входного сигнала.

В частотных детекторах частотно-модулированное колебание преобразуется в колебание, модулированное по амплитуде и фазе, либо в последовательность импульсов, модулированных по частоте, с последующим применением амплитудного или фазового детектора и фильтра низкой частоты. При этом для воспроизведения формы модулирующего сообщения  $x(t)$  с наименьшими нелинейными искажениями детекторная характеристика должна быть линейной.

В аналитической форме частотно-модулированный сигнал (ЧМ сигнал) имеет вид

$$u_c(t) = U_c \sin \left[ \omega_c t + \Delta\omega_m \int_0^t x(t) dt \right]$$

где  $U_c$  – амплитуда входного сигнала со средней частотой  $\omega_c$ ;  $\Delta\omega_m$  – девиация частоты.

Распространенные методы получения информации о законе изменения мгновенной частоты  $\omega(t)$  сигнала  $u_c(t)$  основаны:

- на преобразовании изменения частоты колебания в изменение амплитуды с последующим детектированием амплитудно-модулированного сигнала;
- преобразовании изменения частоты колебания в изменение фазы с последующим детектированием с помощью фазового детектора;
- преобразовании ЧМ сигнала в последовательность импульсов с частотой следования, пропорциональной отклонению мгновенной частоты сигнала от средней частоты, с последующей низкочастотной фильтрацией.

### Основные характеристики частотного детектора

Детекторная характеристика представляет собой зависимость выходного напряжения  $u_{\text{ВЫХ}}$  от величины  $\Delta\omega$  отклонения мгновенной частоты сигнала относительно средней частоты  $\omega_c$ . Уровень нелинейных искажений, имеющий место при детектировании, определяется видом детекторной характеристики и тем меньше, чем меньше степень нелинейности этой характеристики. По виду детекторной характеристики можно определить допустимый диапазон изменения мгновенной частоты, при котором нелинейные искажения не будут превышать определенного предела.

Крутизна детекторной характеристики определяется для линейного участка этой характеристики как производная

$$S_{\text{чд}} = \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{d(\Delta\omega)}$$

По аналогии с параметром усилительных приборов крутизна  $S_{\text{чд}}$  характеризует передаточные свойства частотного детектора.

Коэффициент передачи частотного детектора определяется при гармонической модуляции  $x(t) = \cos(\Omega t)$  с частотой  $\Omega$  отношением

$$k_{\Omega} = \frac{U_{\Omega}}{U_c(\Delta\omega_m/\omega_c)}$$

где  $U_{\Omega}$  – амплитуда низкочастотного сигнала на выходе частотного детектора.

Частотная характеристика представляет собой зависимость амплитуды низкочастотного сигнала  $U_{\Omega}$  на выходе частотного детектора от частоты модуляции  $\Omega$  при условии постоянства амплитуды модулирующего сигнала. Для уменьшения зависимости результата частотного детектирования от паразитной амплитудной модуляции входного сигнала  $u_c(t)$ , вызванной, например, прохождением его через избирательные цепи предварительных каскадов с неравномерной АЧХ в полосе прозрачности, перед детектором обычно включают амплитудный ограничитель либо сам детектор строят

таким образом, чтобы в нем самом осуществлялось это ограничение.

Коэффициент подавления паразитной амплитудной модуляции характеризует степень подавления такой паразитной амплитудной модуляции.

### Частотные детекторы с преобразованием частотной модуляции в амплитудную модуляцию

Преобразование частотной модуляции в амплитудную может быть выполнено с помощью любой линейной электрической цепи, обладающей комплексной, зависящей от частоты, передаточной функцией  $K(j\omega)$ . Требуемая зависимость выражена особенно ярко у интегрирующей или дифференцирующей цепи, резонансной избирательной цепи и т. д.

Вызывая изменение амплитуды, зависящее от частоты, линейная цепь с коэффициентом передачи  $K(j\omega)$  и линейной фазочастотной характеристикой не изменяет частоты колебания  $u_c(t)$ , поэтому на выходе ее получается колебание, изменяющееся одновременно по частоте и по амплитуде. Это обстоятельство не препятствует осуществлению амплитудного детектирования, так как для относительно узкополосных сигналов колебание  $u_{\text{вых}}(t)$  на выходе амплитудного детектора определяется только амплитудной модуляцией и практически не зависит от изменения частоты колебания.

Рассмотрим преобразование частотной модуляции в амплитудную модуляцию с помощью резонансной избирательной цепи с передаточной функцией резонансного контура

$$K(j\omega) = \frac{1}{1+j\xi} \quad (1)$$

где  $\xi = (\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})Q$ ,  $\omega_0$  – резонансная частота контура,  $Q$  – добротность контура.

Схема частотного детектора на расстроенном контуре приведена на рис. 1. Входной высокочастотный сигнал  $u_c(t)$  поступает с избирательного контура усилительного каскада усилителя промежуточной частоты, к которому подключен LC-контур частотного детектора. Выход LC-контура соединен с амплитудным детектором, нагрузочной цепью которого является параллельное соединение конденсатора  $C_H$  и резистора  $R_H$ . К выходу амплитудного детектора подключается входной каскад усилителя низкой частоты.

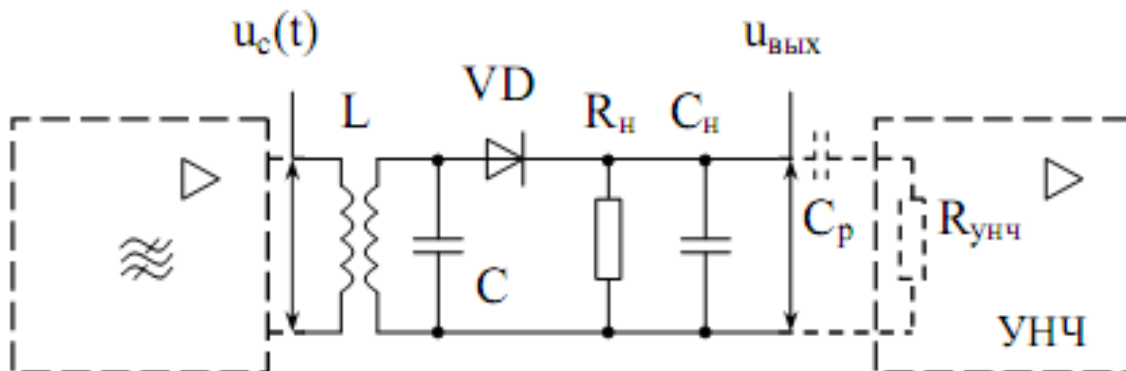
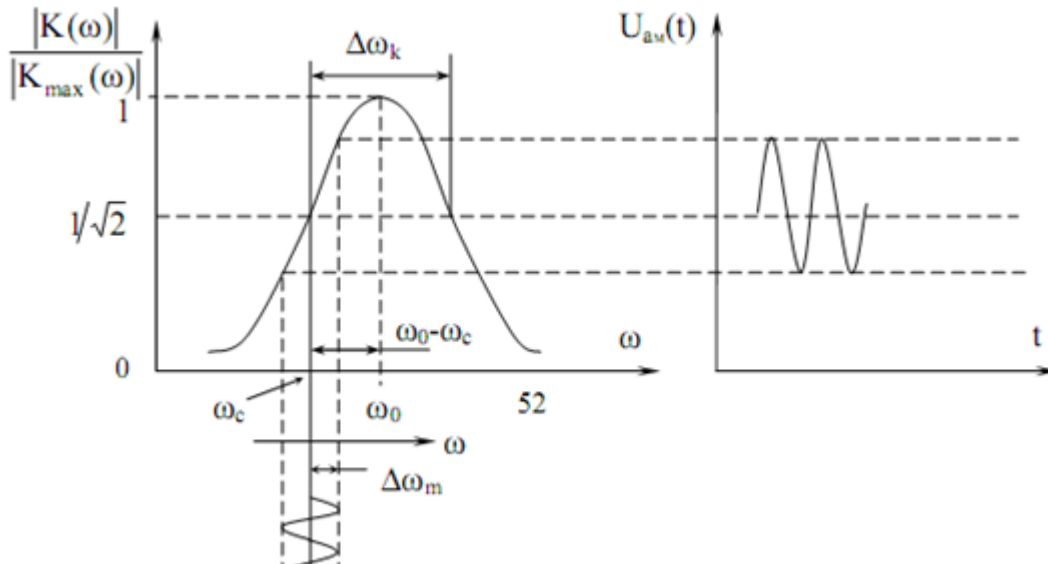


Рис. 1. Схема частотного детектора на расстроенном контуре

На рис. 2. показано формирование закона изменения амплитуды ЧМ сигнала при гармонической форме модулирующего сообщения  $x(t) = \cos(\Omega t)$ . На этом рисунке  $U_{aM}(t)$  – закон сопутствующей амплитудной модуляции. Контур LC имеет резонансную частоту  $\omega_0$ , и расстройка  $|\omega_c - \omega_0|$  выбирается так, чтобы получить максимальную крутизну преобразования. При расстройке, равной,  $\pm \Delta\omega_k / 2\sqrt{2}$  АЧХ цепи имеет близкие к линейному нарастающий и спадающий участки, на которых выбирается рабочая точка.



На практике частотные детекторы такого типа обычно реализуются на транзисторном избирательном усилителе с включением контура в коллекторную цепь. В этом случае комплексный коэффициент передачи принимает вид

$$K(j\omega) = \frac{K_u}{1+j\xi_{ЭКВ}} \quad (2)$$

где  $K_u$  – коэффициент усиления по напряжению транзисторного каскада;

$$\xi_{ЭКВ} = \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) Q_{ЭКВ} - \text{обобщенная расстройка};$$

$Q_{ЭКВ}$  – эквивалентная добротность контура с учетом влияния сопротивления и емкости нагрузки.

В предположении линейности амплитудного детектора постоянная составляющая напряжения на его выходе будет равна:

$$U_\omega = U_c |K(j\omega)| = \frac{U_c K_u}{\sqrt{1+\xi_{ЭКВ}^2}} \quad (3)$$

Уравнение (3.3) описывает детекторную характеристику, которая по форме повторяет амплитудно-частотную характеристику резонансного усилителя. Крутизна детекторной характеристики в координатах  $U_\omega, \xi_{ЭКВ}$

$$S_{чд} = \frac{dU_\omega}{d\xi_{ЭКВ}} = \frac{K_u U_c \xi_{ЭКВ}}{\sqrt{(1+\xi_{ЭКВ}^2)^3}} \quad (4)$$

и имеет максимальное значение при расстройке  $\xi = 1$ .

Достоинством частотных детекторов с одиночным расстроенным контуром является простота реализации схемы и ее настройки. К недостаткам относится высокий уровень нелинейных искажений, обусловленных нелинейностью АЧХ резонансного усилителя.

Значительное уменьшение уровня нелинейных искажений может быть получено при использовании балансного частотного детектора с двумя расстроенными контурами, изображенного на рис. 3.

Резонансные частоты  $\omega_0^{(1)}$  и  $\omega_0^{(2)}$  контуров L1C1 и L2C2 выбираются симметрично относительно средней частоты  $\omega_0$ , а постоянные составляющие напряжений на выходах амплитудных детекторов, подключенных к этим контурам, обеспечивают выходное напряжение как разность:

$$U_{\omega} = U_{\omega}^{(1)} - U_{\omega}^{(2)}$$

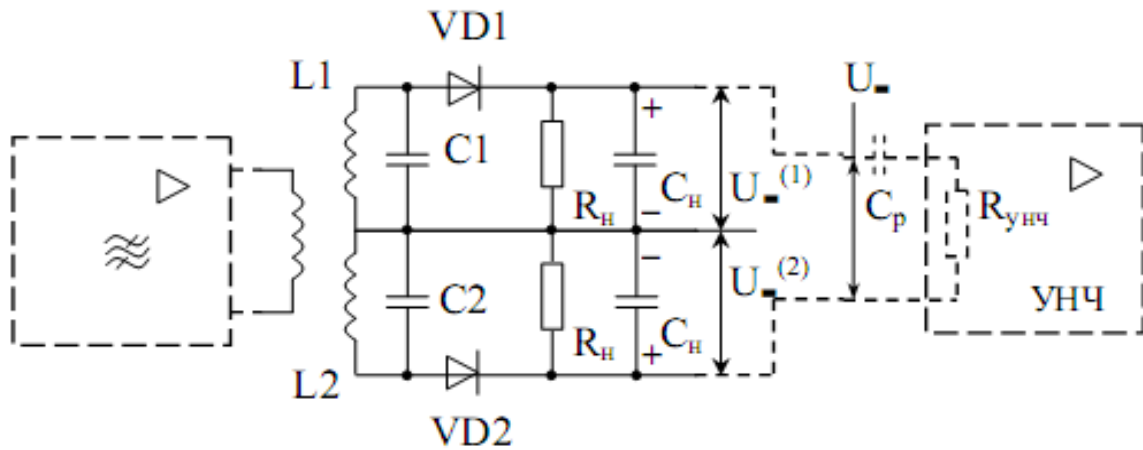


Рис. 3. Схема частотного детектора на двух расстроенных контурах

В предположении равенства резонансных сопротивлений контуров и при одинаковых коэффициентах передачи амплитудных детекторов получим следующее уравнение детекторной характеристики:

$$U_{\omega} = K_u U_c \left( \frac{1}{\sqrt{1+(\xi-\xi_0)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1+(\xi+\xi_0)^2}} \right) \quad (5)$$

$$\text{где } \xi_0 = \left| \frac{\omega_0^{(1)}}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_0^{(1)}} \right| Q_{\text{ЭКВ}} = \left| \frac{\omega_0^{(2)}}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_0^{(2)}} \right| Q_{\text{ЭКВ}}$$

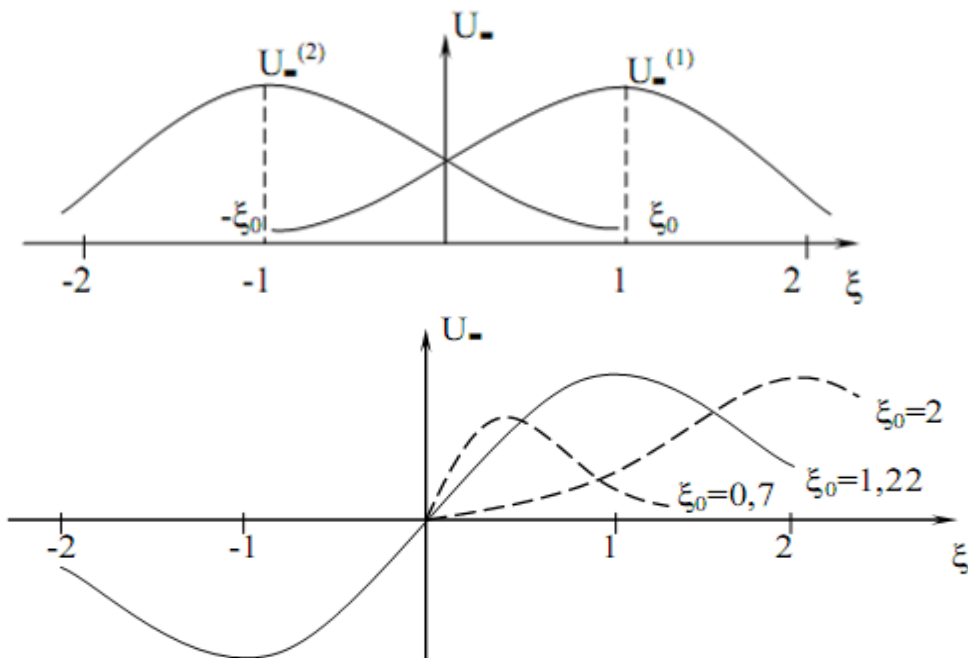


Рис. 4. Детекторная характеристика частотного детектора на двух расстроенных контурах

Вид детекторной характеристики приведен на рис. 4. Крутизна детекторной характеристики при  $\xi = 0$  равна:

$$S_{\text{чд}} = \frac{dU_{\omega}}{d\xi_0} = K_u U_c \frac{2\xi_0}{\sqrt{(1+\xi_0^2)^3}} \quad (6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что максимальное значение крутизны достигается при значении  $\xi_0 = 1/\sqrt{2}$ . Однако наименьшая степень нелинейных искажений в диапазоне от  $\omega_0^{(1)}$  до  $\omega_0^{(2)}$  достигается при значении

$$\xi_0 = \sqrt{1,5}.$$

Так как величина  $U_{\text{с}}$  зависит от уровня входного сигнала  $U_c$ , перед частотным детектором необходим амплитудный ограничитель, устраняющий влияние изменений амплитуды  $U_c$  на уровень выходного напряжения.

### Частотные детекторы с преобразованием частотной модуляции в фазовую модуляцию

Преобразование частотно-модулированного колебания в колебание, модулированное по фазе, может быть выполнено с помощью линейной цепи, обеспечивающей линейную зависимость фазы выходного напряжения от частоты.

Пусть на входе цепи, вносящей задержку  $\tau$ , действует ЧМ сигнал

$$U_c(t) = U_c \sin[\omega_c t + \varphi(t)],$$

частота которого изменяется по закону  $\omega(t) = \omega_c + d\varphi(t)/dt$ . Тогда колебание на выходе такой линейной цепи имеет вид

$$U_{\text{вых}}(t) = U_c \sin[\omega_c(t - \tau) + \varphi(t - \tau)]. \quad (7)$$

Фазовый сдвиг выходного напряжения относительно входного равен:

$$\Delta\varphi(t) = \omega_c \tau + \varphi(t) - \varphi(t - \tau) = \omega_c \tau + \frac{\tau[\varphi(t) - \varphi(t - \tau)]}{\tau} \quad (8)$$

Учитывая, что

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\varphi(t) - \varphi(t - \tau)}{\tau} = \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

из (3.8) получим

$$\Delta\varphi(t) \approx \left[ \omega_c + \frac{d\varphi(t)}{dt} \right] \tau = \tau \omega(t) \quad (9)$$

Таким образом, при малом значении  $\tau$  закон изменения разности фаз ЧМ сигнала на выходе линейной цепи совпадает с законом изменения частоты входного сигнала.

При реализации частотного детектора на основе такого представления используются относительно линейные участки фазочастотной характеристики, например, избирательной цепи с передаточной функцией  $K(j\omega)$  вида (2).

Структурная схема подобного частотного детектора приведена на рис. 5.

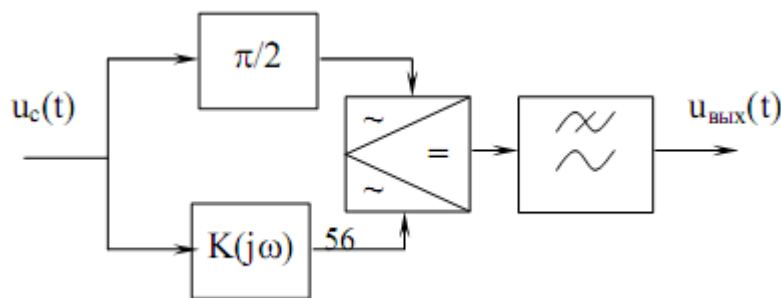


Рис. 5. Обобщенная схема частотного детектора с преобразованием частотной модуляции в фазовую

Для поворота фазы входного сигнала на угол  $\pi/2$  используется аналоговый широкополосный фазовращатель. В этом случае детекторная характеристика частотного детектора будет проходить через нуль.

Мгновенная разность фаз ЧМ сигнала на входе и выходе избирательного контура определяется по фазочастотной характеристике контура для установившегося состояния:

$$\theta(\xi) = \frac{\pi}{2} - \arctg(\xi) \quad (10)$$

Эта характеристика имеет близкий к линейному участок в области частотных расстроек  $\xi \cong 0$  и, следовательно, может быть использована для преобразования входного ЧМ сигнала в колебание с модуляцией по фазе.

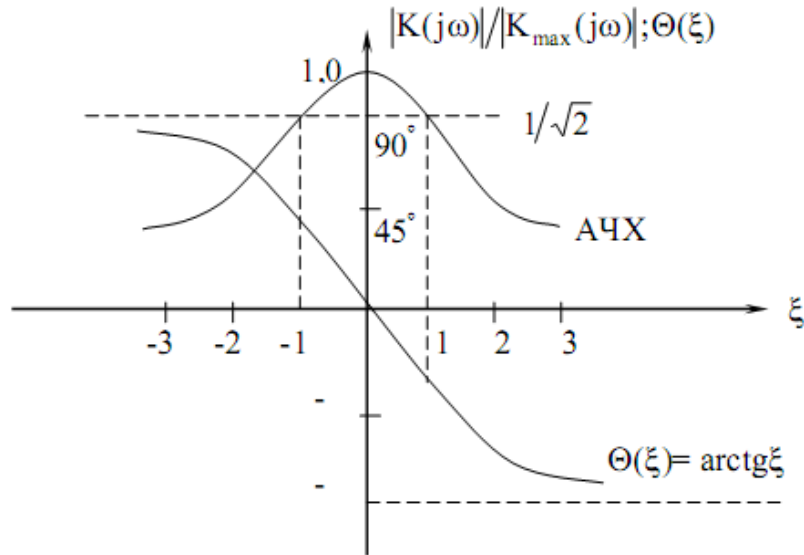


Рис. 6. Нормированные амплитудная и фазочастотная характеристики избирательного контура

Отметим, что в колебании на выходе избирательной цепи будет присутствовать сопутствующая амплитудная модуляция. Для устранения влияния на форму выходного напряжения сопутствующей амплитудной модуляции перед фазовым детектором включают амплитудный ограничитель либо сам фазовый детектор переводят в режим работы с ограничением.

### Частотный детектор на основе аналогового перемножителя

Выходное напряжение частотного детектора, выполненного на основе аналогового перемножителя сигналов, при условии, что сдвиг по фазе между входным и опорным сигналами составляет угол  $\pi/2$ , определяется выражением

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = C \sin\{\Delta\varphi(t) - \sin[2\omega_c t + \varphi(t) + \Delta\varphi(t)]\}, \quad (11)$$

где  $C$  – масштабный коэффициент аналогового перемножителя.

Детекторная характеристика частотного детектора на основе аналогового перемножителя в режиме ограничения входного и опорного  $u_{\text{оп}}(t)$  сигналов будет определяться следующим выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) \cong 2I_H R_H \Delta\varphi(t) / \pi = 2I_H R_H / \pi (\arctg\xi), \quad (12)$$

где  $I_H, R_H$  – сопротивление и ток в нагрузке детектора.

