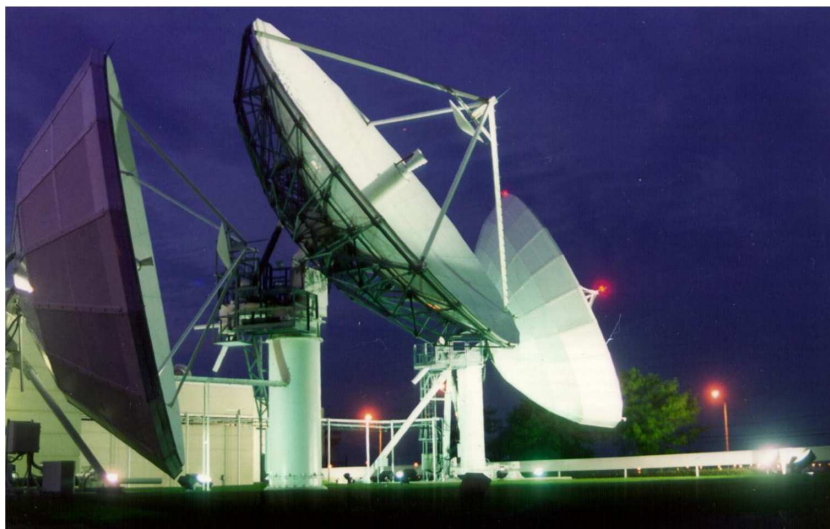


И.А. Белоус

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ



Практикум

Министерство образования и науки Российской Федерации

Владивостокский государственный университет
экономики и сервиса (ВГУЭС)

И.А. Белоус

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ

Практикум

Владивосток
Издательство ВГУЭС
2017

УДК 621.391
ББК 32.841
Б43

Рецензент: В.А. *Игнатюк*, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры ИТС ВГУЭС,

Белоус, И.А.
Б43 **Общая теория связи** : практикум / И.А. Белоус ; Владивостокский государственный университет экономики и сервиса. – Владивосток : Изд-во ВГУЭС, 2017. – 112 с.

Предлагаемый практикум обеспечивает формирование: знаний основ структуры и схемотехники устройств приема и преобразования сигналов; умений учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности; владений навыками практической работы с лабораторными макетами. Основное внимание в практикуме уделено описанию методик изучения характеристик, измерения основных параметров радиоприемных устройств, анализу результатов измерений и сравнению их с ожидаемыми величинами. Материалы практикума могут быть использованы для проведения лабораторных занятий в интерактивной форме, предусматривающей дискуссии и анализ конкретных ситуаций для оптимизации характеристик радиоприемных устройств.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» на базе ОПОП ВО.

УДК 621.391
ББК 32.841

© ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса», 2017

© Белоус И.А., 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список принятых сокращений.....	6
ВВЕДЕНИЕ	8
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ	9
1.1. Диапазоны рабочих частот.....	10
1.2. <i>Лабораторный практикум.</i> «Проверка диапазонов принимаемых частот и изучение характеристик органов настройки приемника на несущую частоту сигнала»	13
1.3. Чувствительность.....	18
1.4. <i>Лабораторный практикум.</i> Исследование характеристик чувствительности приемников.....	23
1.5. Избирательность	26
1.6. <i>Лабораторный практикум.</i> Исследование характеристик избирательности приемников по тракту приема АМ сигналов.....	28
1.7. Изучение характеристик избирательности приемников по каналу приема ЧМ-сигналов.....	32
1.8. <i>Лабораторный практикум.</i> Измерение уровня блокирования и перекрестных помех по каналу приема АМ-сигналов	38
1.9. Частотные характеристики.....	44
1.10. <i>Лабораторный практикум.</i> Измерение и анализ частотных характеристик приёмников.....	46
2. ПРОХОЖДЕНИЕ МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЧЕРЕЗ ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ.....	52
2.1. Прохождение АМ колебания через частотно-избирательные цепи... ..	52
2.2. Описание программного пакета NI Multisim	57
2.3. <i>Компьютерный практикум.</i> Измерение параметров АМ-сигнала при прохождении через колебательный контур	62
2.4. Прохождение ЧМ колебания через частотно-избирательные цепи... ..	65
2.5. <i>Практикум.</i> Расчёт параметров последовательного резонансного контура	67
2.6. <i>Компьютерный практикум.</i> Измерение параметров ЧМ-сигнала при прохождении через колебательный контур.....	68
3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ.....	73
3.1. Назначение, классификация, структура и характеристики преобразователей частоты.....	73
3.2. <i>Компьютерный практикум.</i> Изучение преобразователей частоты.. ..	75
4. УСИЛИТЕЛИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЧАСТОТ.....	79
4.1. Назначение и классификация усилителей промежуточной частоты ..	79

4.2 <i>Компьютерный практикум. Изучение аperiodических усилителей промежуточных частот</i>	80
5. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ	85
5.1. Назначение, классификация и характеристики амплитудных детекторов.....	85
5.2. Детектирование АМ сигналов нелинейной цепью.....	87
5.3. Детекторы АМ-сигналов	88
5.4. <i>Компьютерный практикум. Изучение диодных детекторов АМ-сигналов</i>	90
5.5. Синхронное детектирование АМ-сигналов	98
5.6. <i>Компьютерный практикум. Изучение синхронных детекторов АМ-сигналов</i>	99
6. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ	106
6.1. Назначение, классификация, параметры и характеристики частотных детекторов.....	106
6.2. <i>Компьютерный практикум. Изучение детектора ЧМ-сигналов</i>	108
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	112

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АД – амплитудный детектор
АМ – амплитудная модуляция
АПЧ – автоматическая подстройка частоты
АРУ – автоматическая регулировка усиления
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
АХ – амплитудная характеристика
ВАХ – вольт-амперная характеристика
ВЦ – входная цепь
ВЧ – высокая частота
Г – гетеродин
ГВЧ – гипервысокая частота
ГОСТ – государственный отраслевой стандарт
ГКРЧ – государственный комитет по радиочастотам
ГТИ – генератор тактовых импульсов
ГТП – главный тракт приёма
Д – детектор
ДВ – длинная волна
ДД – динамический диапазон
ДМВ – дециметровая волна
ДММВ – децимиллиметровая волна
ИКМ – импульсно-кодовая модуляция
ИМС – интегральная микросхема
КВ – короткая волна
КВЧ – крайне-высокая частота
КПД – коэффициент полезного действия
КПЕ – конденсатор переменной ёмкости
ЛТП – линейный тракт приёма
ММВ – миллиметровая волна
МОП – металл-окисел-полупроводник
МП – микропроцессор
МПЭФ – монолитный пьезоэлектрический фильтр
МШУ – малошумящий усилитель
НЧ – низкая частота
НЭ – нелинейный элемент
ОБ – общая база
ОБП – одна боковая полоса
ОВЧ – очень высокая частота
ОГ – опорный генератор
ОИ – общий источник
ОК – общий коллектор
ОНЧ – очень низкая частота
ООС – отрицательная обратная связь
ОС – обратная связь

ОСП – отношение сигнал-помеха
ОСШ – отношение сигнал-шум
ОУ – операционный усилитель
ОЭ – общий эмиттер
ПАВ – поверхностная акустическая волна
ПДУ – пульт дистанционного управления
ПКФ – пьезокерамический фильтр
ПОС – положительная обратная связь
ПФ – полосовой фильтр
РЛС – радиолокационная станция
РПрУ – радиоприёмное устройство
РЭА – радиоэлектронная аппаратура
СВ – средняя волна
СВЧ – сверхвысокая частота
СДВ – сверхдлинная волна
См – смеситель
СМВ – сантиметровая волна
СЦ – согласующая цепь
СЧ – синтезатор частоты
УВЧ – ультравысокая частота
УЗВ – усилитель звуковой частоты
УКВ – ультракороткая волна
УПТ – усилитель постоянного тока
УПЧ – усилитель промежуточной частоты
УРЧ – усилитель радиочастоты
УУ – узкополосный усилитель
УУПЧ – узкополосный усилитель промежуточной частоты
УЧ – умножитель частоты
УЧМ – усилитель частот модуляции
ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты
ФВЧ – фильтр верхних частот
ФД – фазовый детектор
ФМ – фазовая модуляция
ФНЧ – фильтр нижних частот
ФОЧ – формирователь опорных частот
ФЧХ – фазово-частотная характеристика
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь
ЦАПЧ – цифровая автоматическая подстройка частоты
ЧАПЧ – частотная автоматическая подстройка частоты
ЧИС – частотно-избирательная система
ЧД – частотный детектор
ЧДс – частотный дискриминатор
ЧМ – частотная модуляция
ШИМ – широтно-импульсная модуляция
ШУ – широкополосный усилитель
ЭМФ – электромеханический фильтр

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемый практикум обеспечивает формирование: знаний основ структуры и схемотехники устройств приема и преобразования сигналов; умений учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности; владений навыками практической работы с лабораторными макетами.

Основное внимание в практикуме уделено описанию методик изучения характеристик, измерения основных параметров радиоприемных устройств, анализу результатов измерений и сравнению их с ожидаемыми величинами.

Материалы практикума могут быть использованы для проведения лабораторных занятий в интерактивной форме, предусматривающей дискуссии и анализ конкретных ситуаций для оптимизации характеристик радиоприемных устройств.

Для закрепления и самооценки самостоятельного изучения дисциплины в соответствующих разделах приведены контрольные вопросы.

В связи с тем, что аппаратные методы исследования радиоприемных устройств и их функциональных узлов требуют больших затрат времени и средств, предлагаются методики исследования с использованием современного программного пакета компьютерного моделирования и проектирования NI Multisim.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

Существует целый ряд характеристик, позволяющих объективно оценить технические параметры радиоприемных устройств (РПрУ). Различают три группы характеристик:

1. электрические;
2. конструктивно-эксплуатационные;
3. производственно-экономические.

Основные электрические характеристики РПрУ следующие:

1. *Диапазон рабочих частот* – область частот настройки РПрУ, в пределах которой обеспечивается приём радиосигналов.

2. *Эффективность регулировок*.

3. *Чувствительность* – мера способности РПрУ обеспечивать приём слабых сигналов.

4. *Избирательность* – способность РПрУ отличать полезный сигнал от помехи по заданным признакам, свойственным радиосигналу.

5. *Искажения* – изменение формы выходного сигнала, по сравнению с формой входного сигнала, вызывающее изменение качества воспроизведения передаваемого сообщения.

6. *Динамический диапазон* – пределы изменения уровня входных сигналов, при которых обеспечивается уверенный приём сообщения.

7. *Помехоустойчивость* – способность РПрУ функционировать в условиях воздействия на него определённой совокупности помех..

8. *Электромагнитная совместимость* – способность РПрУ одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных электромагнитных помех и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам.

9. *Выходная мощность* – мощность, отдаваемая радиоприёмным устройством оконечному устройству.

К конструктивно-эксплуатационным характеристикам относятся:

- 1) масса;
- 2) габариты;
- 3) режим питания;
- 4) удобство эксплуатации;
- 5) надёжность;
- 6) ремонтпригодность;
- 7) стабильность характеристик.

К производственно-экономическим характеристикам относятся:

- 1) стоимость;
- 2) степень интеграции узлов;
- 3) степень унификации;

- 4) серийноспособность;
- 5) вид технологического процесса;
- 6) сроки разработки.