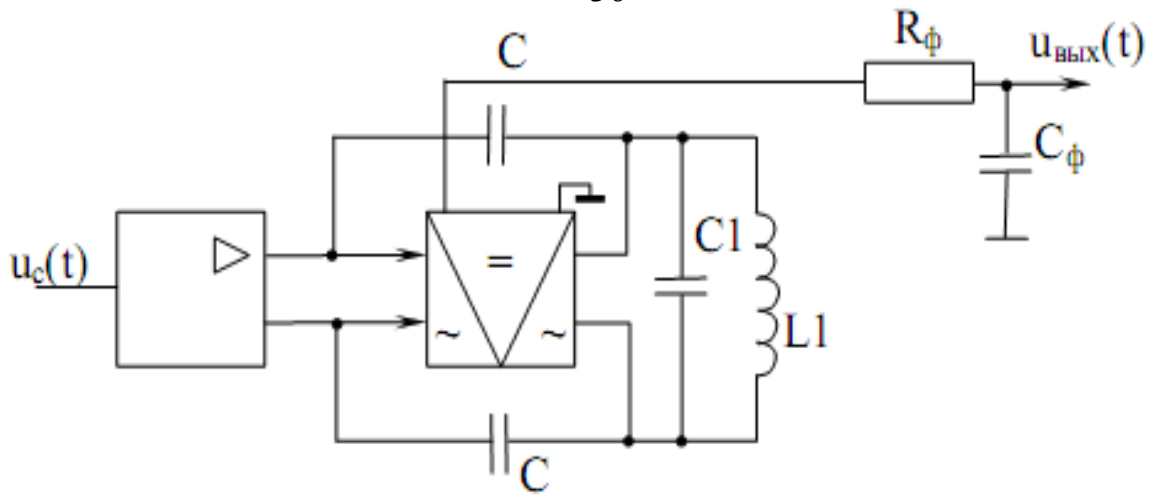


Рис. 7. Схема частотного детектора на аналоговом перемножителе с ограничением входного и опорного сигналов

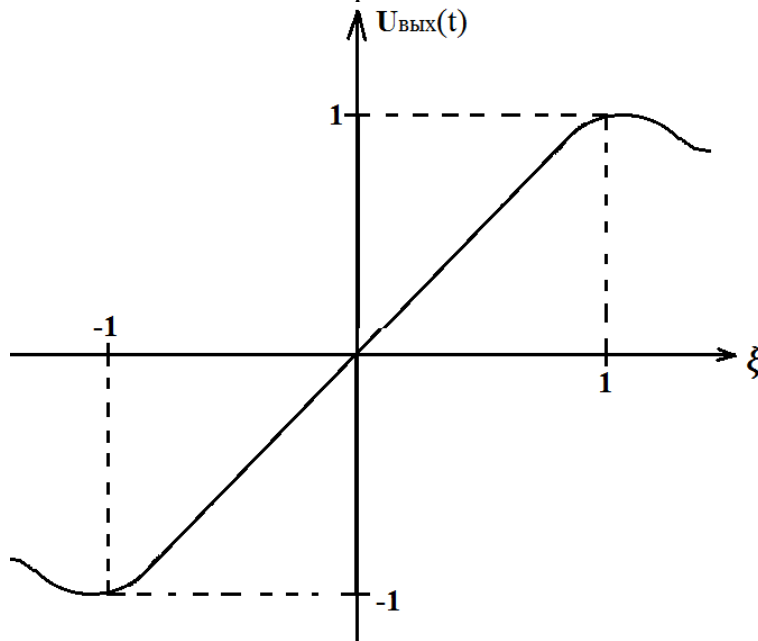


Рис. 8. Детекторная характеристика частотного детектора на основе аналогового перемножителя

Схема частотного детектора на основе аналогового перемножителя, где в качестве нагрузки используется фильтр низких частот  $R_\phi$ ,  $C_\phi$ , приведена на рис. 7, а детекторная характеристика – на рис. 8.

Такие частотные детекторы, как правило, реализуются в составе монолитных интегральных схем, выполняющих функции усиления/ограничения сигналов промежуточной частоты, частотную демодуляцию сигналов, предварительное усиление и регулировку усиления сигналов низкой частоты.

### Дробный частотный детектор

При отсутствии амплитудного ограничения входного колебания  $u_c(t)$  выходное напряжение частотного детектора с расстроенными избирательными цепями или на основе аналогового перемножителя оказывается зависимым не только от значения  $\varphi(t)$ , но и от величины  $U_c$ . Этому недостатка лишен дробный частотный детектор, или детектор отношений (рис. 9).

Дробный частотный детектор содержит два связанных контура LC и  $L_g C_g$ , настроенных на среднюю частоту входного сигнала  $\omega_c$ , причем выходной контур  $L_g C_g$  включен по схеме со средней точкой и в обмотках его формируются противофазные напряжения –  $U_g/2$ . На резонансной частоте  $\omega_0 = \omega_c$  контуров LC и  $L_g C_g$  напряжение на



соответствующем изменении угла отсечки токов через диоды, а именно при  $|U_{g2}| > |U_{g1}|$  имеем  $\theta_1 > \theta_2$ . Если  $|U_{g2}| < |U_{g1}|$ , то  $\theta_1 < \theta_2$ . Следовательно, в дробном детекторе при изменении частоты сигнала изменяются углы отсечки токов диодов.

Выходное напряжение дробного детектора может быть записано в виде

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\omega}^{(2)} - \frac{U_{\omega}^{(1)} + U_{\omega}^{(2)}}{2} = (U_{\omega}^{(2)} - U_{\omega}^{(1)})/2 \quad (14)$$

Выражение (14) можно переписать в форме

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\omega}^{(1)} + U_{\omega}^{(2)}}{2} \times \frac{\frac{U_{\omega}^{(2)}}{U_{\omega}^{(1)}} - 1}{\frac{U_{\omega}^{(2)}}{U_{\omega}^{(1)}} + 1} \quad (15)$$

Выбирая постоянную времени исходя из следующего неравенства:

$$C_0(R_1 + R_2) \gg 1/\Omega_{\text{min}},$$

где  $\Omega_{\text{min}}$  – минимально возможная частота паразитной амплитудной модуляции, можно обеспечить практически постоянное значение суммы  $U_{=}^{(1)} + U_{=}^{(2)}$  в (3.15). В отношении  $U_{=}^{(2)}/U_{=}^{(1)}$  этой же формулы числитель и знаменатель изменяются одинаково при колебаниях амплитуды входного сигнала. Указанные обстоятельства обеспечивают малую чувствительность дробного детектора к изменению величины входного сигнала вследствие паразитной амплитудной модуляции.

### **Лабораторная работа «Частотный детектор»**

Цель лабораторной работы – экспериментальное исследование процесса детектирования ЧМ сигналов, выполняемого на основе:

- преобразования изменения частоты колебания в изменение амплитуды с последующим детектированием с помощью амплитудного детектора;
- преобразования изменения частоты колебания в изменение фазы с последующим детектированием с помощью амплитудного детектора.

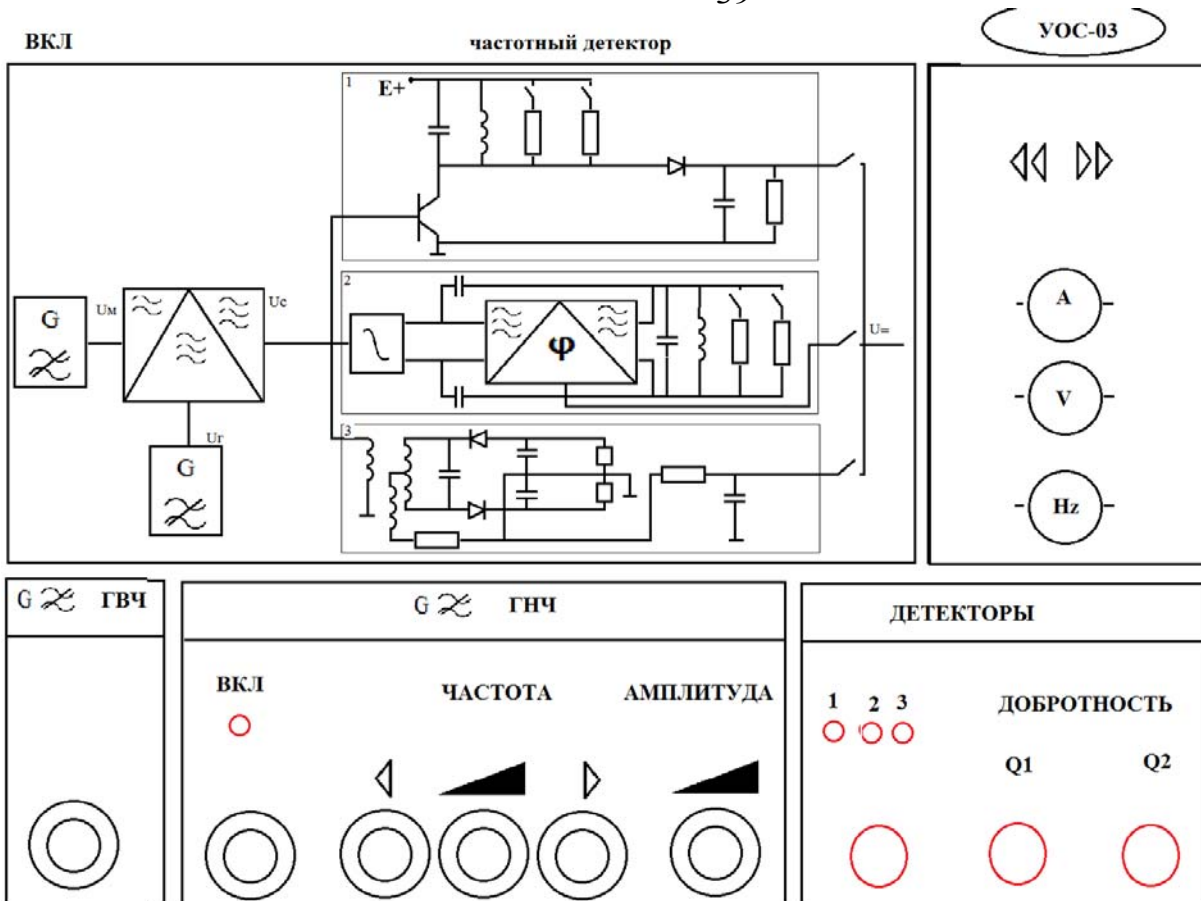
### **Описание лабораторной установки**

Лабораторная установка предназначена для экспериментальных исследований процесса детектирования ЧМ-сигналов, выполняемого на основе:

- расстроенного контура и диодного детектора,
- фазового детектора с одиночным контуром,
- дробного частотного детектора.

Установка может использоваться в автономном режиме и режиме использования внешних измерительных приборов.

Вид лицевой панели лабораторной установки приведен на рис. 11. На левом верхнем поле изображена структурная схема установки. На нижнем поле расположена панель ручного управления с переключателями режимов работы, на правом поле – цифробуквенный дисплей с кнопками управления.



**Состав установки**

Лабораторная установка включает в себя ЧМ-генератор и блок детекторов. Частотно-модулированный генератор входного сигнала с амплитудой  $U_c$  формирует ЧМ-сигнал с регулируемым индексом модуляции и состоит:

- из генератора высокой частоты (ГВЧ) с регулируемой напряжением частотой генерации  $f_c$  в диапазоне 2200–2900 кГц;
- генератора низкой частоты (ГНЧ) с регулируемыми: частотой в диапазоне 30 Гц–15 кГц и амплитудой в пределах 0–750 мВ.
- модулятора, формирующего ЧМ-сигнал.
- В блоке детекторов имеются детекторы, выполненные на основе:
  - расстроенного контура и диодного детектора (тип 1);
  - фазового детектора с одиночным контуром (тип 2);
  - дробного частотного детектора (тип 3).

**Панель ручного управления**

Панель ручного управления состоит из трех полей:

Поле «ГВЧ» – генератора высокочастотного сигнала  $U_{Г}$ .

«ЧАСТОТА» – потенциометр, изменяющий напряжение смещения  $U_{см}$  на варикапах управления частотой генератора.

Поле «ГНЧ» – генератора низкой частоты.

«ВКЛ» – включение ГНЧ;

«ЧАСТОТА» – потенциометр плавной регулировки частоты ГНЧ;

«<», «>» – кнопки переключения диапазонов («меньше», «больше»);

«АМПЛИТУДА» – потенциометр плавной регулировки амплитуды ГНЧ.

Поле «ДЕТЕКТОРЫ» – детекторов ЧМ сигнала.

«ТИП» – кнопка переключения типа исследуемого детектора; «ДОБРОТНОСТЬ» – переключение добротности контуров исследуемых детекторов.

«Q1» – кнопка включения резистора R1; «Q2» – кнопка включения резистора R2.

Значения сопротивлений:

для детектора (тип 1) значение  $R1 = 5,6 \text{ кОм}$  и  $R2 = 10 \text{ кОм}$ ; для детектора (тип 2) значение  $R1 = 430 \text{ Ом}$  и  $R2 = 1,2 \text{ кОм}$ .

На задней стенке установки имеются контрольные выходы: «Вых 1» – напряжение на выходе частотного детектора  $U_{\cong}$ , «Вых 2» – модулирующее напряжение  $U_{\text{вых}}$ , «Вых 3» – напряжение на входе частотного детектора  $U_c$ .

### ***Поле цифробуквенного дисплея***

На цифробуквенном дисплее отображаются измеряемые величины и номер пункта работы. Под дисплеем расположены следующие кнопки:

«<<» – кнопка перелистывания страниц с пунктами работы к началу;

«>>» – кнопка перелистывания страниц с пунктами работы к концу; «Т» – кнопка сброса контроллера управления.

### **Программа и порядок выполнения работы**

Ознакомившись с описанием лабораторной установки и составив план проведения эксперимента, включить питание и саму установку нажатием кнопки «Вкл».

Все переключения производятся с помощью кнопок на передней панели установки, включенное состояние кнопки индицируется светодиодом. Измерения выполняются встроенными приборами под управлением микроконтроллера, а результаты измерений выводятся на цифробуквенный дисплей, расположенный на лицевой панели. Выбор измеряемых величин и подключение их к индикатору производятся кнопками выбора пункта лабораторной работы («<<», «>>»), расположенными вместе с кнопкой «сброс» («Т») под цифробуквенным дисплеем.

Для выполнения лабораторной работы предлагаются следующие задания.

### **Задание 1. Измерение зависимости частоты сигнала на выходе ЧМ-генератора от напряжения смещения**

Изменяя с помощью потенциометра «частота ГВЧ» напряжение смещения  $U_{\text{см}}$  в пределах 1–12 В, получить зависимость  $f_c = f(U_{\text{см}})$  при отсутствии модуляции (кнопка «ГНЧ» в положении «Выкл»). Результаты измерений занести в таблицу. Построить график зависимости  $f_c = f(U_{\text{см}})$ .

### **Задание 2. Измерение детекторной характеристики частотного детектора на основе расстроенного контура (тип 1)**

Цель: получить зависимость постоянной составляющей  $U_{\text{=}}$  на нагрузке частотного детектора от изменения частоты сигнала в пределах 2200–2900 кГц при отсутствии модуляции (кнопка «ГНЧ» в положении «Выкл»).

#### **Порядок выполнения**

1. Провести измерения для четырех величин добротности  $Q$  резонансного контура детектора:
  - 1.1. Шунтирующие резисторы  $R1$  и  $R2$  ( $Q1$  и  $Q2$ ) отключены.
  - 1.2. Подключен резистор  $R1$  ( $Q1$ ).
  - 1.3. Подключен резистор  $R2$  ( $Q2$ ).
  - 1.4. Подключены резисторы  $R1$  и  $R2$  ( $Q1$  и  $Q2$ ).
2. Результаты измерений занести в таблицы.
3. Определить среднюю  $f_{\text{ср}}$  частоту на максимально линейном участке детекторной характеристики (на возрастающем участке).

### **Задание 3. Измерение детекторной характеристики частотного детектора на основе фазового детектора (тип 2)**

Цель: получить зависимость постоянной составляющей  $U_{\text{=}}$  на нагрузке частотного детектора от изменения частоты сигнала в пределах 2200–2900 кГц при отсутствии модуляции (кнопка «ГНЧ» в положении «Выкл»).

#### **Порядок выполнения**

1. Провести измерения для четырех величин добротности резонансного контура детектора:
  - 1.1. Шунтирующие резисторы R1 и R2 (Q1 и Q2) отключены.
  - 1.2. Подключен резистор R1 (Q1).
  - 1.3. Подключен резистор R2 (Q2).
  - 1.4. Подключены резисторы R1 и R2 (Q1 и Q2).
2. Результаты измерений занести в таблицы.
3. Определить среднюю  $f_{\text{ср}}$  частоту линейного участка детекторной характеристики ( $U_{\text{н}} = 0$ ).

**Задание 4. Измерение детекторной характеристики дробного частотного детектора (тип 3)**

Цель: получить зависимость постоянной составляющей  $U_{\text{н}}$  на нагрузке частотного детектора от изменения частоты сигнала в пределах 2200–2900 кГц при отсутствии модуляции (кнопка «ГНЧ» в положении «Выкл»).

**Порядок выполнения**

1. Провести измерения.
2. Результаты измерений занести в таблицы.
3. Построить график зависимости  $U_{\text{н}} = f(f_{\text{с}})$ .
4. Определить среднюю  $f_{\text{ср}}$  частоту линейного участка детекторной характеристики ( $U_{\text{н}} = 0$ ).

**Задание 5. Измерение частотных характеристик детекторов**

Цель: определить частотные характеристики детекторов.

**Порядок выполнения**

1. При выключенном генераторе низкой частоты ГНЧ установить частоту генератора высокой частоты ГВЧ, равную  $f_{\text{ср}}$ .
2. Включить генератор низкой частоты ГНЧ. Установить уровень эффективного значения модулирующего сигнала равным  $U_{\text{М}} = 200$  мВ.
3. Получить зависимость эффективного значения  $U_{\Omega}$  на выходе частотного детектора от частоты модуляции  $F_{\text{М}}$ , изменяя частоту модуляции  $F_{\text{М}}$  в диапазоне 50 Гц–15 кГц.
4. Провести измерения для трех типов детекторов.

Для детекторов типов 1 и 2 измерения провести при отключенных резисторах R1 и R2 (Q1 и Q2). Результаты измерений занести в таблицы.

### Задание 6. Исследование зависимости коэффициентов передачи детекторов от уровня модулирующего сигнала

Цель: получить зависимость эффективного значения напряжения  $U_{\Omega}$  на выходе частотного детектора от эффективного значения напряжения  $U_M$  на модуляционном входе частотного модулятора (выходе ГНЧ).

#### Порядок выполнения

1. При выключенном генераторе низкой частоты ГНЧ установить частоту генератора высокой частоты ГВЧ, равную  $f_{\text{ср}}$ .
2. Включить генератор низкой частоты ГНЧ.
3. Установить значение  $F_M \approx 1$  кГц.
4. Провести измерения для трех типов детекторов, изменяя  $U_M$  в пределах 0–750 мВ.

Для детекторов типов 1 и 2 измерения выполнить при отключенных резисторах R1 и R2 (Q1 и Q2). Результаты измерений занести в таблицы.

#### Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
  2. Схемы исследуемых частотных детекторов.
  3. Результаты измерений для трех типов частотных детекторов.
- Таблицы с результатами измерений и экспериментальные зависимости для модуляционной характеристики ЧМ генератора (задание 1).
  - Таблицы с результатами измерений и экспериментальные зависимости  $U_{\Omega} = f(f_c)$  без модуляции для 4 случаев включения шунтирующих резисторов R1 и R2 (задания 2–4).
  - Таблицы с результатами измерений частотных характеристик. Графики зависимостей  $U_{\Omega} = f(F_M)$  (задание 5).
  - Таблицы с результатами измерений зависимостей  $U_{\Omega} = f(F_M)$  для трех типов детекторов (задание 6).
  - Результаты расчета коэффициентов передачи детекторов по формуле

$$k_{\Omega} = \frac{\sqrt{2}U_{\Omega}}{U_c(\Delta f_m/f_c)}$$

где  $U_c = 0,5$  В,  $\Delta f_m$  – девиация частоты. Для определения девиации частоты  $\Delta f_m$  использовать результаты задания 1. По средней частоте несущего колебания  $f_{\text{ср}}$  для каждого типа детектора определить по графику  $f_c = f(U_{\text{см}})$  значение  $U_{\text{см}}$ , соответствующее этой частоте. Для каждого значения  $U_M$  рассчитать максимальную частоту  $f_{\text{max}}$ , соответствующую максимальному смещению  $U_{\text{см}} + 2U_M$ , и вычислить  $\Delta f_m$  по формуле

$$\Delta f_m = f_{\text{max}} - f_{\text{ср}}$$

4. Анализ полученных результатов.
- Объяснить характер зависимостей  $U_{\Omega} = f(f_c)$  (задания 2-4).
  - Провести анализ частотных свойств детекторов (задание 5).
  - Сравнить коэффициенты передачи различных типов детекторов (задание 6).
5. Выводы.

#### Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняют частотные детекторы? По каким признакам классифицируются такие детекторы и каковы их основные параметры?
2. Каковы принципы работы и схемы частотных детекторов?
3. Как рассчитывают коэффициент передачи частотного детектора?

4. Что происходит при совместном действии сигнала и шума на частотный детектор? Как проявляются пороговые свойства частотного детектора?
5. Какие искажения могут претерпевать сигналы в частотных детекторах? Какие меры предпринимать для уменьшения искажений?
6. Какова методика измерения детекторной характеристики частотного детектора?
7. Какова методика измерения частотных характеристик частотных детекторов?

### **Вопросы для тестирования**

1. Какой вид чувствительности характерен для детекторного приемника?
  - а) чувствительность, ограниченная шумами;
  - б) чувствительность, ограниченная усилением;
  - в) пороговая чувствительность;
  - г) тангенциальная чувствительность;
  - д) предельная чувствительность.
  
2. Какие каскады супергетеродинного приемника обеспечивают избирательность по соседнему каналу?
  - а) входная цепь;
  - б) УРЧ;
  - в) преселектор;
  - г) преобразователь;
  - д) УПЧ;
  - е) преобразователь и УПЧ.
  
3. Что называется диапазоном рабочих частот радиоприемного устройства?
  - а) это способность гетеродина обеспечивать прием сигналов;
  - б) это область возможных частот настройки приемника, в пределах которой обеспечивается прием сигналов;
  - в) это область возможных частот перестройки гетеродина;
  - г) это область частот, соответствующая полосе пропускания преселектора;
  - д) это область частот, соответствующая полосе пропускания преселектора, с учетом частотной перестройки гетеродина.
  