1.1. Диапазоны рабочих частот

Диапазоном рабочих частот РПрУ называется область возможных частот настройки РПрУ, в пределах которой обеспечивается приём радиосигналов [1]. Ширина рабочего диапазона РПрУ оценивается крайними частотами настройки $f_{0\text{мин}}$ и $f_{0\text{макс}}$, а также коэффициентом перекрытия диапазона $k_{\text{пер}} = f_{0\text{макс}}/f_{0\text{мин}}$.

Очевидно, что диапазоны частот радиовещательных приёмников не должны быть уже диапазонов, определенных ГКРЧ РФ. Согласно ГОСТ 5651-88 “Устройства радиоприемные бытовые. Общие технические условия.”, радиоприемные устройства должны обеспечивать прием сигналов радиовещательных станций в следующих (одном или нескольких) диапазонах частот (волн):

ДВ – 148,0 – 285,0 кГц (2027,0 – 1050,0 м)

СВ – 525,0 – 1607,0 кГц (571,4 – 186,7 м)

КВ – 3,95 – 12,10 МГц (75,9 – 24,8 м)

УКВ 1 – 65,8 – 74,0 МГц (4,56 – 4,06 м)

УКВ 2 – 100,0 – 108,0 МГц (3,00 – 2,78 м)

УКВ 1 – 65,8 – 73,0 МГц (4,56 – 4,11 м)

Диапазон СВ может быть разбит на два поддиапазона. Диапазон КВ может быть разбит на ряд поддиапазонов, охватывающих отдельные частотные участки. При этом допускается отсутствие некоторых поддиапазонов с сужением общего диапазона КВ.

Состав и границы диапазонов и поддиапазонов конкретных радиоприемных устройств следует смотреть в технических условиях, паспортах и инструкциях по ремонту.

Обычно диапазоны частот делают несколько шире установленных, чтобы компенсировать уход настройки под воздействием дестабилизирующих факторов (температура, влажность, старение и т.п.). Однако чрезмерно расширять диапазон непрактично, так как это приводит к его уплотнению, т.е. к затруднениям при настройке.

Границы диапазонов частот определяют в крайних положениях частот настройки.

При массовом производстве РПрУ неизбежно некоторое расхождение между истинной частотой настройки и показаниями по шкале. Мера расхождений, называемая *погрешностью градуировки* шкалы, зависит от конструкции РПрУ, тщательности настройки и рисунка шкалы. Наибольшую точность обеспечивает применение системы СОЧ (цифрового

отсчета частоты) при использовании в качестве гетеродина синтезатора частоты.

Погрешность градуировки шкалы определяется сравнением истинной частоты настройки РПрУ с показаниями по шкале или другому индикатору. Вполне достаточным является значение, равное половине полосы пропускания, т.е. 4–5 кГц в диапазонах ДВ, СВ и КВ и 50–70 кГц в диапазоне УКВ.

Существуют следующие способы настройки РПрУ на принимаемый сигнал:

- 1) по минимуму коэффициента гармоник выходного напряжения;
- 2) по максимальному напряжению на выходе;
- 3) по индикатору настройки;
- 4) на середину полосы пропускания всего тракта;
- 5) по минимуму шумов.

Кроме того, в диапазоне УКВ применяются специфические способы настройки:

- 1) на нулевую точку S-кривой;
- 2) по максимальному напряжению на электролитическом конденсаторе дробного детектора;
- 3) на середину полосы пропускания высокочастотного тракта.

Как показали эксперименты, больше всего действиям радиослушателей при настройке на станцию соответствует следующий способ, являющийся основным.

На выход приёмника подается сигнал заданной величины с максимальной глубиной модуляции и частотой модулирующего напряжения 1000 Гц. Изменяя частоту настройки или ГСС, находят середину полосы, ограниченную частотами, на которых коэффициент гармоник вырастает до заданного значения, например 1,5 или 10%.

Стандарты допускают настраивать приемник любым способом, но одним и тем же при измерении всех параметров в данном диапазоне волн, т.к. некоторые параметры в значительной степени зависят от положения ручки настройки. В спорных случаях применяется основной способ.

При контроле параметров отремонтированных РПрУ согласно РСТ РФ 171-81 используется способ настройки РПрУ по максимальному напряжению на выходе.

Погрешность различных способов настройки на сигнал определяется измерением частот настройки, соответствующих этим способам по сравнению с основным способом настройки.

Индикатор настройки только тогда может эффективно выполнять свои функции, когда во всем возможном диапазоне входных уровней изменение частоты настройки в пределах границ полосы пропускания

РПрУ будет вызывать изменение положения указателя индикатора настройки.

В современных радиовещательных приёмниках применяются различные индикаторы настройки: оптические, стрелочные на микроамперметрах, индикаторные лампочки, светодиоды, экраны и т.д. В простейшем случае индикатор настройки включается в цепь питания регулируемого каскада. Однако такой способ включения не обеспечивает заданных требований при средних и больших уровнях сигнала. Лучшие результаты даёт индикатор настройки, регулирующийся на продетектированное напряжение, развиваемое на отдельном узкополосном контуре. Следует подчеркнуть, что индикатор должен, прежде всего, реагировать не на изменение уровня сигнала, а на изменение его частоты.

Измерение диапазона действия индикатора заключается в определении минимального и максимального входных уровней, при которых небольшие изменения частоты сигнала вызывают изменения положения указателя индикатора настройки.