4. Укажите параметры частотной избирательности, характеризующие селективные свойства УПЧ:
  - а) избирательность по побочным каналам приема;
  - б) избирательность по соседнему и зеркальному каналам, коэффициент прямоугольности;
  - в) избирательность по соседнему каналу, полоса пропускания линейной части приемника, коэффициент прямоугольности;
  - г) избирательность по прямому и зеркальному каналам приема;
  - д) избирательность по соседнему и прямому каналам приема;
  
5. Что следует понимать под искажениями, возникающими в радиоприемном устройстве?
  - а) изменение формы выходного сигнала по сравнению с формой входного сигнала;
  - б) появление побочных каналов приема;
  - в) искажения появляются, если приемник не точно настроен на несущую частоту входного сигнала;
  - г) это перегрузка отдельных каскадов большим уровнем входного сигнала;
  - д) неправильный выбор угла отсечки.
  
6. Что называется динамическим диапазоном приемника?

- а) способность усиливать слабые сигналы;
- б) способность усиливать сильные сигналы;
- в) способность усиливать сигналы выше определенного уровня;
- г) это произведение коэффициента усиления на полосу приема;
- д) отношение максимального уровня входного сигнала в полосе пропускания приемника к чувствительности.

7. Каково назначение преобразователя частоты в супергетеродинном приемнике?

- а) предназначен для повышения стабильности частота принимаемого сигнала;
- б) предназначен для переноса спектра сигнала из одной частотной области в другую;
- в) предназначен для понижения несущей частоты входного сигнала;
- г) предназначен для уменьшения числа побочных каналов приема;
- д) предназначен для увеличения избирательности по зеркальному каналу.

8. Какие каскады супергетеродинного приемника обеспечивают избирательность по зеркальному каналу?

- а) входная цепь и УПЧ;
- б) УРЧ и преобразователь;
- в) преселектор;
- г) преобразователь;
- д) УПЧ;
- е) преобразователь и УПЧ.

9. Что называется соседним каналом приема?

- а) побочный канал приема, частота которого совпадает с частотой настройки УПЧ;
- б) возможная ближайшая частота, на которой может работать станция;
- в) побочный канал приема, частота которого отличается от частоты настройки супергетеродинного приемника на удвоенное значение промежуточной частоты;
- г) канал приема, образованный комбинацией двух частот, не попадающих в полосу приема.

10. Что произойдет в радиоприемном устройстве, если увеличить значение промежуточной частоты?

- а) ни чего не произойдет;
- б) уменьшится избирательность по прямому, соседнему и зеркальному каналам приема;
- в) увеличится избирательность по прямому, соседнему и зеркальному каналам приема;
- г) уменьшится избирательность по прямому, соседнему каналам приема и увеличится избирательность по зеркальному каналу;
- д) увеличится избирательность по прямому, соседнему каналам приема и уменьшится избирательность по зеркальному каналу;

11. Назовите способы разбивки диапазона принимаемых частот на поддиапазоны:

- а) линейный, логарифмический и экспоненциальный;
- б) линейный, квадратичный, логарифмический и экспоненциальный;
- в) линейный и нелинейный коэффициент перекрытия и частотный интервал;
- г) равные коэффициенты перекрытия и равные частотные интервалы для всех поддиапазонов;
- д) любые из перечисленных здесь способов.

12. Что называется частотными искажениями сигнала?

- а) это появление в выходном сигнале дополнительных шумовых составляющих;
- б) коэффициент усиления избирательного каскада имеет неравномерность в полосе приема более 3 (или 6) дБ;
- в) изменения формы сигнала в результате появления в спектре выходного сигнала гармонических составляющих, отсутствующих во входном спектре;
- г) изменения формы сигнала в результате нарушения закона распределения между его спектральными составляющими из-за неравномерности усиления составляющих колебаний спектра сигнала в избирательных цепях;

д) изменение закона огибающей спектра выходного сигнала называется частотными искажениями.

13. Укажите причину, по которой переходят к многократному преобразованию частоты в супергетеродинном приемнике:

- а) сложность схемного решения и невозможность перестройки УПЧ;
- б) чтобы уменьшить количество побочных каналов приема;
- в) чтобы исключить зависимость основных параметров приемника от частоты настройки;
- г) при высоких требованиях к избирательностям по соседних и зеркальных каналах одновременно;
- д) чтобы ослабить паразитное излучение гетеродина.

14. Каковы причины возникновения нелинейных искажений сигнала в каскадах радиоприемника?

- а) ограниченная полоса пропускания как всего приемника в целом, так и его отдельных каскадов;
- б) форма АЧХ избирательной цепи не соответствует форме огибающей спектра сигнала;
- в) нелинейности входных и выходных характеристик усилительных приборов, а также характеристик намагничивания сердечников;
- г) присутствие на входе приемника одновременно двух и более сигналов от разных радиостанций;
- д) не идеальность АЧХ избирательных каскадов.

15. Назвать состав преобразователя частоты:

- а) преселектор и гетеродин;
- б) смеситель и гетеродин;
- в) смеситель, гетеродин и УПЧ;
- г) смеситель и фильтр.

### **Вопросы, выносимые на коллоквиум Коллоквиум 1**

1. Дать определение входной цепи.
2. Перечислить признаки, по которым классифицируются входные цепи.
3. Сформулировать условие режима настроенной и ненастроенной антенны.
4. Что такое действующая высота антенны?
5. Какие виды связи входной цепи с антенной обладают постоянством резонансного коэффициента передачи в диапазоне рабочих частот диапазонных радиоприемных устройств?
6. Какие способы перестройки входной цепи могут быть использованы?
7. Что такое коэффициент перекрытия по частоте?
8. Чем отличаются входные цепи с ненастроенной и настроенной антенной?
9. Какие отличительные особенности имеют входные цепи с магнитной и рамочной антенной в сравнении с открытыми антеннами?
10. Какие элементы могут быть использованы во входных цепях с электронной перестройкой по частоте?
11. Дать сравнительную оценку коэффициента шума входной цепи с биполярным и полевым транзисторами?
12. Чем отличаются усилители радиочастоты от усилителей радиочастоты?
13. По каким признакам классифицируются селективные усилители радиочастоты?
14. Какое назначение имеет усилитель радиочастоты, входящий в состав преселектора радиоприемного устройства?
15. Каким требованиям должен отвечать усилитель радиочастоты?
16. Какое влияние оказывает УРЧ на чувствительность радиоприемного устройства?
17. Какое назначение имеет усилитель промежуточной частоты радиоприемного устройства?

18. Какое влияние оказывает на чувствительность усилитель промежуточной частоты радиоприемного устройства?
19. Какой из селективных усилителей, УРЧ или УПЧ, определяет полосу пропускания радиоприемного устройства?
20. Для обеспечения малого коэффициента шума в диапазоне рабочих частот до 1 ГГц какие усилительные элементы необходимо использовать в усилителе радиочастоты - полевые или биполярные и почему?
21. Для обеспечения малого коэффициента шума в диапазоне рабочих частот выше 1 ГГц какие усилительные элементы необходимо использовать в усилителе радиочастоты — полевые или биполярные и почему?
22. Дать определение преобразователя частоты?
23. Каков состав преобразователя частоты?
24. Какие каналы приема имеет преобразователь частоты?
25. Какую операцию, линейную или нелинейную, производит преобразователь частоты?
26. Чем отличается основной канал приема преобразователя частоты от зеркального канала?
27. Какой из каналов приема является наиболее опасным?
28. Что такое крутизна преобразования и крутизна усиления нелинейного усилительного прибора?
29. Дать сравнительную оценку коэффициента шума в режиме усиления и режиме преобразования.
30. Какая схема преобразователя частоты, с отдельным или с совмещенным гетеродином, предпочтительна?
31. Какие проблемы имеются при реализации сопряжения контуров гетеродина и преселектора диапазонного радиоприемного устройства диапазонного типа?
32. Какие методы сопряжения контуров гетеродина и преселектора Вы знаете?
33. Какое назначение имеет детектор радиосигналов?
34. По каким признакам классифицируются детекторы радиосигналов?
35. Какие типы детекторов по основному назначению Вы знаете?

### **Коллоквиум 2**

1. Какие типы детекторов различают по виду модуляции?
2. Какие типы нелинейных элементов используются в детекторах радиосигналов?
3. Какие способы используются в радиоприемных устройствах для детектирования радиосигналов?
4. В чем заключается принцип синхронного детектирования?
5. Какой принцип работы используется в корреляционных детекторах?
6. Какими показателями качества обладают амплитудные детекторы?
7. Какие отличия от амплитудного детектора имеет детектор радиоимпульсных сигналов?
8. Чем определяется режим импульсного и пикового детектирования в детекторах радиоимпульсных сигналов?
9. Какие принципы детектирования используются для выделения огибающей частотно-модулированных сигналов?
10. Какие принципы детектирования используются для выделения огибающей фазомодулированных сигналов?
11. Какие показатели качества используются для определения технических характеристик детектора частотно- и фазомодулированных сигналов?
12. Какие особенности построения имеют радиоприемные устройства, предназначенные для приема и обработки частотно- и фазомодулированных сигналов?
13. Какое назначение имеет система автоматической регулировки усиления?
14. Какова функциональная схема системы автоматической регулировки усиления?
15. Какие факторы влияют на показатели качества системы радиоавтоматики?
16. Какое назначение имеет система автоматической регулировки усиления в устройствах приема и обработки сигналов?
17. Какова структурная схема разомкнутой системы АРУ?
18. Какова структурная схема замкнутой системы АРУ?
19. В чем принципиальная разница между разомкнутой и замкнутой системами АРУ?

20. В чем принципиальная разница между разомкнутой и замкнутой системами АРУ?
21. Какие виды регулировочных характеристик систем АРУ вы знаете?
22. Когда используется инерционная система радиоавтоматики?
23. Когда используется задержанная система автоматической регулировки усиления?
24. Какое назначение имеет фильтр нижних частот в системе АРУ?
25. Какое назначение системы автоматической подстройки частоты?
26. Какова функциональная схема автоматической подстройки частоты?
27. Какова структурная схема автоматической подстройки частоты?
28. Что такое полоса захвата и полоса удержания в системах АПЧ?
29. Почему полоса захвата меньше полосы удержания в системах АПЧ?
30. 18.Какая реакция системы ЧАПЧ на дестабилизирующие факторы, влияющие на точность ее работы?
31. Какое назначение имеет система фазовой автоподстройки?
32. Когда и где используется фазовая автоподстройка (ФАПЧ)?
33. Какова функциональная схема системы ФАПЧ?
34. Какова структурная схема системы ФАПЧ?
35. Чем отличается система ФАПЧ от системы ЧАПЧ?

## **3.2 Оценочные материалы для промежуточной аттестации**

### **Экзаменационные вопросы**

1. Структура и принцип действия радиоприемного устройства.
2. Структурные схемы радиоприемника.
3. Классификация и основные характеристики радиоприемных устройств
4. Радиосигналы и помехи.
5. Чувствительность радиоприемного устройства.
6. Шумы радиоприемного устройства.
7. Взаимосвязь чувствительности и коэффициента шума радиоприемника.
8. Частотная избирательность (селективность) радиоприемного устройства.
9. Параметры и характеристики входных цепей.
10. Выбор связи контура с антенной и нагрузкой.
11. Выбор оптимальной связи из условия допустимого расширения полосы пропускания входной цепи с ненастроенной антенной.
12. Выбор связи из условия согласования сопротивления настроенной антенны с контуром при заданной полосе пропускания цепи.
13. Выбор связи из условия согласования сопротивления настроенной антенны с контуром без ограничений на полосу пропускания цепи.
14. Входные цепи с трансформаторной связью контура с антенной.
15. Входные цепи с емкостной связью контура с нагрузкой.
16. Входные цепи с двойной автотрансформаторной связью.
17. Входные цепи метрового диапазона волн.
18. Входные цепи сверхвысоких частот.
19. Входные цепи с электронной настройкой.
20. Параметры и характеристики усилителей радиочастоты.
21. Анализ одноконтурного усилителя радиочастоты.
22. Усилители с двойной автотрансформаторной связью контура.
23. Усилители с трансформаторной связью контура и транзистора.
24. Интегральные микросхемы для усилителей радиочастоты.
25. Шумовые параметры преселектора.
26. Шумовые свойства усилителей на полевых транзисторах.
27. Шумовые характеристики усилителей на биполярных транзисторах.
28. Устойчивость работы усилителей радиочастоты. Способы повышения устойчивости работы усилителей радиочастоты.
29. Структура и назначение преобразователей частоты.
30. Параметры и типы преобразователей частоты.

31. Выбор активного элемента для преобразователя частоты.
32. Транзисторные преобразователи частоты.
33. Балансные преобразователи частоты.
34. Преобразователь частоты с фазовым подавлением зеркального канала.
35. Параметры и характеристики гетеродинов.
36. Транзисторные гетеродины.
37. Синтезаторы частоты.
38. Сопряжение настройки контуров преселектора и гетеродина.
39. Параметры и характеристики тракта промежуточной частоты.
40. Частотно-избирательные системы.
41. Фильтры сосредоточенной селекции на LC-контурах.
42. Электромеханические фильтры.
43. Пьезокерамические фильтры. Монолитные пьезоэлектрические фильтры.
44. Фильтры на поверхностных акустических волнах.
45. Усилительные интегральные микросхемы.
46. Выбор промежуточной частоты.
47. Параметры и характеристики амплитудных детекторов. Основы детектирования сигналов с амплитудной модуляцией.
48. Диодный детектор амплитудно-модулированных сигналов.
49. Транзисторные амплитудные детекторы.
50. Синхронный демодулятор АМ - сигналов.
51. Искажения в амплитудных детекторах.
52. Детектор импульсных сигналов.
53. Детектор однополосных сигналов.
54. Детекторы частотно модулированных сигналов. Параметры и характеристики частотных детекторов.
55. Типы частотных детекторов. Частотные детекторы с расстроенными контурами.
56. Фазовые детекторы.
57. Устройства управления параметрами тракта приема и обработки сигналов.
58. Устройства автоматической регулировки усиления (АРУ).
59. Особенности работы АРУ в приемниках импульсных сигналов.
60. Регулировка полосы пропускания.
61. Автоматическая настройка (АНП) и подстройка частоты (АПЧ).
62. Назначение, принципы построения и типы систем АНП и АПЧ.
63. Система частотной автоматической подстройки (ЧАПЧ) УПЧ.
64. Система фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) гетеродина.
65. Режимы работы ЧАПЧ и ФАПЧ и показатели, которыми эти режимы характеризуются.
66. Системы цифровой автоматической подстройки частоты гетеродина.
67. Приемники АМ сигналов.
68. Приемники импульсных сигналов.
69. Приемники ЧМ сигналов.
70. Радиолокационные приемники.
71. Приемники оптических сигналов.
72. Особенности цифровой обработки сигналов.
73. Приемники ОМ сигналов.
74. Приемники дискретных сигналов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Буга Н.Н., Фалько А.И., Чистяков Н.И. Радиоприемные устройства: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986 - с.15, 36 - 53.
2. Радиоприемные устройства: Учебное пособие. Давыдов Ю.Т.,

Данич Ю.С. и др.; под ред. А.П. Жуковского. М.: Высшая школа, 1989.  
- с. 32-38.

3. Сергеев В.Г. Радиоприемные устройства: конспект лекций. М.:  
РИО МИИГА, 1983 - с. 35 - 52.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 «ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ РАДИОЧАСТОТЫ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ РАДИОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА»

Целью работы является экспериментальное исследование характеристик усилителя радиочастоты (УРЧ) и усилителя промежуточной частоты (УПЧ) радиоприемного устройства, а также приобретение навыков расчета их параметров, настройки и регулировки.

### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Усиление принимаемых радиосигналов в приемном устройстве осуществляется в его преселекторе, т.е. на радиочастоте, и после преобразователя частоты - на промежуточной частоте. Соответственно различают усилители радиочастоты (УРЧ) и усилители промежуточной частоты (УПЧ). В этих усилителях, вместе с усилением должна обеспечиваться частотная избирательность приемника. Для этого усилители содержат резонансные цепи: одиночные колебательные контуры, фильтры на связанных контурах, различные типы фильтров сосредоточенной избирательности. Усилители радиочастоты с переменной настройкой обычно выполняют с избирательной системой, аналогичной примененной во входной цепи приемника, чаще всего это одноконтурные избирательные цепи.

В усилителях промежуточной частоты находят применение сложные типы избирательных систем, обладающие АЧХ близкими к прямоугольным, такие, как электромеханические фильтры (ЭМФ), кварцевые фильтры (КФ), фильтры на поверхностных (объемных) акустических волнах (ПАВ, ПОВ) и др.

В большинстве современных приемников используют однокаскадные УРЧ. Реже, при высоких требованиях к избирательности и коэффициенту шума, УРЧ могут содержать до трех каскадов.

К числу основных электрических характеристик усилителей относятся:

1. *Резонансный коэффициент усиления напряжения*  $k_0 = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$ .

На сверхвысоких частотах (СВЧ) чаще применяют понятие коэффициента усиления по мощности  $k_p = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}} = k_0^2 G_H / G_{\text{вх}}$ , где  $G_{\text{вх}}$  -

активная составляющая входной проводимости усилителя;  $G_H$  - активная составляющая проводимости нагрузки.

2. *Частотная избирательность усилителя* показывает относительное уменьшение усиления при заданной расстройке  $\sigma = k(\pm \Delta f) / k_0$ .

Иногда избирательность характеризуют коэффициентом прямоугольности, например,  $k_{П0,01} = \frac{П_{0,01}}{П_{0,707}}$ .

3. Коэффициент шума определяет шумовые свойства усилителя.

4. Искажения сигнала в усилителе: амплитудно-частотные, фазовые, нелинейные.

5. Устойчивость работы усилителя определяется его способностью сохранять в процессе эксплуатации основные характеристики (обычно  $K_0$  и АЧХ), а также отсутствие склонности к самовозбуждению.

На рис.1-3 приведены основные схемы УРЧ, а на рис.4 схема - УПЧ с фильтром сосредоточения избирательности (ФСИ) в виде электромеханического фильтра.

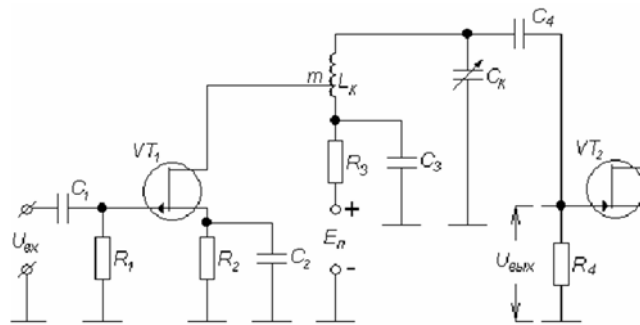


Рис.1. УРЧ на полевом транзисторе

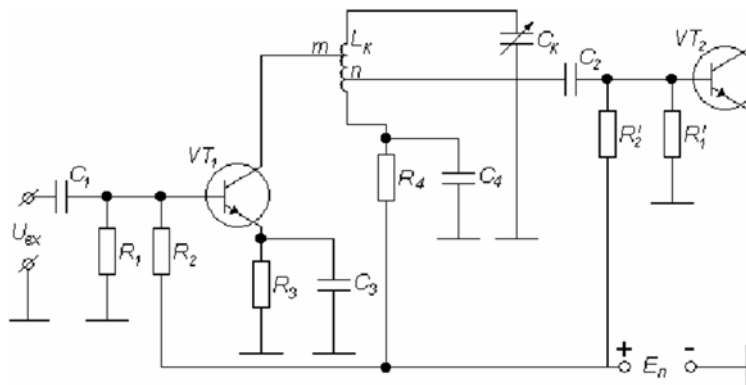


Рис.2. УРЧ на биполярном транзисторе

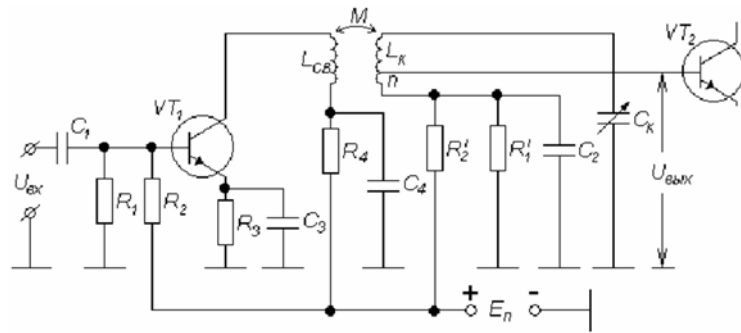


Рис.3. УРЧ с индуктивной связью с избирательной системой

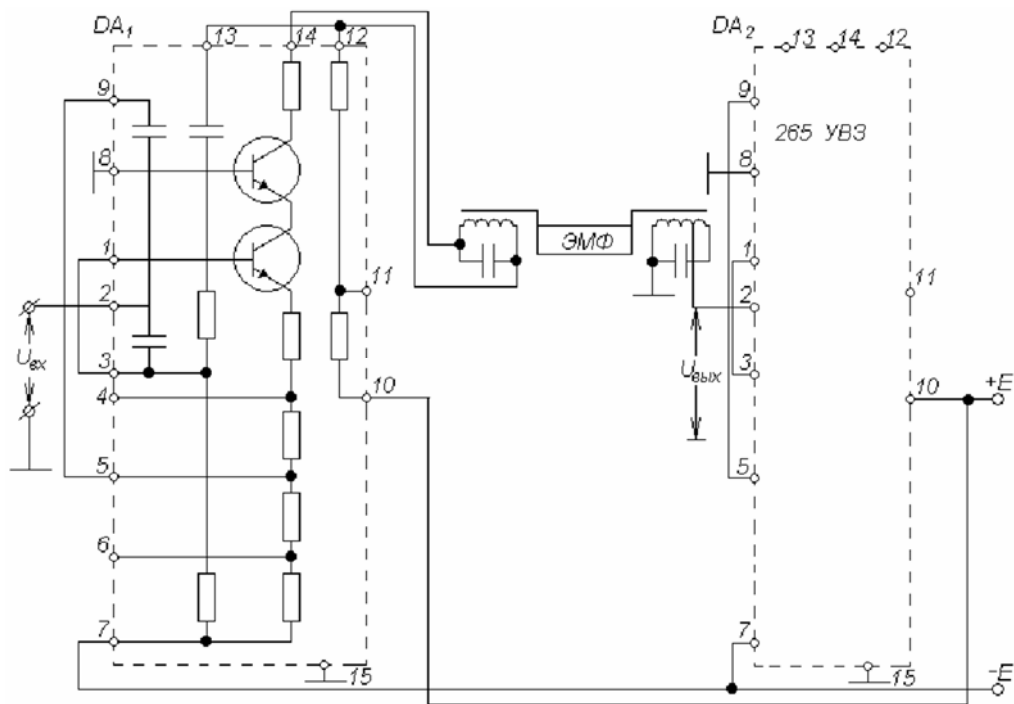


Рис.4. УПЧ с фильтром сосредоточенной избирательности

В усилителях радиочастоты и промежуточной частоты в основном применяют два варианта включения усилительного прибора: с общим эмиттером (общим истоком) и каскодной схемой включения транзисторов.