МЭК 315-1 рекомендует определить ряд характеристик, оценивающих свойства системы настройки. К этим характеристикам относятся: лёгкость настройки, лёгкость считывания показателей со шкалы и люфт механизма настройки. Под лёгкостью настройки радиоприемника понимается перемещение точки на окружности ручки при определенном изменении частоты. В некоторых, особенно малогабаритных приемниках, конструкция системы такова, что малейшее изменение положения ручки настройки вызывает изменение частоты настройки, соответствующее нескольким станциям. Очень малое изменение частоты настройки при повороте ручки настройки тоже невыгодно, поскольку в таком приемнике перестройка с нижней частоты диапазона до верхней будет занимать слишком много времени. Нормой настройки в диапазонах ДВ, СВ и КВ может быть выбрано значение не меньше 0,2 мм/кГц. При измерении влияние люфта необходимо исключить.

Легкость считывания показаний со шкалы определяется длиной шкалы, соответствующей заданному изменению частоты.

Величина легкости считывания показаний со шкалы показывает, позволяет ли стрелочно-шкальное устройство приемника различать частоты двух близких по частоте станций. В диапазонах сигналов с АМ перемещение стрелки не менее чем на 1 мм можно считать достаточным, если частота изменяется на 10 кГц. Чем длиннее шкала, тем лучше будет лёгкость считывания со шкалы.

Наличие люфта органов настройки приводит к тому, что одна и та же частота настройки соответствует двум положениям ручки настройки или двум положениям стрелки на шкале. Величина люфта измеряется в миллиметрах.

1.2. Лабораторный практикум. «Проверка диапазонов принимаемых частот и изучение характеристик органов настройки приемника на несущую частоту сигнала»

Описание лабораторного стенда

Цель работы: изучение аппаратуры и методов измерения диапазона принимаемых частот, погрешностей градуировки шкалы, диапазона действия индикатора настройки, лёгкости настройки и лёгкости считывания показаний со шкалы, люфта органов настройки.

Для проведения лабораторной работы необходимы следующие измерительные приборы и вспомогательные устройства:

1. Генератор сигналов измерительный высокочастотный с амплитудной модуляцией (ГСС-АМ), с диапазоном частот $0,1 \pm 30,0$ МГц, например, KEYSIGHT 33210A.
2. Эквивалент антенны для измерения параметров приемников (кроме автомобильных) внешней антенной в диапазонах ДВ, СВ, КВ.
3. Вольтметр электронный переменного тока (ВЭ).
4. Частотомер электронно-счетный (ЧЭС), например ЧЗ-34.
5. Эквивалент нагрузки (может быть встроен в исследуемое радиоприемное устройство).

Схема подключения приборов для проведения лабораторной работы приведена на рис. 1.1.

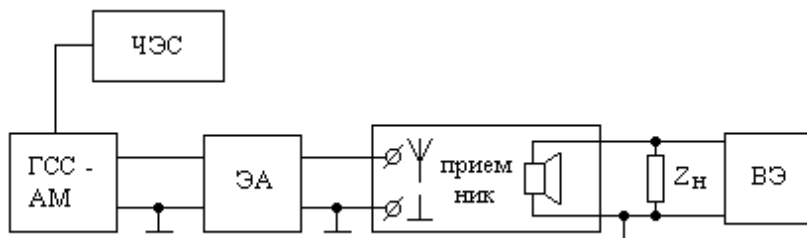


Рис. 1.1. Схема подключения приборов

Измерение диапазона принимаемых частот

Подключить измерительные приборы и вспомогательные устройства к исследуемому приемнику по схеме (рис. 1.1).

Условия измерения:

Частота модуляции сигнала – 1000 Гц.

Глубина модуляции (коэффициент модуляции) АМ, m_{AM} % – 30 (0,3).

Напряжение несущей частоты входного сигнала – $U_{вх} = 2U_{ном}$, где $U_{ном}$ – напряжение входного сигнала, соответствующее номинальной (паспортной) чувствительности.

Регулятор ширины полосы – в положение УП (узкая полоса).

АПЧ – выключена.

Регулятор тембра – в среднее положение.

Регулятор громкости – в положении, соответствующем максимальной выходной мощности. После первой настройки ГСС-АМ на приёмник, уменьшая усиление, регулятор громкости установить в положение, соответствующее нормальной выходной.

Проведение измерений. Указатель частоты настройки приёмника поочередно устанавливать в крайнее положение шкалы каждого диапазона и поддиапазона частот. Изменяя частоту ГСС-АМ, настроить генератор на приёмник по максимуму напряжения на выходе (на акустической системе или на эквиваленте нагрузки). Частота настройки генератора, определённая частотомером, будет соответствовать частоте границ диапазона. При настройке генератора на приёмник выключением АМ или прослушиванием тока 1000 Гц убедиться, что приемник настроен на генератор, а не на внешнюю помеху.

Результаты измерения внести в таблицу, аналогичную табл.1.1.

Таблица 1.1

Диапазон принимаемых волн

Модель РПрУ	Диапазон, поддиапазон	Граничные частоты, МГц		Граничные длины волн, м	
		Номинальные	реальные	номинальные	реальные
	ДВ СВ КВ/1 КВ/2 КВ/3				

Измерение погрешности градуировки шкалы

Схема подключения приборов и условия измерения те же, что и в предыдущем пункте.

Частоты измерения (в начале, середине и конце каждого диапазона) выбрать так, чтобы положение указателя настройки приемника совпало с градуировочной риской на шкале.

Проведение измерений. Частотомером измерить частоту генератора, совпадающую с частотой настройки приемника. Результатом измерения является разность между значением частоты генератора и показанием на шкале приемника.

Результаты измерения занести в таблицу, аналогичную табл. 1.2.

Таблица 1.2

Погрешность градуировки шкалы

Модель	Диапазон, поддиапазон	Частота по шкале, кГц	Частота генераторов, кГц	Погрешность, кГц
	ДВ			
	СВ			
	КВ 1			
	КВ 2			

Измерение лёгкости настройки

Схема подключения приборов и условия измерения те же, что и в предыдущем пункте.

Проведение измерений. Настроить РПрУ на одну из частот генератора согласно табл. 1.3. Отметить положение какой-либо точки на ручке настройки приемника. Затем повернуть ручку настройки приемника так, чтобы отмеченная точка переместилась на 10 мм, и подстроить генератор на новую частоту приемника, отмечая ее в табл. 1.3. Измерения повторить, поворачивая ручку приемника на 10 мм относительно первоначального положения в другую сторону.

Результатом измерения является отношение 20 мм к разнице частот двух крайних настроек, выраженное в миллиметрах на килогерц.

Лёгкость настройки

Частота настройки первоначальная, кГц	Частота настройки, соответствующая повороту ручки направо на 10 мм, кГц	Частота настройки, соответствующая повороту ручки налево на 10 мм, кГц	Лёгкость настройки, мм/кГц
1000,0			
7100,0			

Измерение лёгкости считывания со шкалы

Схема подключения приборов и условия измерения те же, что и в предыдущем пункте.

Проведение измерений. Настроить РПрУ точно на частоты, указанные в табл. 1.4. Измерить лёгкость считывания со шкалы, замечая положение стрелки на шкале приемника. Затем перемещать ее в обе стороны от первоначального положения на 10 мм. В обоих случаях определить точное значение частоты входного сигнала, соответствующее настройке приемника.

Результаты измерения занести в табл. 1.4. Результатом измерения будет отношение величины 20 мм к разнице частот между двумя настройками в миллиметрах на килогерц.

Таблица 1.4

Лёгкость считывания со шкалы

Частота настройки первоначальная, кГц	Частота настройки, соответствующая перемещению стрелки по шкале на 10 мм вправо, кГц	Частота настройки, соответствующая перемещению стрелки по шкале на 10 мм влево, кГц	Легкость считывания со шкалы, мм/кГц
1000,0			
7100,0			

Измерение люфта органов настройки

Схема подключения приборов и условия измерения те же, что и в предыдущем пункте.

Проведение измерений. Настроить РПрУ точно на частоты, указанные в табл. 1.5. Отметить положение какой-либо точки на ручке настройки приемника. Затем очень медленно поворачивать ручку на-

стройки в таких пределах, чтобы частота настройки оставалась постоянной (напряжение на выходе не уменьшается).

Измерение повторить, поворачивая ручку настройки в другую сторону.

Результатом измерения является значение полного перемещения ручки настройки в указанных пределах, выраженное в миллиметрах.

Таблица 1.5

Люфт органов настройки

Частота настройки первоначальная, кГц	Люфт органов настройки, мм
1000,0	
7100,0	

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен включать в себя:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) схему подключения приборов и вспомогательных устройств к испытуемому приемнику;
- 4) таблицы 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 с результатами измерений;
- 5) краткие выводы о проделанной работе (соответствие реальных характеристик паспортным и качественную /субъективную/ оценку системы настройки исследуемого приемника).

Контрольные вопросы

1. Какие каскады РПрУ требуют регулировки, если диапазон принимаемых частот не соответствует заданному в ТУ?
2. Что понимается под диапазоном рабочих частот РПрУ?
3. Как определяется коэффициент перекрытия диапазона?
4. Какой метод настройки на частоту принимаемого сигнала больше всего соответствует действиям радиослушателя при настройке на станции?
5. Что такое диапазон действия индикатора настройки?
6. Чем отличается лёгкость настройки от лёгкости считывания показаний со шкалы? В каких единицах они измеряются?
7. Что такое люфт органов настройки и в каких единицах он измеряется?

1.3. Чувствительность

Чувствительность – это мера способности РПрУ принимать слабые сигналы и воспроизводить сообщение с приемлемым качеством. Различают чувствительность радиоприемника по напряженности электромагнитного поля сигнала и величине ЭДС или мощности сигнала на входе приемника. Связь между этими характеристиками может быть определена по формуле:

$$U_a = E \cdot h_{\text{ль}}, \quad (1.1)$$

где U_a – ЭДС сигнала, наведенная в приемной антенне, В;

E – напряженность поля сигнала, В/м;

$h_{\text{ль}}$ – действующая высота приемной антенны, м.

Количественно, чувствительность определяется минимальным уровнем нормально модулированного сигнала в антенне или напряженностью поля этого сигнала, обеспечивающего при некоторых условиях заданную выходную мощность.

При малом коэффициенте усиления РПрУ связь между чувствительностью РПрУ при приёме АМ сигналов, выходным напряжением и коэффициентом усиления может быть представлена в следующем виде:

$$U_{a0} = U_{\text{выхн}} / K_0 \cdot m_n, \quad (1.2)$$

где K_0 – коэффициент усиления приемника на частоте настройки;

U_{a0} – чувствительность (ЭДС сигнала в приемной антенне, обеспечивающая нормальную выходную мощность при точной настройке приемника на частоту сигнала);

$U_{\text{выхн}}$ – выходное напряжение, соответствующее нормальной выходной мощности;

$m_n = 0,3$ – нормальный коэффициент модуляции.

Из приведенного соотношения следует, что чувствительность РПрУ улучшается с увеличением K_0 , так как РПрУ обеспечивает заданное нормальное напряжение при меньшей ЭДС в антенне. Чувствительность РПрУ в этих условиях ограничена усилением. Таким образом, *чувствительность РПрУ, ограниченная усилением*, определяется минимальным уровнем радиосигнала на его входе, необходимым для получения заданного уровня сигнала на его выходе.