На рис.1 приведена схема усилителя на полевом транзисторе с общим истоком. В цепь стока включен колебательный контур  $L_K C_K$ . Контур настраивается конденсатором  $C_K$  (может применяться для настройки контура варикап или варикапная матрица).

В усилителе применено последовательное питание стока через фильтр  $R3C3$ . Напряжение смещения на затворе  $VT1$  определяется падением

напряжения от тока истока на резисторе  $R2$   $U_{зи} = U_{R2} = I_H R_2 = I_C R_2$ .

Резистор  $R1$  является сопротивлением утечки транзистора  $VT1$  и служит для передачи напряжения смещения на затвор транзистора.

На рис. 2 приведена аналогичная схема УРЧ на биполярном транзисторе. Здесь применено двойное неполное включение контура с транзисторами  $VT1, VT2$ , что позволяет обеспечить необходимое шунтирование контура со стороны выхода транзистора  $VT1$  и со стороны входа транзистора  $VT2$ . Напряжение питания на коллектор транзистора подано через фильтр  $R4C4$  и часть витков катушки контура  $L_K$ . Режим по постоянному току и температурная стабилизация обеспечивается с помощью резисторов  $R1, R2$  и  $R3$ . Емкость  $C2$  устраняет отрицательную обратную связь по переменному току.

На рис. 3 показана схема с трансформаторной связью контура с коллектором транзистора и автотрансформаторной связью со входом следующего каскада. Обычно, в этом случае, применяют, "удлиненную" настройку контура (см. лаб. работу №1).

На рис. 4 представлена схема каскада УПЧ с ФСИ, выполненного на микросхеме 265 УВЗ. Микросхема представляет собой каскодный усилитель ОЭ - ОБ.

Усилители промежуточной частоты обеспечивают основное усиление и селективность приемника по соседнему каналу. Их важной особенностью является то, что они работают на фиксированной промежуточной частоте и имеют большое усиление, порядка  $10^4 \dots 10^6$ .

При использовании различных типов ФСИ требуемое усиление УПЧ достигается применением широкополосных каскадов.

Общим для всех схем является двойное неполное включение избирательной системы. (Полное включение можно рассматривать как частный случай, когда коэффициенты трансформации  $m$  и  $n$  равны единице). Поэтому для анализа можно использовать одну обобщенную эквивалентную схему замещения усилителя (рис.5).

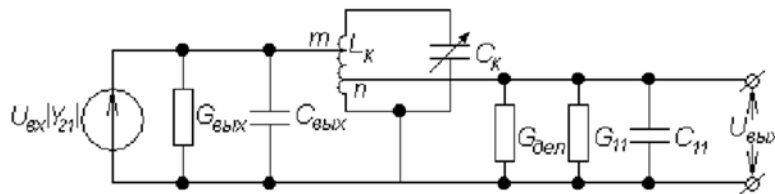


Рис.5. Обобщенная эквивалентная схема резонансного усилителя

На схеме транзистор со стороны выхода заменен эквивалентным генератором тока с параметрами  $G_{22} (G_{вых}, G_i), C_{22} (C_{вых}, C_{КЭ})$  и током  $U_{вх} Y_{21}$ , а со стороны входа следующего каскада проводимостью  $G_{11} (G_{вх}), C_{11} (C_{вх})$ . Резистор утечки  $R4$  (рис.1) или делитель  $R'_1 R'_2$  (рис.2) заменены

проводимостью  $G_{дел} (G_{дел} = \frac{1}{R4} \text{ или } G_{дел} = \frac{(R' + R')}{R' \cdot R'})$ .

Обычно сумму проводимостей  $G_{дел} + G_{11}$  считают проводимостью нагрузки  $G_H$ , т.е.  $G_H = G_{дел} + G_{11}$ .

Анализ эквивалентной схемы позволяет получить все расчетные соотношения для определения характеристик каскада [1].

Так, комплексный коэффициент усиления каскада определяется выражением

$$k = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{m \cdot n \cdot \dot{Y}_{21}}{(1 + j\xi)G_3}, \quad (1)$$

где  $G = G_0 + m^2 G_{22} + n^2 G_H$  - эквивалентная резонансная проводимость контура;

$$\xi = Q_3 \cdot \left| \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right| = \frac{1}{d_3} \cdot \left| \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right| - \text{обобщенная расстройка контура.}$$

Из данного соотношения легко определить модуль коэффициента усиления

$$k = m \cdot n \cdot |Y_{21}| \cdot \frac{R_3}{\sqrt{1 + \xi^2}} \quad (2)$$

и резонансный коэффициент усиления каскада УРЧ

$$k_0 = m \cdot n \cdot |Y_{21}| \cdot R_3 = \frac{m \cdot n \cdot |Y_{21}|}{G_0 + m^2 G_{22} + n^2 G_H} = m \cdot n \cdot |Y_{21}| \cdot \rho \cdot Q_3 \quad (3)$$

Резонансный коэффициент усиления достигает своего максимального значения при одинаковом шунтировании контура со стороны выхода активного прибора и со стороны нагрузки (входа следующего каскада), т.е. когда

$$m^2 G_{22} = n^2 G_H \quad (4)$$

Приведенные соотношения позволяют получить уравнение резонансной кривой усилителя. Так, при малых расстройках,  $k_0/k = 1/\gamma = \sqrt{1 + \left( \frac{2\Delta f}{f_0 d_3} \right)^2}$ .

Откуда, полоса пропускания УРЧ по уровню 0,707 (-3дБ) равна

$$\Pi_{0,707} = f_0 / Q_3 = f_0 \cdot d_3 = f_0 \cdot \frac{R_3}{R_3} = f_0 \cdot \rho \cdot G_3 \quad (5)$$

Резонансный коэффициент усиления одноконтурного каскада УПЧ такой же, как и у одноконтурного УРЧ

$$k_{01} = m \cdot n \cdot |Y_{21}| \cdot R_{\text{э}} = m \cdot n \cdot |Y_{21}| \cdot \rho \cdot Q_{\text{э}}. \quad (6)$$

Для УПЧ с двухконтурным полосовым фильтром резонансный коэффициент усиления каскада определяется выражением

$$k_{02} = m \cdot n \cdot |Y_{21}| \cdot R_{\text{Э}} \frac{\beta}{\beta^2 + 1} = m \cdot n \cdot |Y_{21}| \cdot \rho \cdot Q_{\text{Э}} \frac{\beta}{\beta^2 + 1}, \quad (7)$$

где  $\beta = k_{\text{св}} \cdot Q_{\text{Э}}$  - фактор связи между контурами, а  $k_{\text{св}}$  - коэффициент связи между контурами.

Коэффициент усиления (по напряжению) УПЧ с любым ФСИ при согласовании фильтра на входе и выходе может быть рассчитан по формуле

$$k_{0\text{ФСИ}} = 0,5 \cdot m \cdot n \cdot |Y_{21}| \sqrt{\rho_{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{вых}}} \cdot k_{\phi}. \quad (8)$$

Здесь  $\rho_{\text{вх}}, \rho_{\text{вых}}$  - характеристические (волновые) сопротивления ФСИ по входу и выходу соответственно;

$k_{\phi}$  - коэффициент передачи фильтра в полосе прозрачности (пропускания).

В том случае, если известно затухание фильтра в полосе прозрачности  $L_{\phi}$  в децибелах, то

$$k_{0\text{ФСИ}} = 0,5 \cdot m \cdot n \cdot |Y_{21}| \sqrt{\rho_{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{вых}}} \cdot 10^{-\frac{L_{\phi}}{20}}. \quad (9)$$

Коэффициенты включения  $m$  и  $n$  вычисляются из условия согласования фильтра на входе и выходе

$$m = \frac{1}{\sqrt{\rho_{\text{вх}} \cdot G_{22}}}, \quad n = \frac{1}{\sqrt{\rho_{\text{вых}} \cdot G_{11}}}.$$

Резонансная характеристика каскада УПЧ с ФСИ полностью определяется кривой изменения коэффициента передачи  $\text{ФСИ}$  от частоты. Отдельные точки резонансной кривой  $\text{ФСИ}$  задаются в справочниках.

Коэффициент усиления избирательного усилителя не должен превышать величины коэффициента устойчивого усиления  $K_{\text{уст}}$ . В общем случае,  $K_{\text{уст}}$  можно оценить из выражения

$$k_{\text{уст}} \cong (0,35 \dots 0,42) \sqrt{\frac{|Y_{21}|}{|Y_{12}|}}. \quad (10)$$

Если в качестве усилительного элемента используется каскодная схема, то необходимо подставить соответствующие значения проводимостей для каскодной схемы, например, для схемы ОЭ – ОБ

$$k_{уст} \cong (0,35...0,42) |Y_{21}| \sqrt{\frac{1}{|Y_{12}| \cdot |Y_{22}|}} \quad (11)$$

В случае использования полевых транзисторов активной составляющей проводимости  $Y_{12}$  можно пренебречь и

$$k_{уст} \cong (0,35...0,42) \sqrt{\frac{|Y_{21}|}{\omega \cdot C_{12}}} \quad (12)$$

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментальной части работы изучаются свойства УРЧ и УПЧ с различными типами избирательных систем.

### 2.1 Лабораторная установка

Схема исследуемого усилителя радиочастоты показана на рис.6

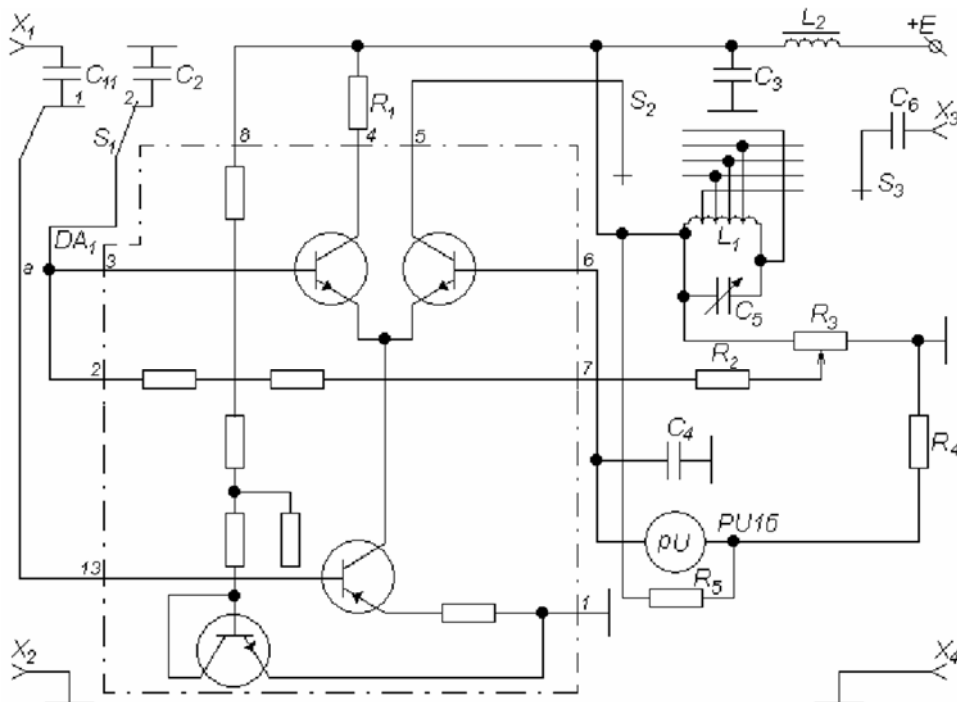


Рис. 6. Схема УРЧ лабораторной установки

УРЧ представляет собой однокаскадный дифференциальный усилитель на микросхеме ДА1 типа 175УВ2 с цепью частотной селекции на выходе. Усилитель состоит из дифференциального каскада (пара верхних по схеме

транзисторов) и токопитающего транзистора, выполняющего роль генератора стабильного тока для эмиттерной цепи дифференциального каскада. Входной сигнал может подаваться симметрично между базами дифференциальных транзисторов или несимметрично на одну из баз этих транзисторов относительно общего провода. При несимметричном включении сигнала упрощаются цепи межкаскадной связи, и появляется возможность использования второго транзистора дифференциального каскада для подачи на схему дополнительных сигналов, например, управляющего напряжения АРУ. Именно так построена схема в макете.

Переключатель S1 позволяет исследовать УРЧ при подаче входного сигнала либо на дифференциальный каскад, либо на токопитающий транзистор. Переключатели S2 и S3 служат для изменения коэффициента связи колебательного контура с выходным транзистором и с входом следующего каскада, который в макете имитируется сопротивлением нагрузки. Нагрузка подключена несимметрично, т.е. к одному из коллекторов дифференциального каскада. На практике часто используется и симметричное включение нагрузки между коллекторами выходных транзисторов.

Другой вариант макета УРЧ выполнен на МС 219 или 235 серии, в этом случае каскад УРЧ выполнен по каскадной схеме ОЭ-ОБ.

Усилитель промежуточной частоты собран по схеме, показанной на рис.7.

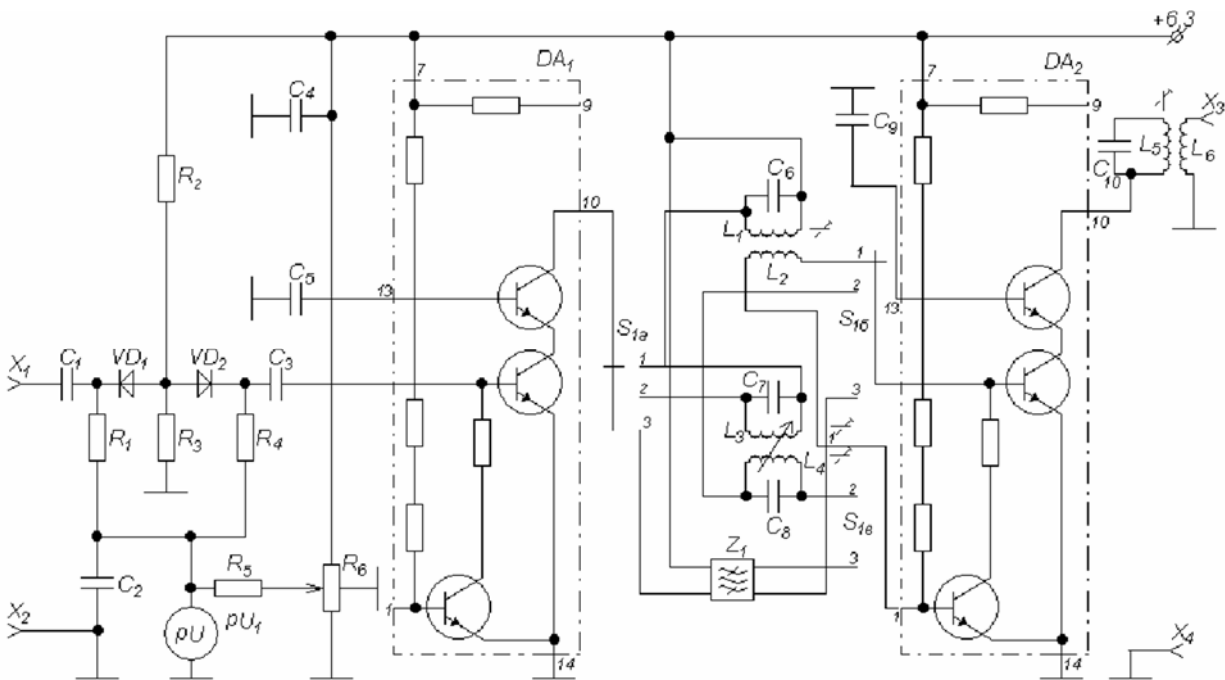


Рис.7. Схема УПЧ лабораторной установки

Схема включает регулируемый аттенюатор, основанный на изменении сопротивления диодов VD1, VD2 под действием управляющего напряжения, двухкаскадный УПЧ на микросхемах DA1, DA2 (типа 118УС2), в цепь межкаскадной связи которого включаются одноконтурный, полосовой или электромеханический фильтры. Управляющее напряжение на диоды VD1, VD2, входящие в систему аттенюатора, подается с потенциометра R6 через резисторы R1, R4, R5. Отпирающее напряжение на диоды поступает с делителя напряжения R2, R3. Микросхемы DA1, DA2 представляют собой каскадные усилители широкого применения. В них пара верхних по схеме транзисторов включена каскодно, а нижний транзистор служит для термокомпенсации выходного тока и может быть использован для суммирования противофазных напряжений, как это сделано во втором каскаде, собранном на микросхеме DA2. Этот каскад позволяет устранить влияние измерительных приборов на форму резонансной кривой УПЧ. Его контур L5, C10 имеет широкую полосу пропускания. Выбор элементов межкаскадной связи осуществляется переключением S1. Величина связи между контурами полосового фильтра может изменяться за счет изменения емкости связи. Нагрузкой выходного каскада служит одноконтурный фильтр L5, C10, с обмотки связи которого L6 сигнал подается на выход схемы.

Другой вариант макета УПЧ собран на специализированной МС 235УР3. Микросхема предназначена для реализации усилителей промежуточной частоты связанных РПУ с  $k_U=400$  и с эффективной глубиной регулировки по цепи АРУ. Внешние избирательные системы данного макета УПЧ, такие же, как и в первом случае.

## 2.2 Домашнее задание

1. Вычислить резонансный коэффициент и полосу пропускания каскада УРЧ на биполярных транзисторах, рис.2.

2. Исходные данные для расчета УРЧ;

$f_{max} = 1600$  кГц;  $f_{min} = 520$  кГц;  $Q_0 = 30...40$ ;  $C_{kmax} = 495$  пФ;  $C_{kmin} = 11$  пФ;  
 $C_L = (9...10)$  пФ;  $C_M = (5...8)$  пФ;  $G_{11} = 0,5$  мСм;  $C_{11} = (40...50)$  пФ;  $G_{22} = 0,05$  мСм;  $C_{КЭ} = 12$  пФ;  $R_1 = 12$  кОм;  $R'_2 = 33$  кОм;  $|Y_{21}| = 25$  мСм;  $|Y_{12}| = 0,25$  мСм.

3. Рассчитать резонансный коэффициент усиления однокаскадного УПЧ, собранного по одноконтурной схеме, схеме со связанными контурами и схеме с ФСИ (ЭМФДП9-500-6,0-С).

#### 4 Исходные данные для расчета УПЧ:

Для одноконтурного фильтра  $m = 0,8$ ;  $n = 0,25$ .

Для двухконтурного фильтра  $m = 1,0$ ;  $n = 0,2$ ;  $\beta = 1$ .

$|Y_{21}| = 12,5$  мСм,  $G_{11} = 1$  мСм,  $G_{22} = 20 \times 10^{-3}$  мСм,  $p_{вх} = 10$  кОм,  $p_{вых} = 1$  кОм,  $L_{\phi} = (6...8)$  дБ,  $f_{пр} = 500$  кГц. Полоса пропускания ЭМФ -  $(6000 \pm 300)$  Гц.

### 2.3 Порядок выполнения работы

1. Снять амплитудную характеристику УРЧ для схем с подачей сигнала на дифференциальный каскад и на токопитающий транзистор. Определить коэффициенты усиления схем в указанных режимах работы.

Для этого вход установки (гнезда X1 и X2) соединить с генератором сигналов высокочастотным (ГСВ), а выход (гнезда X3, X4) - с милливольтметром (рис. 6). Переключатель S2 установить в положение 1, S3 - в положение 2, а S1 - в положение 1. Включить тумблер "питание". Ручкой переменного резистора R3 на вольтметре PUI установить напряжение  $U = 0$  В. При этом напряжении, как показывают результаты измерений,  $U_{см} = 0$  и токи, протекающие через транзисторы дифференциальной пары, примерно равны. Изменяя амплитуду входного немодулированного напряжения, поступающего с ГСВ от 0 до (0,05 - 0,1) В (не более), снять зависимость выходного напряжения от входного. Измерения производить на верхней частоте диапазона, при которой емкости конденсатора C5 минимальна. Контур LC5 должен быть настроен в резонанс за счет подстройки частоты ГСВ.

Повторить измерения, переведя тумблер S1 в положение 2, что соответствует подаче сигнала на токопитающий транзистор. Результаты измерений занесите в табл. 2.1. Указать частоту, на которой производились измерения. Построить график  $U_{вых} = \psi(U_{вх})$ .

Таблица 2.1

$U_{вх}, мВ$	1	2	4	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$U_{вых}, В$													
$K_0$													

2. Снять зависимость резонансного коэффициента усиления УРЧ от частоты при подаче сигнала на дифференциальный каскад и на токопитающий транзистор.

Для этого, не изменяя положения S2, S3, R3 и подключения измерительных приборов, перевести S1 в положение 1 и подать на вход

установки от ГСВ немодулированное напряжение  $U \cong 20\text{мВ}$ . Поддерживая неизменным это напряжение и изменяя частоту ГСВ от минимальной частоты диапазона до максимальной, снять зависимость резонансного коэффициента усиления УРЧ от частоты. При изменении частоты ГСВ контур  $L1C5$  необходимо каждый раз настраивать в резонанс. Частоты, на которых производится измерение, рекомендуется выбирать равными

$$f_{\max}, 0,3(2f_{\max} + f_{\min}), f_{\min}, 0,3(f_{\max} + 2f_{\min}).$$

Перевести тумблер  $S1$  в положение 2 и повторить измерения. Результаты измерений занести в табл.2.2. Построить графики.

Таблица 2.2

$f, \text{кГц}$	
$U_{\text{вых}}, \text{В}$	
$K_0$	

3. Измерить резонансный коэффициент усиления УПЧ с одноконтурным, двухконтурным полосовым (при факторе связи  $\beta \approx 0,5; \beta \approx 1,0; \beta \approx 2$ ) и электромеханическими фильтрами в цепи межкаскадной связи.