В современных РПрУ, как правило, имеется избыточное усиление, поэтому нормальное напряжение на выходе может появиться за счет шума антенны и шума элементов РПрУ – усилительных приборов, колебательных контуров и резисторов. В этом случае чувствительность ограничивается шумами, так как при увеличении усиления приемника будет увеличиваться как выходное напряжение полезного сигнала, так и шумовое.

Для удовлетворительного приема радиосигнала необходимо, чтобы его напряжение на выходе в определенное число раз превышало напряжение шумов, т.е. чтобы отношение сигнал/шум на выходе радиоприемника было не меньше некоторой заданной величины

$$\gamma_{mp} \geq \frac{U_{выхс}}{U_{выхш}}, \quad (1.3)$$

где $U_{выхс}$ – напряжение сигнала на выходе приемника;

$U_{выхш}$ – напряжение шума на выходе приемника.

Таким образом, чувствительность РПрУ, ограниченная шумами – это чувствительность РПрУ, определяемая минимальным уровнем радиосигнала на его входе при заданном отношении уровней полезного сигнала и шума и заданном уровне полезного сигнала на выходе РПрУ.

В тракте АМ радиовещательных приемников требуемое отношение сигнал/шум должно быть не менее 20 дБ (10 раз), в тракте ЧМ при приеме в монорежиме не менее 26 дБ (20 раз), в тракте ЧМ в стереорежиме не менее 50 дБ. В общем случае требуемое отношение сигнал/шум указывается в нормативно-технической документации (НТД) на радиоприемное устройство.

Часто используется термин “пороговая чувствительность”. Это чувствительность радиоприёмника, определяемая минимальным уровнем радиосигнала на его входе при равных уровнях полезного сигнала и шума на выходе радиоприёмника.

Методика измерения реальной чувствительности совпадает с методикой измерения чувствительности, ограниченной шумами, согласно действующему "ГОСТ 5651-89. Аппаратура радиоприемная бытовая. Общие технические условия".

Для определения чувствительности, ограниченной шумами, необходимо установить, как влияет коэффициент усиления приемника на уровень шумов на выходе.

Представим шумы приемного устройства в виде двух источников: шума антенны – $U_{ша}$ и шума приемника – $U_{шпр}$ (рис. 1.2).

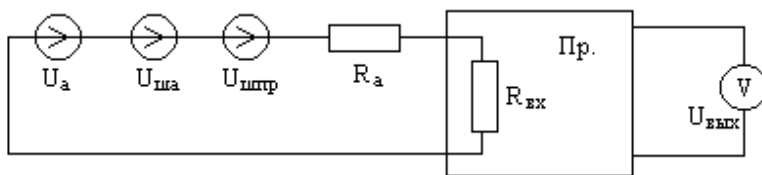


Рис. 1.2. Шумовая эквивалентная схема приёмного устройства

ЭДС шума реальной антенны можно рассчитать по формуле Найквиста:

$$U^2_{шa} = 4kT_a R_a \Delta f_{эф}, \quad (1.4)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана;

T_a – шумовая температура антенны;

R_a – сопротивление излучения антенны;

$\Delta f_{эф} = 1,1 \Delta f_{0,707}$ – эффективная (шумовая) полоса пропускания тракта приёмника.

Шумы РПрУ, перечисленные к его входу, можно представить в виде источника ЭДС $U_{шnp}$. Эту ЭДС также можно рассчитать по формуле Найквиста как возникшую в эквиваленте антенны R_a :

$$U^2_{шnp} = 4kT_{np} R_a \Delta f_{эф}, \quad (1.5)$$

где T_{np} – шумовая температура приемника.

Квадрат суммарной ЭДС шума:

$$U^2_{ш\Sigma} = U^2_{шnp} + U^2_{шa} = 4kT(T_a + T_{np})R_a \Delta f_{эф}. \quad (1.6)$$

При заданном коэффициенте усиления приемника K_0 шумовое напряжение на выходе РПрУ:

$$U_{швых} = K_0 U_{ш\Sigma}. \quad (1.7)$$

При амплитудной модуляции выходное напряжение сигнала:

$$U_{свых} = K_0 m_n U_{a0}. \quad (1.8)$$

При заданном отношении сигнал/шум на выходе в эквиваленте антенны необходимо обеспечить превышение сигнала над шумами:

$$U_{a0} \geq \gamma_{mp} U_{ш\Sigma} = \gamma_{mp} \sqrt{U^2_{шa} + U^2_{шnp}}. \quad (1.9)$$

При амплитудной модуляции:

$$U_{a0} \geq \gamma_{mp} U_{ш\Sigma} / m_n = \gamma_{mp} \sqrt{U^2_{шa} + U^2_{шnp}} / m_n. \quad (1.10)$$

Таким образом, чувствительность РПрУ, ограниченная шумами, определяется требуемым отношением сигнал/шум γ_{mp} и суммарной ЭДС шума антенны и РПрУ.

Удобной характеристикой РПрУ, позволяющей определить его совершенство с точки зрения приближения чувствительности к идеальной, т.е. ограниченной помехами внешнего происхождения, является коэффициент шума.

Коэффициентом шума называют отношение уровня шума, измеренного на входе детектора или выходе линейной части РПрУ при температуре источника сигнала 293 К, к мощности шума, которая была бы на соответствующем выходе, если бы источник сигнала был единственным источником шума:

$$K_{ш} = P_{ш\Sigma} / P_{шa} = U_{ш\Sigma}^2 / U_{шa}^2 . \quad (1.11)$$

С учетом (1.6) при $T_a = T_0$, где $T_0 = 293$ К, $K_{ш} = 1 + T_{np} / T_0$.

Величина T_{np} / T_0 называется относительной шумовой температурой РПрУ, т.е. *относительная шумовая температура РПрУ* – это величина, равная коэффициенту шума, уменьшенному на единицу.

Идеальное приёмное устройство должно иметь коэффициент шума, равный единице. Реальное приёмное устройство имеет коэффициент шума больше единицы и тем больше, чем больше шумовая температура приёмника. Если известен или рассчитан общий коэффициент шума, то шумовую температуру приёмника можно определить по следующей формуле:

$$T_p = T_0 (K_{ш} - 1) . \quad (1.12)$$

Общий коэффициент шума приёмного устройства зависит от параметров его отдельных звеньев. Рассмотрим обобщенную схему приёмного тракта, состоящего из n структурных элементов (рис. 1.3).

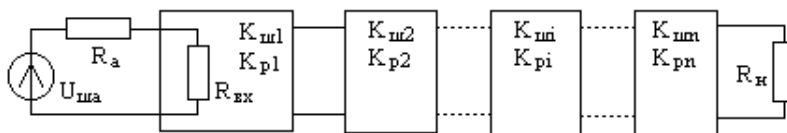


Рис. 1.3. Обобщенная структурная схема приемного тракта

Предположим, что каждый из этих элементов имеет известный коэффициент усиления мощности K_{pi} и коэффициент шума $K_{шиi}$. Мощность шума генератора сигнала на выходе устройства:

$$P_{шex} = P_{шex} K_{p1} K_{p2} \dots K_{pn} = P_{шex} K_{po} , \quad (1.13)$$

где $K_{po} = \prod_{i=1}^n K_{pi}$ – общий коэффициент усиления мощности;

$P_{шex}$ – мощность шума, поступающая на вход первого каскада.

Мощность шума, поступающая на вход первого каскада:

$$P_{шex} = P_{шmax} q_{ex} , \quad (1.14)$$

где $P_{u \max} = U_{ша}^2 / 4R_a = kT_o \Delta f_{эф}$ – максимальная мощность шума, отдаваемая генератором;

$q_{ex} = 4R_{ex} R_a (R_{ex} + R_a)^{-2}$ – коэффициент согласования входа РПрУ с генератором сигнала – антенной.

Таким образом,

$$P_{уз} = P_{ui} q_{ex} K_{po}. \quad (1.15)$$

Собственную мощность шума каждого из блоков, перечисленную ко входу блока, можно определить, пользуясь соотношением:

$$P_{ui} = K_{ui} P_{uexi}. \quad (1.16)$$

Учитывая, что

$$P_{ui} = P_{uexi} + P_{uсобi},$$

собственная мощность шума, пересчитанная ко входу блока,

$$P_{uсобi} = (K_{ui} - 1) P_{uexi}. \quad (1.17)$$

Для любого элемента структурной схемы (рис. 1.2):

$$P_{uexi} = P_{u \max} q_i, \quad (1.18)$$

где q_i – коэффициент согласования последующего каскада с предыдущим. Мощность шума на выходе определяется формулой:

$$P_{uвыxi} = q_i P_{u \max} \frac{K_{po}}{K_{p1} K_{p2} \dots K_{p(i-1)}}. \quad (1.19)$$

Общая шумовая мощность на выходе:

$$P_{u\Sigma} = P_{u \max} q_{ex} K_{po} + P_{u \max} q_{ex} K_{po} (K_{ui} - 1) + \dots. \quad (1.20)$$

Разделив (2.20) на (2.15), получим

$$K_{ui} = K_{ui1} + \frac{K_{ui2} - 1}{K_{p1}} \cdot \frac{q_2}{q_{ex}} + \frac{K_{ui3} - 1}{K_{p1} K_{p2}} \cdot \frac{q_3}{q_{ex}} + \dots. \quad (1.21)$$

На основании (1.21) можно сделать следующие выводы:

1. При больших коэффициентах усиления мощности первых каскадов общий коэффициент шума практически не зависит от коэффициентов.

2. При большом коэффициенте усиления мощности первого звена минимальный общий коэффициент шума обеспечивается при минимальном коэффициенте шума первого звена.

1.4. Лабораторный практикум. Исследование характеристик чувствительности приемников

Цель работы: изучение аппаратуры, условий и методов измерения чувствительности радиовещательных приёмников. Определение взаимосвязей между параметрами функциональных узлов приемника и характеристиками чувствительности.

Измерение чувствительности по напряжению со входа внешней антенны в диапазонах ДВ, СВ, КВ

Подключить измерительные приборы к исследуемому приемнику согласно схеме (рис. 1.4).

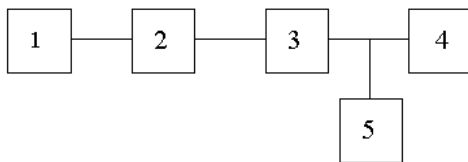


Рис. 1.4. Схема подключения приборов для измерения чувствительности по напряжению со входа для внешней антенны: 1 – генератор сигналов измерительный высокочастотный с амплитудной модуляцией; 2 – эквивалент антенны; 3 – радиоприемник; 4 – эквивалент нагрузки; 5 – вольтметр электронный переменного тока.