Для этого генератор сигналов высокочастотный (ГСВ) с немодулированным выходным напряжением  $U = (1-5)$  мВ на частоте  $f_{np}^* \approx 500\text{кГц}$  ( $f_{np}^*$  – точное значение промежуточной частоты макета следует уточнить, подстраивая генератор ВЧ) подключить к гнездам X1, X2, а милливольтметр - к гнездам X3, X4 (рис.7). Установить переключатель S1 в положение 1. Включить тумблер "Сеть". Ручкой переменного резистора R6 установить на вольтметре  $PUI$  нулевое напряжение. Подстраивая в небольших пределах частоту ГСВ, добиться максимума показаний на милливольтметре. Записать это показание. Для измерения частоты ко второму выходу ГСВ следует подключить частотомер. Перевести переключатель S1 в положение 2. Замерить выходное напряжение на резонансной частоте при трех значениях коэффициента связи между контурами. Записать величины полученных напряжений. Перевести переключатель S1 в положение 3. Настроить ГСВ на 500кГц, добиться максимума выходного напряжения. Записать показания милливольтметра. Полученные результаты свести в табл.2.3.

Таблица 2.3

Схема	Одноконтурная	Полосовой фильтр			ЭМФ
		$\beta = 0,5$	$\beta = 1$	$\beta = 2$	
К <sub>0</sub>					

4. Снять резонансные характеристики исследуемых схем УПЧ.

Для этого, не меняя величины выходного напряжения ГСВ и положения переменного резистора R6, перевести S1 в положение 1. Снять резонансную характеристику. Расстройки относительно резонансной частоты следует выбирать такими, чтобы получить 7-9 точек, достаточно полно описывающих ход кривой. Полученные данные занести в табл. 2.4.

Таблица 2.4

$\Delta f, \text{кГц}$	
$U_{\text{вых}}, \text{В}$	
$K(f)$	

Повторить измерения для других схем, переводя переключатель S1 в положение 2 и 3 и пользуясь переключателем установки величины связи между контурами полосового фильтра ( $\beta \approx 0,5; \beta \approx 1; \beta \approx 2$ ). Построить графики  $k = \psi(\Delta f)$ .

5. Снять зависимости коэффициентов усиления  $K_0$  УРЧ и УПЧ от величины регулирующего напряжения.

Величину регулирующего напряжения следует изменять от 0 до 4В. В качестве вольтметра использовать измерительный прибор, находящийся на макете. Вся шкала прибора соответствует напряжению равному 5-ти вольтам. Величину входного ВЧ сигнала следует поддерживать постоянной (примерно 10...20мВ). Полученные данные свести в табл.2.5 для УРЧ и в аналогичную ей табл.2.6 для УПЧ. Построить графики  $k_{0\text{УРЧ}} = f(U_p)$  и  $k_{0\text{УПЧ}} = f(U_p)$ .

Таблица 2.5

$U_{p,B}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.1	2.3	2.5	2.7	3.0	3.5	4.0
$U_{вых,B}$												
$K_0$												

Таблица 2.6

$U_{p,B}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.1	2.3	2.5	2.7	3.0	3.5	4.0
$U_{вых,B}$												
$K_0$												

### Контрольные вопросы

1. Поясните назначение УРЧ, УПЧ.
2. Дайте определение основным качественным характеристикам УРЧ, УПЧ.
3. Какие типы избирательных систем применяются в УРЧ, УПЧ?
4. Нарисуйте схему одного каскада УРЧ, УПЧ на биполярном, полевом транзисторе.
5. Из каких условий выбирают коэффициенты включения избирательной системы к входу и выходу активных приборов?
6. От чего зависит резонансный коэффициент усиления УРЧ, УПЧ?
7. Какими мерами можно обеспечить требуемую полосу пропускания УРЧ, УПЧ?
8. В чем заключается преимущество использования фильтров сосредоточенной избирательности в УПЧ?
9. В каких случаях используют каскодные схемы включения активных приборов?
10. Поясните зависимость коэффициента усиления УРЧ в рабочем диапазоне приемника.
11. Как определить максимальный коэффициент усиления УРЧ, УПЧ?
12. Когда в УПЧ могут быть использованы апериодические усилители?
13. Сравните схемы УРЧ, УПЧ на биполярных и полевых транзисторах.
14. Каковы особенности применения дифференциального усилителя в схемах УРЧ, УПЧ?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Буга Н.И., Фалько А.И., Чистяков Н.И. Радиоприемные устройства: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986.- С.59-75; 80-91
2. Радиоприемные устройства: Учебное пособие./Давыдов Ю.Т., Данич Ю.С. и др./ Под ред. А.П.Жуковского. М.: Высшая школа, 1989.-С.38-47; 57-75.
3. Функциональные устройства на интегральных микросхемах дифференциального усилителя. /Под ред. В.З. Найдерова. М.: Сов. радио, 1977.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ»

Цель работы состоит в ознакомлении со схемами преобразователей частоты приемных устройств, в изучении свойств преобразователя частоты с отдельным гетеродином, в приобретении навыков по расчету параметров и измерению его основных характеристик.

#### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Преобразователем частоты называют устройство, осуществляющее перенос спектра радиосигнала из одной области частот в другую. Так как сигнал несет в себе полезную информацию, заключенную в одном или нескольких его параметрах, то в процессе преобразования частоты эта информация должна сохраняться. Естественно, что в реальных условиях всегда имеют место искажения информации, которые не должны превосходить некоторых допустимых значений.

Этим условиям наиболее полно соответствует принцип гетеродинного преобразования частоты (рис.1).

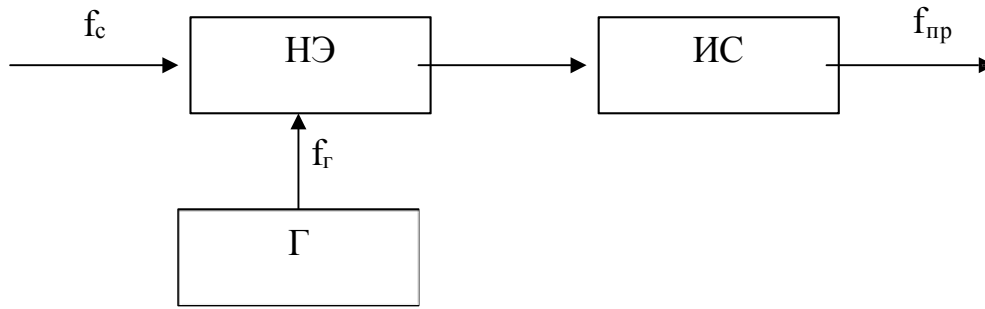


Рис.1. Гетеродинный преобразователь частоты

В таком преобразователе частоты сигнал и колебания маломощного вспомогательного генератора, называемого гетеродином (Г), одновременно воздействуют на нелинейный элемент (НЭ) (или на элемент с переменным параметром).

В результате на выходе нелинейного элемента (часто называемого смесителем – См) появляется множество комбинационных составляющих токов/напряжений с частотами:

$$f_k = |\pm n f_{\Gamma} \pm m f_c|, \quad (1)$$

где  $n = m = 0, 1, 2, \dots$

Одна из этих комбинационных частот используется в качестве новой несущей частоты выходного сигнала. Эта частота называется промежуточной частотой ( $f_{пр}$ ). Для её выделения в качестве нагрузки смесителя используют различные типы избирательных систем (ИС).

С точки зрения минимизации искажений информации при преобразовании частоты и улучшения избирательности при наличии мешающих сигналов, преобразователь частоты для сигнала должен быть линейным, т.е. в нем не должны порождаться гармоники частоты сигнала ( $m=1$ ). Это условие может выполняться достаточно точно, если сигнал является «малым». При этом его размах захватывает лишь небольшой участок характеристики преобразовательного элемента и её можно считать для напряжения сигнала линейной на этом участке.

По отношению к колебаниям гетеродина нелинейность преобразовательного элемента должна проявлять себя возможно сильнее. Обычно это приводит к необходимости иметь значительную амплитуду гетеродинного напряжения. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев выполняется условие:

$$U_c(t) \ll U_{\Gamma}(t).$$

До тех пор, пока выполняется это неравенство, свойства преобразователя частоты не зависят от амплитуды сигнала, а определяются свойствами преобразовательного элемента, амплитудной гетеродинного напряжения и стабильностью его колебаний.

Роль нелинейных или параметрических элементов в современных преобразователях частоты выполняют биполярные и полевые транзисторы, микросхемы, диоды.

В качестве избирательной системы используются одиночные колебательные контуры, двухконтурные фильтры и фильтры сосредоточенной избирательности различного вида.

Преобразователь частоты характеризуется рядом *качественных показателей*, основные из которых следующие:

– коэффициент преобразования ( $K_n$ ), являющийся отношением комплексных амплитуд напряжения промежуточной частоты  $\dot{U}_n$  и частоты сигнала  $\dot{U}_c$ :  $\dot{K}_n = \dot{U}_n / \dot{U}_c$ ;

– входное сопротивление  $\dot{Z}_{вх} = \dot{U}_c / \dot{I}_c$ ;

– выходное сопротивление  $\dot{Z}_{вых} = \dot{U}_n / \dot{I}_n$ .

Несмотря на большое разнообразие используемых нелинейных элементов и избирательных систем, возможно построение единой теории для описания основных процессов, происходящих в любом преобразователе частоты. Эта теория носит название общей теории преобразования частоты. Она построена в предположении «малости» сигнала  $\dot{U}_c \ll U_r$  и безынерционности преобразовательного элемента.

В общем случае смеситель любого преобразователя частоты рассматривают как нелинейный шестиполюсник (рис. 2), на выходе которого включена избирательная нагрузка  $\dot{Z}_H$ , настроенная на выбранное значение промежуточной частоты.

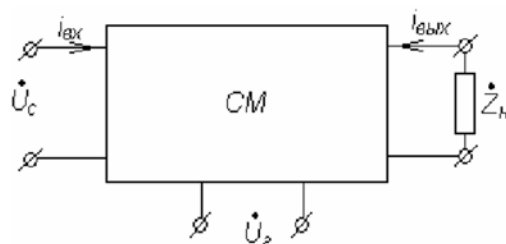


Рис. 2. Смеситель преобразователя частоты как нелинейный шестиполюсник

Для безынерционного преобразовательного элемента выходной ток в каждый момент времени определяется мгновенными значениями напряжений:

$$U_C(t), U_n(t), U_\Gamma(t), \text{ и}$$

$$i_{\text{вых}} = f(U_C, U_n, U_\Gamma).$$

Так как амплитуды напряжений  $\dot{U}_c$  и  $\dot{U}_n$  малы по сравнению с амплитудой напряжения гетеродин, то выражения для  $i_{\text{вых}}$  можно разложить в двойной ряд Тейлора в точке, задаваемой мгновенными значениями напряжения  $U_\Gamma(t)$ .

Такой подход позволяет представить преобразующий элемент совместно с гетеродином в виде квазилинейного четырехполюсника, характеризуемого четырьмя  $Y$  – параметрами, преобразовательными параметрами [1,3].

$$\dot{I}_n = 0,5G_{21} \dot{U}_c + G_{22} \dot{U}_n \quad (2)$$

$$\dot{I}_c = 0,5G_{12} \dot{U}_n + G_{11} \dot{U}_c, \quad (3)$$

где  $\dot{I}_0, G_{21}, G_{22}$  – постоянные составляющие выходного тока, крутизны

и выходной проводимости;

$\dot{I}_n, G_{21}, G_{22}$  – амплитуды "n"-х гармоник этих же величин.

Приведенные уравнения полностью описывают поведение преобразователя частоты как линейного четырехполюсника с характеристическими параметрами короткого замыкания:

- крутизной преобразователя  $S_n = \left. \dot{I}_n / \dot{U}_c \right|_{U_n=0} = 0,5G_{21}$ ;
- внутренней проводимостью  $G_{in} = \left. \dot{I}_n / \dot{U}_n \right|_{U_c=0} = G_{22}$ ;
- крутизной обратного преобразования  $S_{обр} = \left. \dot{I}_c / \dot{U}_n \right|_{U_c=0} = 0,5G_{12}$ ;
- входной проводимостью преобразователя  $G_{11} = \left. \dot{I}_c / \dot{U}_c \right|_{U_n=0} = G_{11}$ .

Таким образом, в первом приближении можно считать, что преобразователь частоты осуществляет математическую операцию перемножения напряжений сигнала и гетеродина. Эквивалентные схемы преобразовательного и усилительного каскада одинаковы. Отличие состоит только в значении параметров. В случае, если можно пренебречь обратным преобразованием частоты, то

$$\dot{Y}_{\text{вх}} = \dot{Y}_{11\pi}, \dot{Y}_{\text{вых}} = \dot{Y}_{22\pi} \text{ и } \dot{I}_n = \dot{S}_n \dot{U}_n.$$

Крутизна преобразования  $\dot{S}_n$  является важнейшим параметром преобразователя частоты, определяющим эффективность его работы. В практически важных случаях все операции по вычислению  $\dot{S}_n$ , с достаточной для инженерной практики точностью, могут быть выполнены аналитически.

При этом применяют различные способы аппроксимации зависимости крутизны активного прибора от напряжения гетеродина [3]. В частности, при линейной аппроксимации зависимости крутизны активного прибора от напряжения гетеродина, получены следующие расчетные соотношения:

$$\begin{aligned} S_n(1) &= 0,27S_{\text{max}}, \theta_{\text{opt}} = 120^\circ, \\ S_n(2) &= 0,14S_{\text{max}}, \theta_{\text{opt}} = 60^\circ, \\ S_n(3) &= 0,1S_{\text{max}}, \theta_{\text{opt}} = 40^\circ. \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь  $S_n(1)...S_n(3)$  - крутизна преобразования на 1, 2, 3 гармонике гетеродина, а  $\theta_{\text{opt}}(1)... \theta_{\text{opt}}(3)$  - соответствующие оптимальные углы отсечки напряжения гетеродина.

Данные соотношения с большой точностью описывают работу полевых транзисторов в режиме преобразования частоты.

Графики зависимостей  $S_n / S_{\text{max}}$  для  $n = 1, 2, 3$  от угла отсечки приведены на рис. 3.

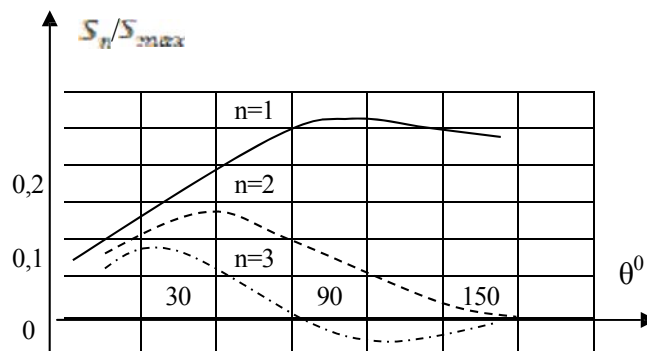


Рис. 3. Зависимости  $S_n / S_{\text{max}}$  от угла  $\Theta$  отсечки тока стока

Из них видно, что при  $n=1$  изменение угла отсечки от  $90^\circ$  до  $180^\circ$  мало влияет на крутизну преобразования, но в то же время при  $\Theta = 180^\circ$   $S_n(2) = S_n(3) = \dots = S_n(n) = 0$ , что очень важно для уменьшения числа

паразитных каналов приёма.

В общем случае частотная характеристика преобразователя частоты, работающего в квазилинейном режиме, имеет вид, приведенный на рис. 4.

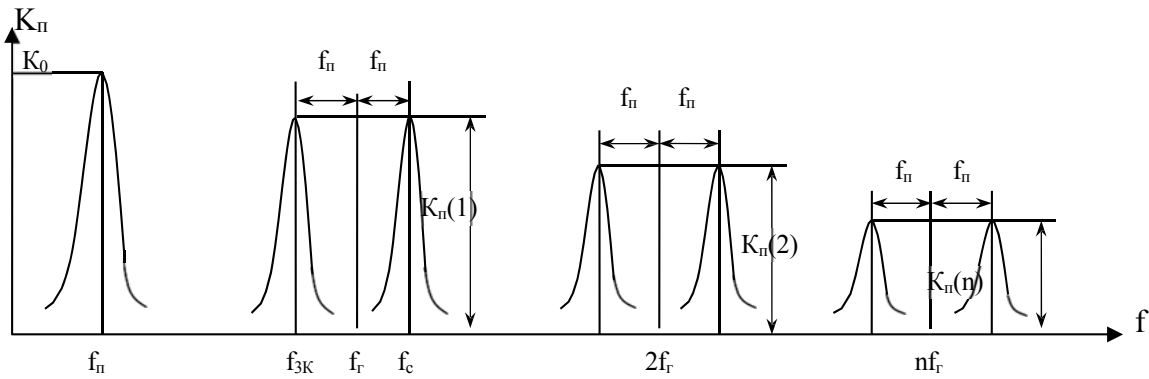


Рис. 4. Частотная характеристика преобразователя частоты

Применение балансных схем преобразователей частоты так же позволяет уменьшить число паразитных каналов приема. Преобразователь частоты можно сделать балансным как для входного, так и для гетеродинного сигналов. Такие схемы называют двойными балансными и обычно выполняют с использованием дифференциальных усилителей или диодов. На рис. 5-7 приведены примеры схем преобразователей частоты.

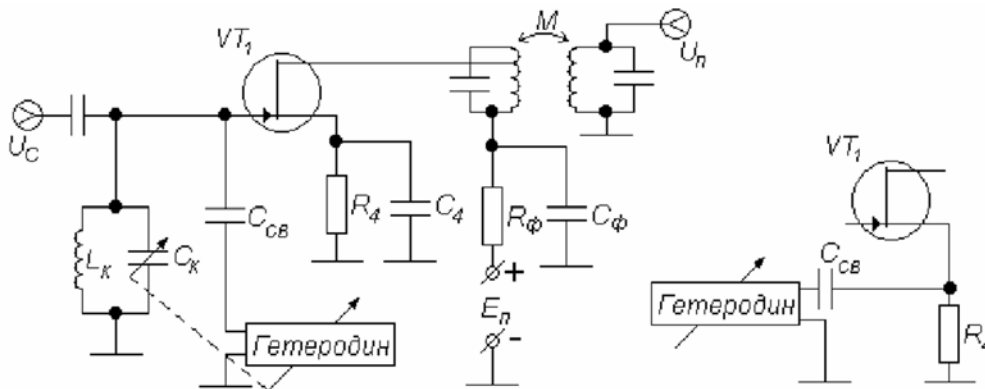


Рис. 5. Преобразователь частоты на полевом транзисторе

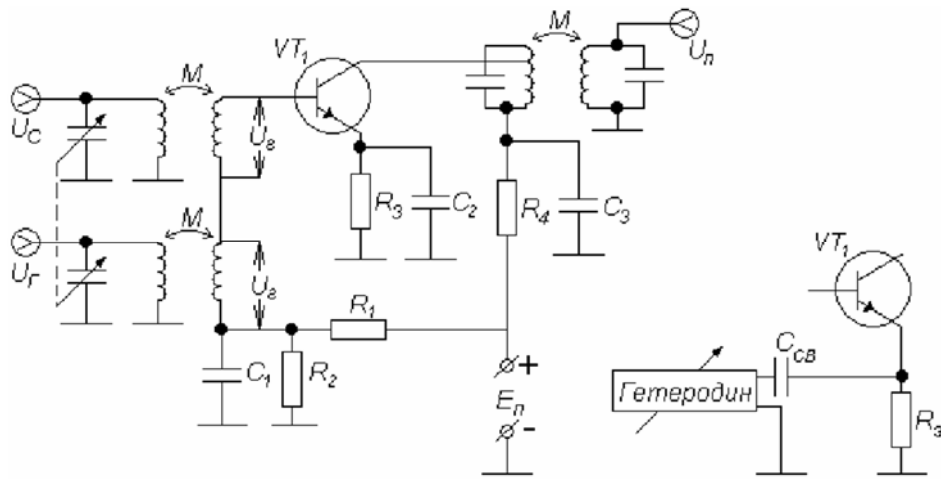


Рис. 6. Преобразователь частоты на биполярном транзисторе

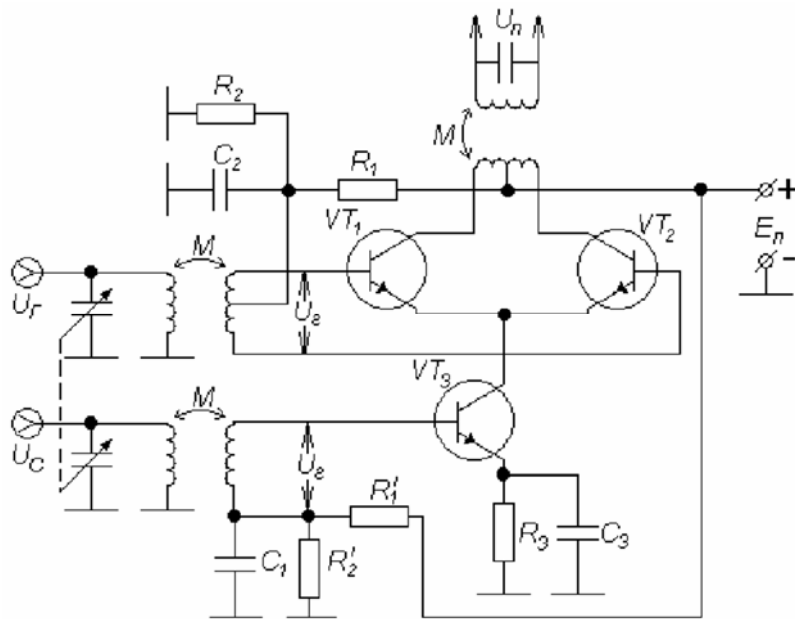


Рис. 7. Преобразователь частоты на дифференциальном каскаде

В схеме преобразователя частоты на однозатворном полевом транзисторе гетеродинное напряжение подается обычно через небольшую емкость связи  $C_{св}$  в цепь затвора или истока транзистора. Рабочая точка смесителя задается цепочкой автосмещения  $R_u C_u$ . В двухзатворных полевых транзисторах напряжения сигнала и гетеродина подаются на разные затворы, что практически полностью устраняет связь между сигнальным и гетеродинным контурами.

Существует много разновидностей смесителей на биполярных транзисторах. Из соображений развязки сигнального и гетеродинного контуров желательно подавать напряжения сигнала и гетеродина на разные электроды транзистора. Связь с гетеродином может быть выполнена как емкостного типа ( $C_{CB}$ ), так и индуктивного типа (см. рис. 6). Режим по постоянному току и температурная стабилизация обеспечиваются с помощью резисторов  $R_1, R_2, R_3$ .

На рис. 7 показан пример схемы балансного преобразователя частоты, выполненного на интегральной микросхеме, представляющий собой дифференциальный усилитель с генератором стабильного тока (ГСТ). Существуют и другие варианты балансных преобразователей. Общий принцип их действия состоит в том, что из напряжений сигнала и гетеродина одно приложено в обоих плечах синфазно, а второе противофазно.

Пусть, например, на дифференциальный каскад подается напряжение гетеродина  $u_z(t) = U_z \cos \omega_z t$ , а на базу транзистора ГСТ поступает напряжение сигнала  $u_c(t) = U_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$ , тогда выражение для коллекторного тока транзисторов дифференциального каскада может быть представлено в виде [3,4]:

$$i_{\text{вых}}(t) = \alpha I_0 \left( \frac{b_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos n \omega_z t \right) + \alpha S \frac{b_0}{2} U_c \cos(\omega_z t + \varphi) + \frac{1}{2} \alpha S U_c \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left\{ \cos \left[ \left( \omega_z + \omega_c \right) t + \varphi_c \right] + \cos \left[ \left( \omega_z - \omega_c \right) t - \varphi_c \right] \right\} \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент передачи эмиттерного тока в цепь коллектора транзистора дифференциального каскада;  $S$  – крутизна транзистора токопитающего каскада;  $b_n$  – коэффициенты разложения коллекторных токов дифференциального каскада в ряд Фурье.

Графики зависимостей  $b_n$  от относительных величин амплитуды сигнала гетеродина  $U_z / \varphi_z$  (где  $\varphi_z = KT/q$  – температурный потенциал) и от напряжения смещения между базами транзисторов дифференциального каскада  $U_{см}$  показаны на рис. 8.

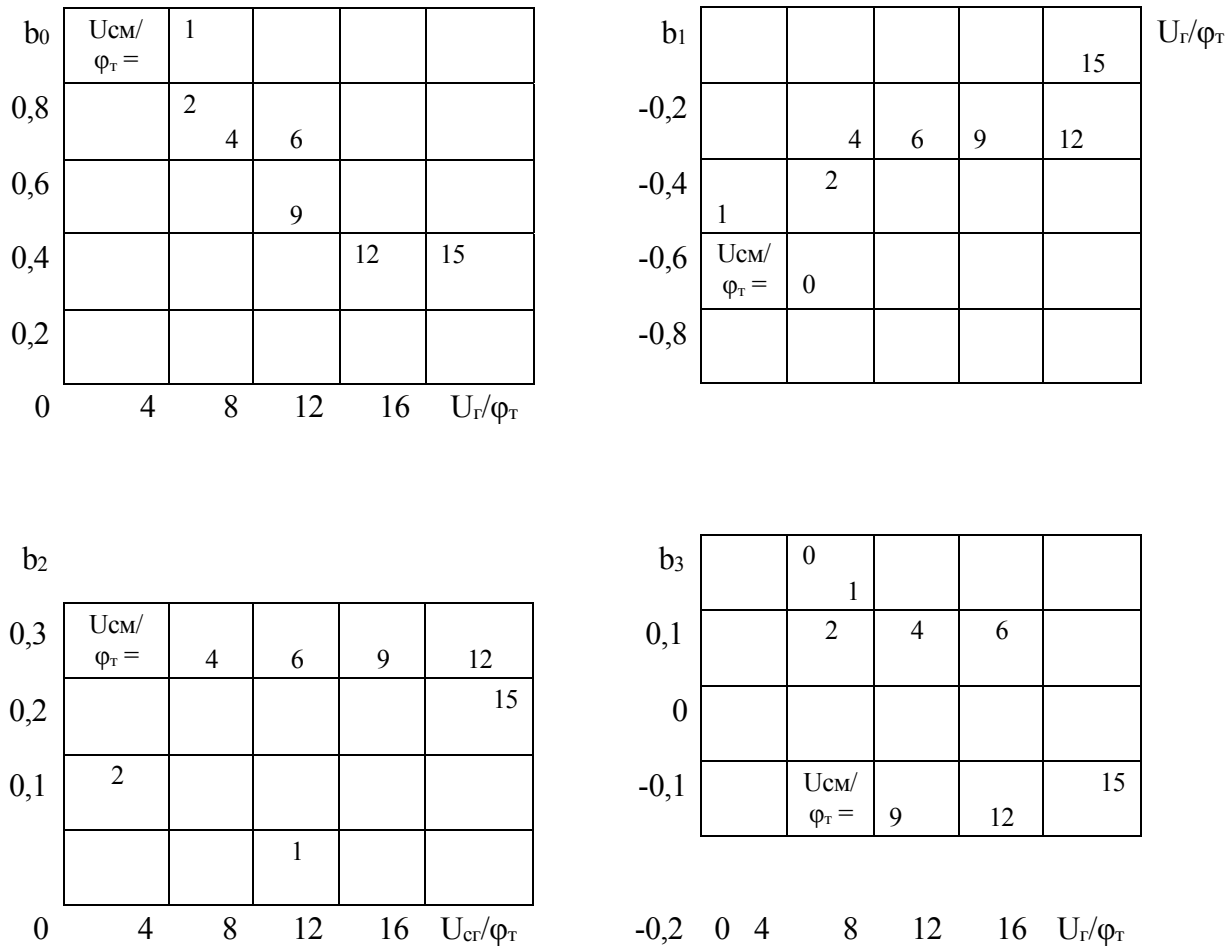


Рис. 8. Графики зависимостей  $b_n$  от напряжения гетеродина

Крутизна преобразования в этом случае определяется выражением:

$$S_{П_1} = \frac{di_{вых}}{dU_c} = 0,5\alpha S b_1 \quad (6)$$

Коэффициент передачи смесителя по напряжению для симметричного выхода:

$$K_{П} = 2S_{П_1} R_э, \quad (7)$$

где  $R_э$  – эквивалентное сопротивление нагрузки в коллекторной цепи транзисторов дифференциального каскада на частоте  $|\omega_c - \omega_c|$ . Для полосового фильтра:

$$R_э = \frac{\beta}{(1+\beta^2) \cdot \rho \cdot Q \cdot m_1 \cdot m_2}.$$

При несимметричном включении нагрузки (только к одному из коллекторов дифференциального каскада) коэффициент передачи смесителя

уменьшается в 2 раза. При симметричном включении нагрузки в спектре выходного сигнала отсутствует составляющая с частотой  $\omega_r$ .

В случае, если на дифференциальный каскад подается напряжение сигнала, а на токопитающий каскад - напряжение гетеродина, крутизна преобразователя частоты при симметричном выходе вычисляется по формуле:

$$S_{П2} = \alpha S U_c \frac{db_1}{dU} . \quad (8)$$

c

Из графиков зависимостей  $b_1$  от амплитуды  $U_r$  и напряжения смещения  $U_{см}$  видно, что смеситель наиболее эффективно работает при нулевом напряжении смещения. При этом в спектре выходного сигнала отсутствуют как четные гармоники частоты  $\omega_r$ , так и комбинационные составляющие с частотами  $2n\omega_r \pm \omega_c$ .

Различают два режима работы смесителя при подаче напряжения гетеродина на токопитающий каскад.

Если  $U_r < \varphi_r$ , то коэффициент  $b_1 = -U_r/4\varphi_r$ , а все другие коэффициенты  $b_n (n \geq 2)$  можно полагать практически равными нулю (рис. 8). В этом случае крутизна преобразования  $S_{П2}$  максимальна и не зависит от  $U_r$ . Выходное напряжение будет пропорционально произведению амплитуд входных напряжений. Режим характеризуется высокой чистотой спектра выходных токов, в котором, кроме основных частот (если выход несимметричный), содержатся только две комбинационные составляющие с частотами  $\omega_r - \omega_c$  и  $\omega_r + \omega_c$ .

При  $U_r > (5..7)\varphi_m$ ,  $b_1 \simeq const = -2/\pi$ .

В этом случае выходное напряжение смесителя максимально и почти не зависит от  $U_r$  (рис. 8), что используется для подавления влияния пульсации амплитуды  $U_r$  на выходной сигнал смесителя. Смеситель работает в ключевом режиме, причем транзисторы дифференциального каскада поочередно закрываются и открываются с частотой  $\omega_r$ .

Таким образом, смеситель создает спектр гармоник  $|\pm n\omega_r \pm m\omega_c|$ , где  $n$  и  $m$  – натуральные целые числа. При  $U_r < \varphi_r$   $n$  равно нулю или единице. Если токопитающий каскад работает в линейном режиме, то  $m$  также равно нулю или единице. Нелинейные искажения смесителя очень малы и определяются только искажениями, вносимыми токопитающим каскадом. Коэффициент гармоник напряжения, подаваемого на дифференциальный каскад, слабо влияет на нелинейные искажения в смесителе. Поэтому дифференциальный вход лучше использовать для подачи напряжения гетеродина.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментальной части работы изучаются свойства преобразователя частоты, реализованного с использованием схемы дифференциального усилителя с ГСТ.

Лабораторная установка

Схема лабораторной установки показана на рис. 9.

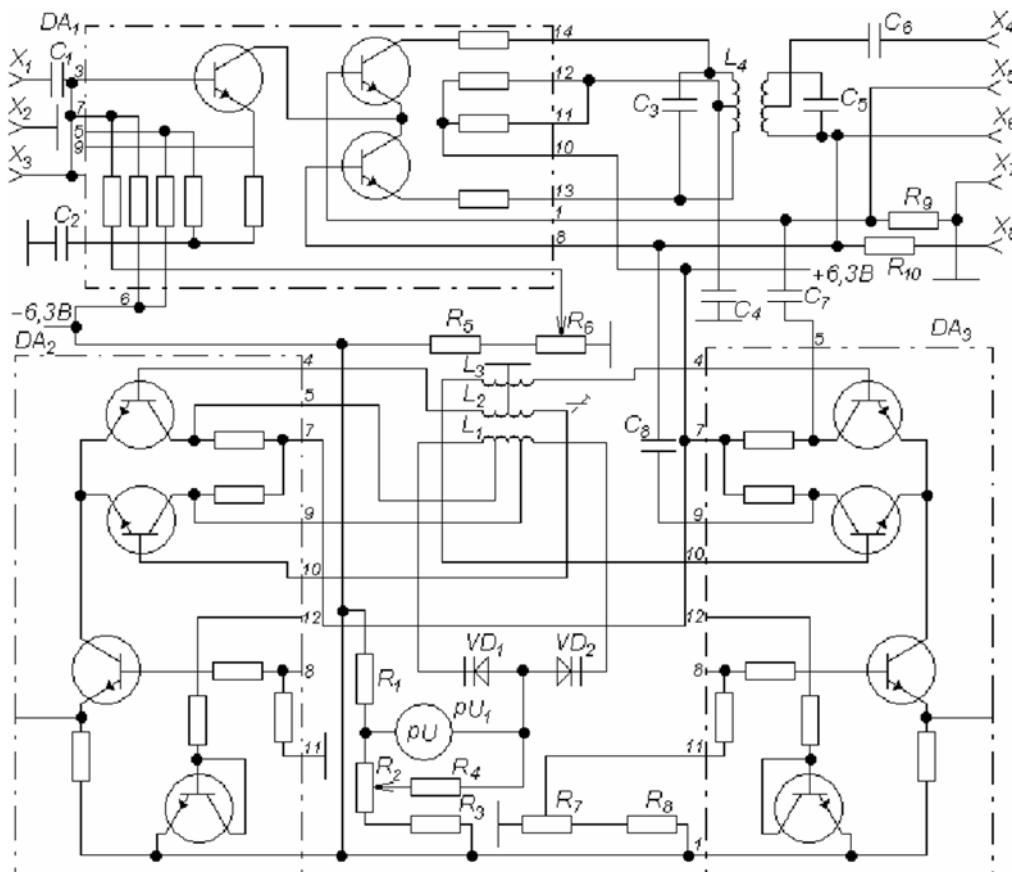


Рис. 9. Схема лабораторной установки

Макет включает в себя балансный смеситель и гетеродин с буферным усилителем, выполненных на микросхемах DA<sub>1</sub>, DA<sub>2</sub> и DA<sub>3</sub>.

Входной сигнал подается на токопитающий транзистор (контакты 3,7) микросхемы DA<sub>1</sub>. На дифференциальный каскад (контакты 1, 2) этой же микросхемы поступает напряжение гетеродина, прошедшее через буферный усилитель на микросхеме DA<sub>3</sub>.

Выбор величины тока, протекающего через микросхему DA<sub>1</sub>, осуществляется резистором R<sub>6</sub>, входящим в делитель напряжения R<sub>5</sub>R<sub>6</sub>.

Гетеродин представляет собой генератор гармонических колебаний с трансформаторной обратной связью. Колебательный контур с L<sub>1</sub>, VD<sub>1</sub> и VD<sub>2</sub> включен между коллекторами дифференциального каскада

микросхемы DA<sub>2</sub>. Положительная обратная связь обеспечивается с помощью дополнительной обмотки L<sub>2</sub>, напряжение с которой подается на вход дифференциального каскада. Выходные напряжения, снимаемые с обмотки L<sub>3</sub> относительно нулевой точки, изменяются противофазно и используются для возбуждения буферного усилителя. Настройка гетеродина на требуемую частоту осуществляется путем подачи на варикапы VD<sub>1</sub>, VD<sub>2</sub> напряжения, снимаемого с делителя напряжения R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> через развязывающее сопротивление R<sub>4</sub>. В точке соединения резисторов R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> потенциал выбран равным потенциалам коллекторов дифференциального каскада микросхемы DA<sub>2</sub>, что дало возможность измерить напряжение на варикапах VD<sub>1</sub>, VD<sub>2</sub>.

Автогенератор данного типа практически не имеет четных гармоник, что облегчает фильтрацию побочных составляющих выходного сигнала. Буферный каскад служит для уменьшения влияния нагрузки на стабильность частоты генерируемых колебаний гетеродина и позволяет регулировать амплитуду его напряжения, подаваемого на смеситель. Регулировка уровня выходного сигнала осуществляется резистором R<sub>7</sub>.

Нагрузкой смесителя служит двухконтурный фильтр L<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>, L<sub>5</sub>, C<sub>5</sub>, настроенный на промежуточную частоту. Преобразование частоты производится за счет изменения крутизны транзисторов при воздействии напряжения гетеродина.

### Домашнее задание

1. Вычислить коэффициент передачи по напряжению смесителя с симметричным выходом для включения гетеродина на дифференциальный каскад, а входного сигнала - на токопитаний транзистор. Выбрать оптимальную величину напряжения гетеродина.

2. Рассчитать коэффициент передачи по напряжению смесителя с симметричным выходом при подаче напряжения гетеродина на токопитаний транзистор, а выходного сигнала - на дифференциальный каскад. Расчет произвести для  $U_{г} < \varphi_{г}$  и  $U_{г} > (5...7) \varphi_{г}$ .

3. Исходные данные для расчета:

$$\begin{aligned} m_1 &= 1, & m_2 &= 0.12, & f_{п} &= 500 \text{ кГц}; \\ Q_3 &= 80, & C_3 &= 730 \text{ пФ}, & \beta &= 1. \end{aligned}$$

Параметры транзисторов, входящих в схему смесителя, взять из задания лаб. работы №2.

### 2.3 Порядок выполнения работы

1. Снять зависимость коэффициента передачи каскада преобразования частоты от величины напряжения гетеродина.

Для этого на вход схемы (гнезда  $X_1, X_2$ ) подать немодулированное напряжение генератора сигналов высокочастотного (ГСВ)  $U_c = 50$  мВ с частотой  $f_c = 0,8$  МГц. К выходу смесителя (гнезда  $X_4, X_7$ ) подключить милливольтметр, а к выходу гетеродина (гнезда  $X_5, X_8$ ) - осциллограф. Переменный резистор  $R_6$  установить в крайнее левое положение (поворот против часовой стрелки до упора).

Включить тумблер “Сеть”. Установить переменным резистором  $R_7$  на выходе гетеродина по осциллографу напряжение  $U_r = 25$  мВ. Вращая ручку переменного резистора  $R_2$ , добиться максимума сигнала на выходе смесителя. Затем, изменяя положение ручки переменного резистора  $R_7$  и отмечая при этом величины напряжения гетеродина и выходного сигнала смесителя, снять требуемую зависимость. Результаты занести в табл. 2.1. Построить график  $U_{\text{вых}} = \varphi(U_r)$ .

Таблица 2.1

$U_r, \text{ мВ}$	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200
$U_{\text{вых}}, \text{ мВ}$									
$K_{\text{п}}$									

На основании полученных результатов сделать вывод о допустимых пределах изменения напряжения гетеродина. Выбрать оптимальное напряжение  $U_r$  и установить его на выходе гетеродина.

2. Снять зависимость коэффициента передачи преобразователя частоты от величины напряжения смещения на базе токопитающего транзистора.

Для этого, не изменяя места подключения, амплитуды и частоты ГСВ, места подключения милливольтметра, положения ручек регулировки  $R_2$  и  $R_7$ , отключить осциллограф от гнезда  $X_5, X_8$  и подсоединить к гнездам  $X_3, X_8$ . При помощи осциллографа измерять постоянное напряжение смещения.

Изменяя положение ручки  $R_6$ , и записывая результаты измерения напряжения смещения и показания милливольтметра, снять искомую зависимость. Результаты занести в табл. 2.2. Построить график зависимости  $U_{\text{вых}} = \varphi(U_{R6})$ .

Таблица 2.2

$U_{R6}, В$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$U_{ВЫХ}, мВ$									
$K_{п}$									

3. Исследовать частотную характеристику преобразователя частоты, т.е. зависимость напряжения промежуточной частоты от частоты сигнала при постоянной частоте и амплитуде напряжения гетеродина.

Для этого, не изменяя подключений и положений органов регулировок после проведения предыдущего эксперимента, установить ручку  $R_6$  в крайнее левое положение (против часовой стрелки), отключить осциллограф. Изменяя частоту ГСВ от 150 кГц до 3000 кГц и поддерживая неизменным выходное напряжение ГСВ, измерять выходное напряжение смесителя, обратив внимание и особенно тщательно сняв зависимость вблизи зеркальной частоты, частоты, равной промежуточной, побочных каналов, отстоящих от номинальной частоты приемника на  $1/2$  и  $2/3$  промежуточной частоты, комбинационных каналов вида  $m f_c \pm n f_r$ , где  $f_c$  - частота сигнала ГСВ на входе;  $f_r$  - частота гетеродина приемника;  $f_{п}$  - промежуточная частота приемника;  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $m = 1, 2, 3, \dots$ . Результаты занести в табл. 2.3 и отобразить на графике  $U_{ВЫХ} = \varphi(f_c)$ .

Таблица 2.3

$f_c, мГц$	
$U_{ВЫХ}, мВ$	
$U_{ВЫХ}/U_{ВЫХ}$	

4. Снять зависимость частоты гетеродина от величины напряжения смещения на варикапах  $VD_1$  и  $VD_2$ .

Для этого ручку переменного резистора  $R_7$  установить в крайнее левое положение (против часовой стрелки). < гнездам  $X_5, X_7$  подключить частотомер. Изменяя положение ручки переменного резистора  $R_2$  и отмечая показания прибора  $pU_1$  и частотомера, снять искомую зависимость. Результаты занести в табл. 2.4. Построить график  $f_r = f(U_{пп})$ .

Таблица 2.4

U <sub>ип</sub> , В	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
F <sub>г</sub> , кГц									

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит принцип преобразования частоты? Назначение преобразователя частоты.
2. Какие дополнительные каналы приема возникают при преобразовании частоты?
3. Каковы критерии выбора величины напряжения гетеродина в преобразователе частоты?
4. В каких случаях используется двойное преобразование частоты?
5. Принцип балансного преобразования частоты. В чем состоят преимущества балансных преобразователей частоты?
6. Что такое сопряжение настроек контуров? Как оно осуществляется?
7. Поясните причины появления свистов в приемнике.
8. Что такое крутизна преобразования?
9. Расскажите о методах расчета крутизны преобразования.
10. Какой транзистор лучше работает в смесителе: биполярный или полевой? Почему?
11. Нарисуйте схемы смесителей на биполярных, полевых транзисторах.
12. Что такое "верхняя" и "нижняя" настройка гетеродина? Какая из этих настроек чаще применяется и почему?
13. Что такое "зеркальная" помеха? Чем определяется избирательность по отношению к "зеркальной" помехе?
14. Каковы особенности работы смесителя, собранного на микросхеме дифференциального усилителя?
15. Особенности выполнения преобразователей частоты СВЧ диапазона.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Буга Н.Н., Фалько А.И., Чистяков Н.И. Радиоприемные устройства: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986. - С. 91-97, 101-112.
2. Радиоприемные устройства: Учебное пособие / Давыдов Ю.Т., Данич Ю.С. и др. /Под ред. А.П. Жуковского. М.: Высшая школа, 1989.

С. 81-96.

3. Сергеев В.Г. Устройства приема и цифровой обработки сигналов. Преобразователи частоты. М.: МИИГА, 1986. С.10-41.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 «ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНОГО И ЧАСТОТНОГО ДЕТЕКТОРОВ»**

Целью работы является ознакомление со схемами амплитудного и частотного детекторов, экспериментальное изучение свойств диодного амплитудного и балансного частотного детектора, приобретение навыков по расчету их параметров, настройке и регулировке.

### **1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

В амплитудном детекторе осуществляется выделение огибающей амплитудно-модулированного сигнала с одновременным устранением несущего колебания. Роль несущих колебаний могут выполнять как гармонические колебания, так и последовательности радио- или видеоимпульсов.

В частотном детекторе выделяется низкочастотная модулирующая частота из частотно-модулированного сигнала.

В состав любого детектора входит нелинейный элемент для образования спектральных компонент, соответствующих модулирующей частоте, и линейный фильтр, для выделения компонент, соответствующих спектру модулирующих частот, и устранения компонент, соответствующих спектру несущего колебания и его гармоник. Таким образом, функциональная схема детектора может быть представлена в виде последовательно соединенных нелинейного элемента и фильтра нижних частот. В качестве нелинейных элементов используют полупроводниковые диоды, а также биполярные и полевые транзисторы. Роль фильтра, как правило, выполняет цепь, состоящая из резистора и шунтирующей его емкости. В настоящее время элементы детектора чаще реализуют в одной микросхеме.

На рис.1 показана схема последовательного амплитудного детектора, а на рис.2 - параллельного детектора.

Схема параллельного амплитудного детектора дополнена фильтром нижних частот  $R_{\phi}C_{\phi}$ .

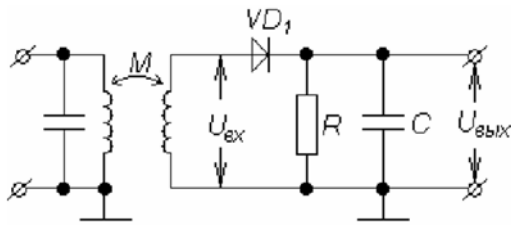


Рис.1. АД последовательного типа

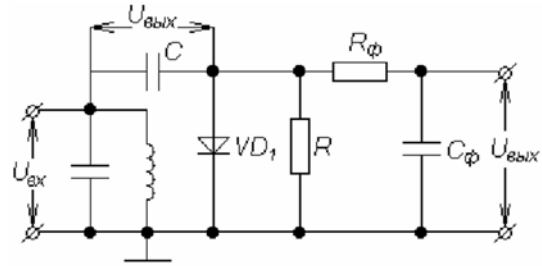


Рис.2. АД параллельного типа

Свойства детекторов принято характеризовать следующими показателями:

1. Коэффициент передачи для немодулированного сигнала

$$k_{д=} = \Delta U_{=} / U_0 \quad (1)$$

и для модулированного сигнала

$$k_{д\Omega} = \frac{|U_{\Omega}|}{m_0 U_0} \quad (2)$$

где  $\Delta U_{=} = U_{=} - U_n$  - прирост постоянного напряжения на нагрузке  $U_{=}$  по сравнению с напряжением покоя  $U_n$ , вызванного приложением к входу детектора немодулированного колебания с амплитудой  $U_0$ ;

$U_{\Omega}$  - амплитуда выходного напряжения модуляционной частоты  $\Omega$ ;

$m_0 U_0$  - амплитуда изменения огибающей входного модулированного сигнала.

2. Входное сопротивление

$$Z_{вх} = U_0 / I_{0\omega}$$

Реактивная составляющая входного сопротивления обычно является емкостной, она легко находится из схем детектора и компенсируется настройкой входного контура. Поэтому аналитически обычно рассчитывается активное входное сопротивление детектора

$$R_{вх} = \frac{U_0}{I} \quad (3)$$

Здесь  $I_{0\omega}$  - амплитуда первой гармоники входного тока детектора.

3. *Выходное сопротивление детектора*, обычно также рассчитывается активная составляющая сопротивления

$$R_{i_d} = \frac{U_{\Omega}}{I_{\Omega}} \quad (4)$$

4. *Частотные и фазовые искажения огибающей* характеризуются, как и для усилителей, значениями нижней и верхней граничных частот и отклонениями фазовой характеристики от касательной к ней в точке  $\Omega = \Omega_0$  на граничных частотах.

5. *Нелинейные искажения* оцениваются по величине коэффициента нелинейных искажений

$$k_H = \sqrt{p_2 + p_3 + \dots / p_1}$$

где  $p_2, p_3 \dots$  - мощности гармонических составляющих частот модуляции;  
 $p_1$  - мощность выходного сигнала на частоте модуляции.

6. *Коэффициент подавления несущего колебания*

$$\eta_{\Pi} = \frac{\Delta U_{0\text{вых}}}{U_0}, \quad (5)$$

где  $\Delta U_{0\text{вых}}$  - амплитуда несущего колебания на выходе детектора.

Величина коэффициента подавления зависит от схемы детектора, параметров фильтра, вида и режима работы нелинейного элемента.

Все качественные показатели детектора зависят в общем случае от амплитуды подаваемых на него колебаний, поэтому принято рассматривать отдельно детектирование слабых и сильных сигналов. Для этих двух режимов разработаны достаточно точные аналитические методы расчета амплитудных детекторов. При этом само понятие "слабого" или "сильного" сигнала относительно и зависит от свойств применяемого нелинейного элемента.

При поступлении на вход детектора "слабых" сигналов говорят, что имеет место режим квадратичного детектирования. Коэффициент передачи квадратичного детектора

$$k_{\text{д}} = - \frac{S'R_H}{2(1+SR_H)} U_{m\omega}, \quad (6)$$

где  $S, S'$  - крутизна В/А характеристики диода и ее производная кривизна в

точке  $U=0$ .

Коэффициент передачи зависит от амплитуды входного сигнала, имеет малую величину и чем меньше амплитуда,  $U_{m\omega}$  тем менее эффективно детектирование. Напряжение на выходе детектора пропорционально квадрату входного напряжения

$$U = \frac{1}{4} \cdot \frac{S' R_H}{1 + SR_H} \cdot U_{m\omega}^2 \quad (7)$$

Другими существенными недостатками квадратичного режима являются значительные нелинейные искажения модулирующего сигнала (достигающие величины  $m/4$ ) и низкое входное сопротивление детектора  $R_{ex} \cong 1/S$ .

В режиме линейного детектирования (сильный сигнал) коэффициент передачи детектора практически не зависит от амплитуды входного сигнала, а определяется углом отсечки тока, текущего через диод

$$k_D = \cos \theta \quad (8)$$

Работа детектора описывается трансцендентным уравнением

$$\operatorname{tg} \theta - \theta = \frac{\pi}{SR} \quad (9)$$

которое решается графически или подбором. При увеличении  $SR$  угол отсечки уменьшается и в пределе стремится к нулю. При  $SR \geq 30$   $\theta = \sqrt[3]{3\pi/SR}$ . В случае, если есть необходимость учета обратного сопротивления диода, то

$$\theta \approx \sqrt[3]{3\pi/SR \cdot (1 + R/R_{iобр})}$$

Угол отсечки, в этом случае, увеличивается, а коэффициент передачи детектора уменьшается. Входное сопротивление последовательного линейного амплитудного детектора в общем случае определяется выражением

$$R_{BX} = R \cdot \frac{\operatorname{tg} \theta - \theta}{\theta - 0.5 \sin 2\theta} \quad (10)$$

а при малых углах отсечки  $R_{ex} \approx R/2$ , для параллельного детектора  $R_{ex} \approx R/3$ .

Элементы нагрузки детектора рассчитываются исходя из условий его безынерционной работы и отсутствия искажений, обусловленных

разностью величины нагрузки по постоянному току и токам модулирующей частоты.

Эквивалентная емкость нагрузки рассчитывается из двух условий. Из условия отсутствия нелинейных искажений при максимальном (критическом) коэффициенте модуляции  $m_{\max}$  и максимальной частоте модуляции  $F_{\max}$  вследствие инерционности детектора.

$$C \leq \frac{\sqrt{1-m^2}}{2\pi F_{\max} R \cdot m_{\max}} \quad (11)$$

и из условия допустимых частотных искажений

$$C \leq \frac{\sqrt{M_B^2 - 1}}{2\pi F_{\max} R_{\text{д}}}, \quad (12)$$

где  $R_{\text{д}} \approx \frac{\pi}{S\theta}$  - динамическое внутреннее сопротивление детектора, а

$M_B$  - коэффициент частотных искажений на  $F_{\max}$  (обычно  $M_B = 1,05 - 1,2$ ).

Из двух полученных значений  $C$  выбирают меньшую величину. Обычно при выполнении первого условия (безынерционности детектора) обеспечивается и выполнение второго условия малости частотных искажений. Следует помнить, что с уменьшением  $C$  ухудшается фильтрация напряжения промежуточной частоты, которая проходит на выход детектора.

Для увеличения входного сопротивления амплитудного детектора, уменьшения нелинейных искажений при детектировании и увеличения коэффициента фильтрации сигнала промежуточной частоты часто идут на уменьшение коэффициента передачи детектора, применяя разделенную нагрузку в виде делителя из двух резисторов  $R'$  и  $R''$ , как это показано на рис.3

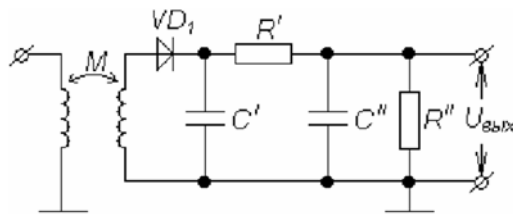


Рис. 3. Схема АД с разделенной нагрузкой

Величину  $R''$  при  $m_{\max} = 0,8$  принимают равной

$$R'' = 0.1R \left( 1 + \sqrt{1 + 20 \frac{R_{\text{exVHC}}}{R}} \right), \quad (13)$$

где  $R_{\text{вхУНЧ}}$  - входное сопротивление каскаде УНЧ, подключаемого к выходу детектора. Тогда  $R' = R - R''$ . Емкости нагрузки детектора определяются из соотношений

$$C'' = \frac{0.5 \dots 0.8}{f_{\text{П}} R'} (C_{\text{вх}} + C_{M2}); \quad C' = C - \frac{0.5 \dots 0.8}{f_{\text{П}} R'} \quad (14)$$

где  $C_{\text{вх}}$  - входная емкость УНЧ;  $C_{M2}$  - емкость монтажа со стороны входа УНЧ. Коэффициент фильтрации напряжения промежуточной частоты

$$\eta_{\phi} = \frac{1}{C'_{\text{д}}} (2\pi \cdot f_{\text{П}} C' C'' R'), \quad (15)$$

где  $C'_{\text{д}} = C_{\text{д}} + C_{M1}$  - сумма емкости диода и емкости монтажа цепи диода. Обычно  $C_{M1} = (2-5) \text{ пФ}$ .

Напряжение звуковой частоты на входе УНЧ

$$U_{\Omega} = U_{\omega} k_p m, \quad (16)$$

где  $k_p$  - коэффициент передачи детектора с учетом деления нагрузки

$$k_p = k \frac{R'' R_{\text{вхУНЧ}}}{R'(R'' + R_{\text{вхУНЧ}}) + R'' R_{\text{вхУНЧ}}} \quad (17)$$

Для частотного детектирования ЧМ колебание преобразуется в колебание, модулированное на амплитуде, фазе или в импульсно-модулированное колебание, с последующим применением амплитудного, фазового или пикового детекторов.

На рис.4 представлена схема балансного частотного детектора с фазовым преобразованием вида модуляции, выполненного на основе двухконтурного полосового фильтра L1C2 и L2C6 и двух амплитудных детекторов VD1, R, C и VD2, R, C [1.3]

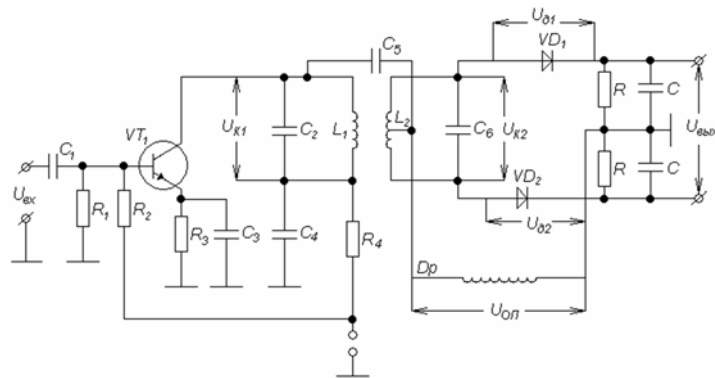


Рис.4. Балансный ЧД со связными контурами

Транзистор VT1 обычно работает в режиме амплитудного ограничителя. Его рабочая точка и температурная стабилизация обеспечиваются резисторами R1, R2 и R3.

Расчет преобразователя вида модуляции проводят по заданному значению допустимых нелинейных искажений  $K_T$  модулирующего сигнала. Наименьшие нелинейные искажения соответствуют значению фактора связи между контурами  $\beta = 2..3$ . Наибольшая крутизна детекторной характеристики обеспечивается при  $\beta = 1$ .

В табл.1.1 приведены величины  $K_T$  и соответствующих им коэффициентов использования полосы пропускания частотного детектора  $B = 2\Delta F_{\max} / \Delta F$  (где  $F_{\max}$  - максимальная девиация частоты,  $\Delta F$  - полоса пропускания ЧМ детектора, определяемая разностью частот между экстремумами статической характеристики детектора) и отношений  $\gamma = k_{ПМ} / k_{ПМ \max}$ , где  $k_{ПМ}$  и  $k_{ПМ \max}$  - рабочий и максимально возможный при  $\beta \rightarrow \infty$  коэффициенты передачи преобразователя модуляции.

Таблица 1.1

$K_T, \%$		0.2	0.6	1.0	1.4	2.0	3.0	4.0	5.0
$\beta = 1$		0.005	0.015	0.025	0.035	0.042	0.067	0.085	-
	B	0.15	0.27	0.35	0.41	0.47	0.58	0.67	-
$\beta = 2$		0.07	0.12	0.17	0.21	0.25	0.3	0.33	0.36
	B	0.35	0.48	0.56	0.62	0.68	0.76	0.82	0.87
$\beta = 3$		0.02	0.07	0.59	0.61	0.63	0.66	0.67	0.69
	B	0.15	0.32	0.87	0.89	0.9	0.9	0.9	0.9

По допустимому значению коэффициента гармоник  $K_T$  следует найти максимальное отношение  $\gamma$ , что определяет B и  $\beta$ . Для выбранного значения B вычисляется полоса пропускания частотного детектора  $\Delta F = 2\Delta F_{\max} / B$ . Зная  $\beta$ , можно рассчитать требуемую эквивалентную добротность связанных контуров  $Q_{\text{э}} = \beta (f_{\text{п}} / \Delta F)$  - и коэффициент связи

между контурами  $k_{\text{св}} = \beta / Q_{\text{э}}$ .

Входное сопротивление частотного детектора, обеспечивающее требуемое эквивалентное затухание второго контура при полном подключении к нему детектора, определяется выражением

$$R_{ex} = \pi f_{II} L (Q_K - Q_{\Delta})^{-1} Q_K Q_{\Delta}, \quad (18)$$

где  $Q_K$  - конструктивная добротность контура.

Коэффициент подключения транзистора ограничителя к первому контуру

$$p_1 = \sqrt{\frac{Q_K - Q_{\Delta}}{2\pi f_{II} L Q_K Q_{\Delta} (G_{вых} + G_{ex})}}, \quad (19)$$

где  $R_{вых}$  - выходное сопротивление ограничителя.

Сопротивления нагрузки детектора  $R$  определяются формулой

$$R = \frac{2R_{iобр} R_{ex}}{R_{iобр} - 3R_{ex}}; \quad (20)$$

при этом должно выполняться условие  $R_{iобр} > 3R_{ex}$ .

Емкости, шунтирующие  $R$ , вычисляются по формуле

$$C \leq \frac{\sqrt{1 - m_{max}^2}}{2\pi F_{max} R m_{max}}, \quad (21)$$

где  $m_{max} \approx 0.5$  – максимальный коэффициент модуляции сигнала на выходе АМ детектора.

Угол отсечки тока диодов АМ детектора, как и в предыдущем случае, находится по формуле

$$\theta = \sqrt[3]{3\pi / SR}.$$

Крутизна характеристики АМ детектора и его внутреннее сопротивление равны

$$S_{Д} = \frac{\sin\theta}{\pi}, \quad R_{Д} = \frac{\pi}{S\theta}.$$

Коэффициент передачи детектора АМ сигналов

$$k_{Д} = S_{Д} R_{Д}, \quad R_{Д} = \frac{1}{\left( \frac{1}{R_{иД}} + \frac{1}{R_{общ}} + \frac{1}{R_{exVHC}} \right)}$$

Тогда коэффициент передачи детектора ЧМ сигналов (без учета коэффициента передачи ограничителя) будет равен

$$k_{\text{ЧД}} = 0,5 p_1 R_3 k_{\text{Д}} \varphi(\beta, \sigma_M), \quad (22)$$

где  $R_3 = 2\pi f_{\text{П}} L Q_3$  - эквивалентное сопротивление контура преобразователя модуляции.

$$\varphi(\beta, \sigma_M) = \frac{\sqrt{1 + (\beta/2 + \sigma_M)^2} - \sqrt{1 + (\beta/2 - \sigma_M)^2}}{\sqrt{1 + \beta^2 - \sigma_M^2} + 4\sigma_M^2},$$

$\sigma_M = \frac{2\Delta F \max}{f_{\text{П}}} Q_3$  - обобщенная расстройка, соответствующая максимальной

девиации частоты.

При  $\left(\frac{\sigma_M}{\beta}\right)^2 \ll 1$

$$\varphi(\beta, \sigma_M) \approx \frac{2\beta\sigma_M}{(1 + \beta^2)\sqrt{4 + \beta^2}}.$$

Величину емкости  $C$  вычисляют по формуле  $\frac{(50 \dots 100)}{2\pi f_{\text{П}} R_3}$ . Индуктивность

дросселя должна быть примерно в 10 раз больше индуктивности контурных катушек.

Амплитудно-частотная характеристика ЧД с учетом ограничителя определяется выражением  $U_{\text{вых}} = |y_{21}| U_{\text{вх}} p_1 k_g \varphi(\beta, \sigma)$ ,

где  $\sigma = \frac{2\Delta f}{f_{\text{П}} d_3}$  - обобщенная расстройка при выбранных  $\Delta f$ .

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментальной части работы изучаются свойства последовательного амплитудного детектора и балансного частотного детектора с фазовым преобразованием вида модуляции.

### Лабораторная установка

Исследуемые схемы детекторов показаны на рис.5 и рис.6. Детектор АМ сигналов (рис.5) собран по последовательной схеме. Модулированный сигнал через обмотку связи L1 поступает на колебательный контур L2C1, настроенный примерно на частоту (450 – 500) кГц. Величины сопротивления нагрузки и шунтирующей емкости изменяются переключателями S1 и S2. Исследование детектора с разделенной нагрузкой производится при установке S2 в положение 3. При этом тумблер S3

позволяет сравнить параметры выходных сигналов, получаемых при разделении и без разделения нагрузки.

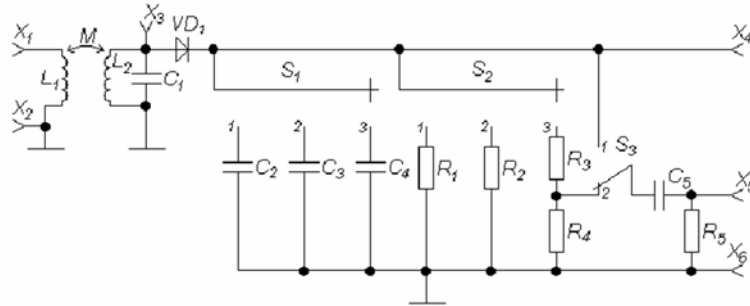


Рис. 5. Схема лабораторного макета АД

Детектор ЧМ сигналов (рис.6) собран в том же блоке, что и детектор амплитудно-модулированных сигналов. Его схема, для подавления паразитной амплитудной модуляции, содержит ограничитель, собранный на микросхеме 175 УВ2.

В другом варианте макет схемы ЧД реализован на специализированной МС 235 ДС1, представляющей собой схему балансного детектора с фазовым преобразованием вида модуляции [21].

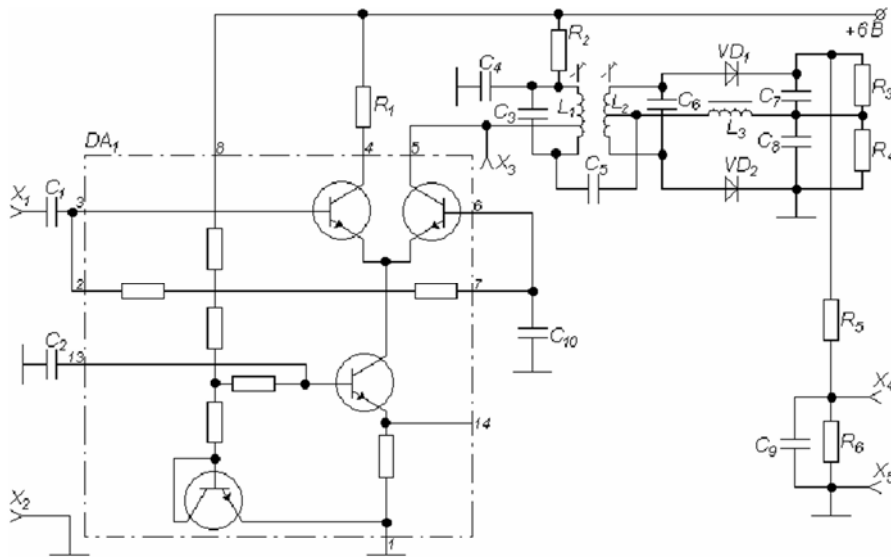


Рис. 6. Схема лабораторного макета частотного детектора

Высокочастотный дроссель L3 -служит для прохождения низкочастотных составляющих. Фильтр R5C9 необходим для ослабления высокочастотного напряжения и коррекции частотной характеристики на верхних частотах из-за вводимого в них подъема в передатчиках ЧМ, повышающего

помехоустойчивость приема ЧМ сигналов.

Особенностью схемы дифференциального усилителя (ДУ), на котором собран амплитудный ограничитель, является сильная зависимость его коэффициента передачи от величины входного сигнала. При отсутствии смещения между базами дифференциального каскада верхний и нижний пороги ограничения равны  $U_{опр} = \pm 5\varphi_T$ . Максимальный размах выходного

напряжения при несимметричном и симметричном выходах соответственно  $U_{выхH} = \alpha \cdot I_{II} R_{Э}$  и  $U_{выхC} = 2\alpha \cdot I_0 R_{Э}$ , обозначения аналогичны обозначениям, принятым ранее.

## 2.2 Домашнее задание

1. Произвести расчет элементов схемы и коэффициента передачи линейного диодного детектора АМ сигналов с разделенной нагрузкой и частотного детектора (без учета коэффициента передачи ограничителя).

2. Исходные данные для расчета:

$S = 30$  мСм;  $R = 6$  кОм;  $R_{iобр} = 120$  кОм;  $m_{max} = 0,8$ ;  $F_{maxAM} = 3400$  Гц;  
 $R_{вхУНЧ} = 2$  кОм;  $C_{вх} = 30$  пФ;  $f_{ПAM} = 500$  кГц;  $f_{ПЧМ} = 6,8$  МГц;  $\beta = 2$ ;  
 $I_0 = 1,3$  мА;  $L = 16$  мкГ;  $\rho = 0,987$ ;  $Q_K = 70$ ;  $Q_{Э} = 50$ ;  
 $\Delta F_D = 50$  кГц;  $F_{maxЧМ} = 12500$  Гц;  $K_T = 2,0\%$ .

## 2.3 Порядок выполнения работы

1. Снять зависимость коэффициента передачи детектора АМ колебаний от амплитуды входного сигнала при различных сопротивлениях нагрузки.

Для этого к гнездам X1, X2 амплитудного детектора подключить генератор сигналов высокочастотный (ГСВ), настроенный на частоту контура (450~500) кГц, работающий в режиме внутренней модуляции сигналом с частотой 1000 Гц при глубине модуляции  $m = 30\%$ . Амплитуду сигнала установить равной  $\sim 0,5$  В. К гнездам X4 X6 подсоединить милливольтметр. Переключатель S1 поставить в положение 2, S2 - в положение 1, S3 - в положение 1. Подстроить ГСВ на частоту настройки контура, добиваясь максимума выходного напряжения. Изменяя выходное напряжение ГСВ от 0 В до максимума, снять зависимость выходного сигнала  $U_{m\Omega}$  от входного  $U_{m\omega}$ . Рассчитать коэффициент передачи. Во время измерений следить за постоянством  $m$ . Результаты занести в табл.2.1

Таблица 2.1

$U_{m\omega}$ , В	1	0.5	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
$U_{m\Omega}$ , В							
$K_d$							

Повторить измерения, устанавливая S2 сначала в положение 2, а затем - в 3. Построить графики зависимостей  $K_d = \psi (U_{m\omega})$ .

2. Оценить влияние на частотную характеристику АМ детектора изменения величины емкости и сопротивления нагрузки.

Для этого подать на вход детектора (гнезда X1, X2) напряжение, промодулированное от внешнего генератора низкой частоты. Установить глубину модуляции (m), равную (30...50)%.

Переключатель S1 поставить в положение 1, S2 - положение 2, S3 - в положение 1. К выходу детектора (гнезда X5, X6) подключить милливольтметр.

Изменяя частоту модулирующего сигнала от 200 Гц до 100 кГц, снять зависимость выходного напряжения детектора от частоты. Во время измерений следить за постоянством коэффициента модуляции. Результаты измерений занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

F, кГц	0.2	0.5	1	2	5	7.5	10	15	20	30	50	100
$U_{m\Omega}$ , В												

Повторить измерения, устанавливая S1 в положения 2 и 3, а затем при S1- в положение 2 и S2 - в положение 3. Объяснить полученные результаты. Построить графики зависимости  $U_{m\Omega} = \psi (F)$ .

3. На нескольких частотах модуляций с помощью осциллографа просмотреть и зарисовать наиболее характерные осциллограммы выходного напряжения для различных сопротивлений и конденсаторов нагрузки.

Для этого установить сначала частоту модуляции 400 Гц, а затем 20 кГц и изменяя глубину модуляции от 30% до 80%, просмотреть осциллограммы напряжений при установке S3 в положение 1 и 2, S2 - в положение 3, S1 последовательно в положения 1,2,3.

4. Снять детекторную характеристику детектора ЧМ колебаний.

Для этого к гнездам X1, X2 детектора ЧМ сигналов подключить ГСВ с выходным немодулированным напряжением (0,01...0,05)В. К гнездам X4,X5 подсоединить осциллограф, включить тумблер "Сеть". Изменяя частоту ГСВ от 6 до 7 МГц ( для макета на МС 235ДС1 от 10,0 до 11,0 МГц) и, отмечая уровень постоянной составляющей на экране осциллографа, снять зависимость выходного напряжения детектора ЧМ сигналов от частоты. Результаты занести табл.2.3. Построить график зависимости  $U_{выхЧД} = \psi(f)$ .

Таблица 2.3

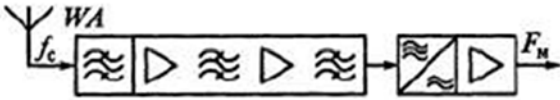
$f, \text{МГц}$	
$U_{вых}, \text{В}$	

### Контрольные вопросы

1. Расскажите о назначении детектора, его основных характеристиках.
2. Поясните особенности детектирования “слабых” и “сильных” сигналов.
3. Нарисуйте схемы амплитудного и частотного детекторов.
4. Расскажите о выборе элементов нагрузки амплитудного, частотного детекторов.
5. Какие элементы влияют на частотные искажения в детекторе? Критерии выбора величины этих элементов.
6. Что такое коэффициент фильтрации детектора? Какие элементы влияют на его величину?
7. В чем состоят особенности детектирования однополосных сигналов?
8. Для чего применяется разделенная нагрузка детектора?
9. Сравните по параметрам последовательный и параллельный диодный детекторы АМ сигналов.
10. В чем заключается особенность построения импульсного детектора?
11. На векторной диаграмме поясните процессы, происходящие в ЧМ детекторе.
12. Для чего перед ЧМ детектором устанавливают ограничитель амплитуды?
13. От каких параметров АМ детектора зависит его коэффициент передачи?
14. Сравните транзисторный и диодный детекторы АМ сигналов.
15. Какова детекторная характеристика детектора ЧМ сигналов. Как влияет фактор связи между контурами на ее форму?
16. Поясните от каких факторов зависит крутизна детекторной характеристики частотного детектора.

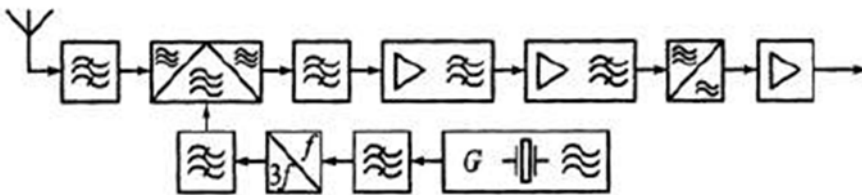
**Вопросы для тестирования**

1. К какому типу относится радиоприемное устройство, структурная схема которого изображена на рисунке?



- а) детекторный приемник;
- б) регенеративный приемник;
- в) приемник прямого усиления;
- г) супергетеродинный приемник.

2. К какому типу относится радиоприемное устройство, структурная схема которого изображена на рисунке?



- а) детекторный приемник;
- б) регенеративный приемник;
- в) приемник прямого усиления;
- г) супергетеродинный приемник.

3. Коэффициент перекрытия диапазона определяют по формуле:

а)  $K_D = \frac{f_{max}}{f_{min}}$ ; б)  $K_D = \frac{C_{э max}}{C_{э min}}$ ; в)  $K_D = \sqrt{\frac{f_{max}}{f_{min}}}$ ; г)  $K_D = \left(\frac{C_{э max}}{C_{э min}}\right)^2$ .

4. В телескопической антенне метрового диапазона число колен с уменьшением габаритных размеров переносного приемника ...

- а) растет;
- б) уменьшается;
- в) остается неизменным.

5. Частотная характеристика входной цепи с индуктивной связью с антенной может быть ...

- а) только возрастающей;
- б) только убывающей;
- в) как возрастающей, так и убывающей;
- г) только постоянной.

6. Какой вид чувствительности характерен для детекторного приемника?

- а) чувствительность, ограниченная шумами;
- б) чувствительность, ограниченная усилением;
- в) пороговая чувствительность;
- г) тангенциальная чувствительность;
- д) предельная чувствительность.

7. Какие каскады супергетеродинного приемника обеспечивают избирательность по соседнему каналу?

- а) входная цепь;
- б) УРЧ;
- в) преселектор;
- г) преобразователь;
- д) УПЧ;
- е) преобразователь и УПЧ.

8. Что называется диапазоном рабочих частот радиоприемного устройства?

- а) это способность гетеродина обеспечивать прием сигналов;

- б) это область возможных частот настройки приемника, в пределах которой обеспечивается прием сигналов;
- в) это область возможных частот перестройки гетеродина;
- г) это область частот, соответствующая полосе пропускания преселектора;
- д) это область частот, соответствующая полосе пропускания преселектора, с учетом частотной перестройки гетеродина.

9. Укажите параметры частотной избирательности, характеризующие селективные свойства УПЧ:

- а) избирательность по побочным каналам приема;
- б) избирательность по соседнему и зеркальному каналам, коэффициент прямоугольности;
- в) избирательность по соседнему каналу, полоса пропускания линейной части приемника, коэффициент прямоугольности;
- г) избирательность по прямому и зеркальному каналам приема;
- д) избирательность по соседнему и прямому каналам приема;

10. Что следует понимать под искажениями, возникающими в радиоприемном устройстве?

- а) изменение формы выходного сигнала по сравнению с формой входного сигнала;
- б) появление побочных каналов приема;
- в) искажения появляются, если приемник не точно настроен на несущую частоту входного сигнала;
- г) это перегрузка отдельных каскадов большим уровнем входного сигнала;
- д) неправильный выбор угла отсечки.

11. Что называется динамическим диапазоном приемника?

- а) способность усиливать слабые сигналы;
- б) способность усиливать сильные сигналы;
- в) способность усиливать сигналы выше определенного уровня;
- г) это произведение коэффициента усиления на полосу приема;
- д) отношение максимального уровня входного сигнала в полосе пропускания приемника к чувствительности.

12. Каково назначение преобразователя частоты в супергетеродинном приемнике?

- а) предназначен для повышения стабильности частота принимаемого сигнала;
- б) предназначен для переноса спектра сигнала из одной частотной области в другую;
- в) предназначен для понижения несущей частоты входного сигнала;
- г) предназначен для уменьшения числа побочных каналов приема;
- д) предназначен для увеличения избирательности по зеркальному каналу.

13. Какие каскады супергетеродинного приемника обеспечивают избирательность по зеркальному каналу?

- а) входная цепь и УПЧ;
- б) УРЧ и преобразователь;
- в) преселектор;
- г) преобразователь;
- д) УПЧ;
- е) преобразователь и УПЧ.

14. Что называется соседним каналом приема?

- а) побочный канал приема, частота которого совпадает с частотой настройки УПЧ;
- б) возможная ближайшая частота, на которой может работать станция;
- в) побочный канал приема, частота которого отличается от частоты настройки супергетеродинного приемника на удвоенное значение промежуточной частоты;
- г) канал приема, образованный комбинацией двух частот, не попадающих в полосу приема.

15. Что произойдет в радиоприемном устройстве, если увеличить значение промежуточной частоты?
- а) ничего не произойдет;
  - б) уменьшится избирательность по прямому, соседнему и зеркальному каналам приема;
  - в) увеличится избирательность по прямому, соседнему и зеркальному каналам приема;
  - г) уменьшится избирательность по прямому, соседнему каналам приема и увеличится избирательность по зеркальному каналу;
  - д) увеличится избирательность по прямому, соседнему каналам приема и уменьшится избирательность по зеркальному каналу;
16. Назовите способы разбивки диапазона принимаемых частот на поддиапазоны:
- а) линейный, логарифмический и экспоненциальный;
  - б) линейный, квадратичный, логарифмический и экспоненциальный;
  - в) линейный и нелинейный коэффициент перекрытия и частотный интервал;
  - г) равные коэффициенты перекрытия и равные частотные интервалы для всех поддиапазонов;
  - д) любые из перечисленных здесь способов.
17. Что называется частотными искажениями сигнала?
- а) это появление в выходном сигнале дополнительных шумовых составляющих;
  - б) коэффициент усиления избирательного каскада имеет неравномерность в полосе приема более 3 ( или 6) дБ;
  - в) изменения формы сигнала в результате появления в спектре выходного сигнала гармонических составляющих, отсутствующих во входном спектре;
  - г) изменения формы сигнала в результате нарушения закона распределения между его спектральными составляющими из-за неравномерности усиления составляющих колебаний спектра сигнала в избирательных цепях;
  - д) изменение закона огибающей спектра выходного сигнала называется частотными искажениями.
18. Укажите причину, по которой переходят к многократному преобразованию частоты в супергетеродинном приемнике:
- а) сложность схемного решения и невозможность перестройки УПЧ;
  - б) чтобы уменьшить количество побочных каналов приема;
  - в) чтобы исключить зависимость основных параметров приемника от частоты настройки;
  - г) при высоких требованиях к избирательностям по соседних и зеркальных каналах одновременно;
  - д) чтобы ослабить паразитное излучение гетеродина.
19. Каковы причины возникновения нелинейных искажений сигнала в каскадах радиоприемника?
- а) ограниченная полоса пропускания как всего приемника в целом, так и его отдельных каскадов;
  - б) форма АЧХ избирательной цепи не соответствует форме огибающей спектра сигнала;
  - в) нелинейности входных и выходных характеристик усилительных приборов, а также характеристик намагничивания сердечников;
  - г) присутствие на входе приемника одновременно двух и более сигналов от разных радиостанций;
  - д) не идеальность АЧХ избирательных каскадов.
20. Назвать состав преобразователя частоты:
- а) преселектор и гетеродин;
  - б) смеситель и гетеродин;
  - в) смеситель, гетеродин и УПЧ;
  - г) смеситель и фильтр.

**Вопросы, выносимые на коллоквиум**  
**Коллоквиум 1**

36. Дать определение входной цепи.
37. Перечислить признаки, по которым классифицируются входные цепи.
38. Сформулировать условие режима настроенной и ненастроенной антенны.
39. Что такое действующая высота антенны?
40. Какие виды связи входной цепи с антенной обладают постоянством резонансного коэффициента передачи в диапазоне рабочих частот диапазонных радиоприемных устройств?
41. Какие способы перестройки входной цепи могут быть использованы?
42. Что такое коэффициент перекрытия по частоте?
43. Чем отличаются входные цепи с ненастроенной и ненастроенной антенной?
44. Какие отличительные особенности имеют входные цепи с магнитной и рамочной антенной в сравнении с открытыми антеннами?
45. Какие элементы могут быть использованы во входных цепях с электронной перестройкой по частоте?
46. Дать сравнительную оценку коэффициента шума входной цепи с биполярным и полевым транзисторами?
47. Чем отличаются усилители радиочастоты от усилителей радиочастоты?
48. По каким признакам классифицируются селективные усилители радиочастоты?
49. Какое назначение имеет усилитель радиочастоты, входящий в состав преселектора радиоприемного устройства?
50. Каким требованиям должен отвечать усилитель радиочастоты?
51. Какое влияние оказывает УРЧ на чувствительность радиоприемного устройства?
52. Какое назначение имеет усилитель промежуточной частоты радиоприемного устройства?
53. Какое влияние оказывает на чувствительность усилитель промежуточной частоты радиоприемного устройства?
54. Какой из селективных усилителей, УРЧ или УПЧ, определяет полосу пропускания радиоприемного устройства?
55. Для обеспечения малого коэффициента шума в диапазоне рабочих частот до 1 ГГц какие усилительные элементы необходимо использовать в усилителе радиочастоты - полевые или биполярные и почему?
56. Для обеспечения малого коэффициента шума в диапазоне рабочих частот выше 1 ГГц какие усилительные элементы необходимо использовать в усилителе радиочастоты — полевые или биполярные и почему?
57. Дать определение преобразователя частоты?
58. Каков состав преобразователя частоты?
59. Какие каналы приема имеет преобразователь частоты?
60. Какую операцию, линейную или нелинейную, производит преобразователь частоты?
61. Чем отличается основной канал приема преобразователя частоты от зеркального канала?
62. Какой из каналов приема является наиболее опасным?
63. Что такое крутизна преобразования и крутизна усиления нелинейного усилительного прибора?
64. Дать сравнительную оценку коэффициента шума в режиме усиления и режиме преобразования.
65. Какая схема преобразователя частоты, с отдельным или с совмещенным гетеродином, предпочтительна?
66. Какие проблемы имеются при реализации сопряжения контуров гетеродина и преселектора диапазонного радиоприемного устройства диапазонного типа?
67. Какие методы сопряжения контуров гетеродина и преселектора Вы знаете?
68. Какое назначение имеет детектор радиосигналов?
69. По каким признакам классифицируются детекторы радиосигналов?
70. Какие типы детекторов по основному назначению Вы знаете?

## Коллоквиум 2

36. Какие типы детекторов различают по виду модуляции?
37. Какие типы нелинейных элементов используются в детекторах радиосигналов?
38. Какие способы используются в радиоприемных устройствах для детектирования радиосигналов
39. В чем заключается принцип синхронного детектирования?
40. Какой принцип работы используется в корреляционных детекторах?
41. Какими показателями качества обладают амплитудные детекторы?
42. Какие отличия от амплитудного детектора имеет детектор радиоимпульсных сигналов?
43. Чем определяется режим импульсного и пикового детектирования в детекторах радиоимпульсных сигналов?
44. Какие принципы детектирования используются для выделения огибающей частотно-модулированных сигналов?
45. Какие принципы детектирования используются для выделения огибающей фазомодулированных сигналов?
46. Какие показатели качества используются для определения технических характеристик детектора частотно- и фазомодулированных сигналов?
47. Какие особенности построения имеют радиоприемные устройства, предназначенные для приема и обработки частотно- и фазомодулированных сигналов?
48. Какое назначение имеет система автоматической регулировки усиления?
49. Какова функциональная схема системы автоматической регулировки усиления?
50. Какие факторы влияют на показатели качества системы радиоавтоматики?
51. Какое назначение имеет система автоматической регулировки усиления в устройствах приема и обработки сигналов?
52. Какова структурная схема разомкнутой системы АРУ?
53. Какова структурная схема замкнутой системы АРУ?
54. В чем принципиальная разница между разомкнутой и замкнутой системами АРУ?
55. В чем принципиальная разница между разомкнутой и замкнутой системами АРУ?
56. Какие виды регулировочных характеристик систем АРУ вы знаете?
57. Когда используется инерционная система радиоавтоматики?
58. Когда используется задержанная система автоматической регулировки усиления?
59. Какое назначение имеет фильтр нижних частот в системе АРУ?
60. Какое назначение системы автоматической подстройки частоты?
61. Какова функциональная схема автоматической подстройки частоты?
62. Какова структурная схема автоматической подстройки частоты?
63. Что такое полоса захвата и полоса удержания в системах АПЧ?
64. Почему полоса захвата меньше полосы удержания в системах АПЧ?
65. 18.Какая реакция системы ЧАПЧ на дестабилизирующие факторы, влияющие на точность ее работы?
66. Какое назначение имеет система фазовой автоподстройки?
67. Когда и где используется фазовая автоподстройка (ФАПЧ)?
68. Какова функциональная схема системы ФАПЧ?
69. Какова структурная схема системы ФАПЧ?
70. Чем отличается система ФАПЧ от системы ЧАПЧ?

### 3.3 Оценочные материалы для промежуточной аттестации

#### Экзаменационные вопросы

1. Основные задачи и проблемы устройств приема и передачи сигналов (УПиПС).
2. Классификация радиоприемных устройств. Типы и структурные схемы приемников.
3. Основные требования, предъявляемые к радиоприемным устройствам. Основные электрические показатели УПиПС.
4. Структура и принцип действия радиоприемного устройства.
5. Структурные схемы радиоприемника.
6. Классификация и основные характеристики радиоприемных устройств

7. Радиосигналы и помехи.
8. Чувствительность радиоприемного устройства.
9. Шумы радиоприемного устройства.
10. Взаимосвязь чувствительности и коэффициента шума радиоприемника.
11. Частотная избирательность (селективность) радиоприемного устройства.
12. Параметры и характеристики входных цепей.
13. Выбор связи контура с антенной и нагрузкой.
14. Выбор оптимальной связи из условия допустимого расширения полосы пропускания входной цепи с ненастроенной антенной.
15. Выбор связи из условия согласования сопротивления настроенной антенны с контуром при заданной полосе пропускания цепи.
16. Выбор связи из условия согласования сопротивления настроенной антенны с контуром без ограничений на полосу пропускания цепи.
17. Входные цепи с трансформаторной связью контура с антенной.
18. Входные цепи с емкостной связью контура с нагрузкой.
19. Входные цепи с двойной автотрансформаторной связью.
20. Входные цепи метрового диапазона волн.
21. Входные цепи сверхвысоких частот.
22. Входные цепи с электронной настройкой.
23. Параметры и характеристики усилителей радиочастоты.
24. Анализ одноконтурного усилителя радиочастоты.
25. Усилители с двойной автотрансформаторной связью контура.
26. Усилители с трансформаторной связью контура и транзистора.
27. Интегральные микросхемы для усилителей радиочастоты.
28. Шумовые параметры преселектора.
29. Шумовые свойства усилителей на полевых транзисторах.
30. Шумовые характеристики усилителей на биполярных транзисторах.
31. Устойчивость работы усилителей радиочастоты. Способы повышения устойчивости работы усилителей радиочастоты.
32. Структура и назначение преобразователей частоты.
33. Параметры и типы преобразователей частоты.
34. Выбор активного элемента для преобразователя частоты.
35. Транзисторные преобразователи частоты.
36. Балансные преобразователи частоты.
37. Преобразователь частоты с фазовым подавлением зеркального канала.
38. Параметры и характеристики гетеродинов.
39. Транзисторные гетеродины.
40. Синтезаторы частоты
41. Балансные и кольцевые преобразователи частоты.
42. Сопряжение настройки контуров преселектора и гетеродина.
43. Параметры и характеристики тракта промежуточной частоты.
44. Частотно-избирательные системы.
45. Фильтры сосредоточенной селекции на LC-контурах.
46. Электромеханические фильтры.
47. Пьезокерамические фильтры. Монолитные пьезоэлектрические фильтры.
48. Фильтры на поверхностных акустических волнах.
49. Усилительные интегральные микросхемы.
50. Выбор промежуточной частоты.
51. Параметры и характеристики амплитудных детекторов. Основы детектирования сигналов с амплитудной модуляцией.
52. Дiodный детектор амплитудно-модулированных сигналов.
53. Транзисторные амплитудные детекторы.
54. Синхронный демодулятор АМ - сигналов.
55. Искажения в амплитудных детекторах.
56. Детектор импульсных сигналов.
57. Детектор однополосных сигналов.

58. Детекторы частотно модулированных сигналов. Параметры и характеристики частотных детекторов.
59. Типы частотных детекторов. Частотные детекторы с расстроенными контурами.
60. Фазовые детекторы.
61. Устройства управления параметрами тракта приема и обработки сигналов.
62. Устройства автоматической регулировки усиления (АРУ).
63. Особенности работы АРУ в приемниках импульсных сигналов.
64. Регулировка полосы пропускания.
65. Автоматическая настройка (АНП) и подстройка частоты (АПЧ).
66. Назначение, принципы построения и типы систем АНП и АПЧ.
67. Система частотной автоматической подстройки (ЧАПЧ) УПЧ.
68. Система фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) гетеродина.
69. Режимы работы ЧАПЧ и ФАПЧ и показатели, которыми эти режимы характеризуются.
70. Системы цифровой автоматической подстройки частоты гетеродина.
71. Приемники АМ сигналов.
72. Приемники импульсных сигналов.
73. Приемники ЧМ сигналов.
74. Радиолокационные приемники.
75. Приемники оптических сигналов.
76. Особенности цифровой обработки сигналов.
77. Приемники ОМ сигналов.
78. Приемники дискретных сигналов.