Чувствительность радиовещательных приемников измерять на частотах, указанных в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Частоты, рекомендованные для измерения

Диапазон	ДВ	СВ	КВ			
			49 м	41 м	31 м	25 м
Частоты, МГц	0,160	0,560	6,10	7,2	9,6	11,8
	0,200	1,000				
	0,250	1,400				

Порядок выполнения:

1) регулятор громкости установить в положение максимального усиления;

2) регуляторы тембра установить в положения, обеспечивающие получение наиболее равномерной частотной характеристики;

3) регулятор ширины полосы пропускания (при его наличии) в положение ШП (широкая полоса);

4) подать на вход РПрУ через эквивалент антенны сигнал, модулированный частотой 1000 Гц, с глубиной модуляции 30 % и уровнем, равным номинальной (паспортной) чувствительности РПрУ в данном диапазоне;

5) настроить РПрУ на частоту подаваемого сигнала по максимальному напряжению на низкочастотном выходе РПрУ;

6) аттенуатором генератора установить уровень выходного напряжения РПрУ, равный $U_{\text{вых ст}}$ (если иное не указано в НТД на РПрУ). Величину этого напряжения определить по формуле:

$$U_{\text{вых ст}} = \sqrt{P_{\text{вых ст}} R_n}, \quad (1.22)$$

где $P_{\text{вых ст}}$ – стандартная выходная мощность;

R_n – модуль полного электрического сопротивления нагрузки (акустической системы);

$P_{\text{вых ст}} = 0,05$ Вт для приемников с $P_{\text{ном}} > 150$ мВт;

$P_{\text{вых ст}} = 0,005$ Вт для приемников с $P_{\text{ном}} \leq 150$ мВт.

Значение высокочастотного сигнала, передаваемого на вход РПрУ (показание аттенуатора генератора), соответствует в данном случае чувствительности РПрУ, ограниченной усилением. Результат измерения занести в табл. 1.7.

7) Для измерения чувствительности, ограниченной шумами выключить модуляцию высокочастотного сигнала.

Если при этом уровень шума (напряжения на низкочастотном выходе радиоприемника) не менее чем на 20 дБ (в 10 раз) меньше напряжения модуляции, то измерение на данной частоте высокочастотного сигнала можно считать законченным. Чувствительность, ограниченная шумами, равна в данном случае чувствительности, ограниченной усилением. Результат измерения занести в табл. 1.7.

Если при выключенной модуляции высокочастотного сигнала отношение сигнал/шум менее 20 дБ, то регулятором громкости устанавливают на низкочастотном выходе радиоприемника уровень шума на 20 дБ меньше $U_{\text{вых ст}}$. Затем включают модуляцию полезного сигнала и аттенуатором генератора устанавливают уровень выходного напряжения радиоприемника, равный $U_{\text{вых ст}}$. Повторяя эти операции, изменением уровня входного сигнала и регулятором громкости добиваются одновременного выполнения двух условий: уровень выходного напряжения сигнала должен соответствовать требуемому значению; отноше-

ние сигнал/шум должно быть равно заданному. Значение высокочастотного сигнала, подаваемого на вход радиоприемника, (показание аттенюатора генератора) соответствует в данном случае чувствительности приемника, ограниченной шумами. Результат измерения занести в табл. 1.7.

8) измерить чувствительность, ограниченную усилением и ограниченную шумами на частотах, приведенных в табл. 1.1 для моделей приемников, указанных преподавателем.

Таблица 1.7

Результаты измерения чувствительности радиовещательных приемников

Модель приемника	$U_{\text{вых ст}}$	Диапазон	Частота	Номинальная (паспортная) чувствительность, ограниченная шумами	Чувствительность, ограниченная усилением	Чувствительность, ограниченная шумами

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется и представляется к защите каждым студентом индивидуально и должен содержать:

- 1) титульный лист,
- 2) цель работы,
- 3) схему подключения приборов для снятия характеристик чувствительности,
- 4) таблицу 1.7 с результатами измерений,
- 5) графики зависимости чувствительности от частоты сигнала в СВ и КВ диапазонах,
- 6) краткие выводы о проделанной работе (соответствуют ли измеренные значения чувствительности – паспортным).

Контрольные вопросы

1. Что такое чувствительность РПрУ?
2. В каких единицах оценивается чувствительность РПрУ при работе на внутреннюю магнитную антенну?
3. Что такое чувствительность, ограниченная усилением?
4. Что такое чувствительность, ограниченная шумами?
5. Что такое коэффициент шума РПрУ?
6. Какие параметры модуляции сигнала приняты при измерении чувствительности?

7. Что такое шумовая температура РПрУ?
8. Какими каскадами приемника определяется его чувствительность?
9. Что такое генератор стандартного электромагнитного поля и в каких случаях требуется его применение?

1.5. Избирательность

Избирательность (селективность) РПрУ – это параметр или совокупность параметров, характеризующих способность РПрУ выделять полезный сигнал из суммы всех сигналов и помех, наводимых в приемной антенне, т.е. ослаблять сигналы с частотой, отличной от частоты настройки приемника.

Параметры избирательности можно разделить на три группы:

- 1) параметры, обусловленные неидеальностью селективных цепей в тракте промежуточной частоты;
- 2) параметры, обусловленные взаимодействием сильных помех между собой или с принимаемым сигналом;
- 3) параметры, обусловленные супергетеродинным способом приёма.

К первой группе относятся такие параметры, как избирательность по соседнему каналу, крутизна скатов резонансной кривой и полоса пропускаемых частот.

В первом приближении эти параметры оцениваются по кривой селективности. Она представляет собой зависимость ЭДС сигнала в антенне E_a , необходимой для создания на выходе приемника стандартной (испытательной) мощности, от расстройки Δf между несущей частотой сигнала f_c и частотой настройки приемника f_0 :

$$\Delta f = f_c - f_0 \quad (1.23)$$

Для обеспечения сравнительной оценки избирательности по оси абсцисс обычно откладывают отношение $E_a / E_{a0} = \sigma$, называемое ослаблением. Эта величина показывает, во сколько раз ослабляется сигнал с частотой, отличной от частоты настройки приемника по отношению к сигналу, частота которого равна частоте настройки приемника f_0 . Частотное ослабление задается в логарифмических единицах-децибелах ($\sigma \text{ дБ} = 20 \lg E_a / E_{a0}$). Поскольку в данном случае избирательность оценивается по одному сигналу, то ее принято называть односигнальной, а метод ее измерения – односигнальным методом. Примерный вид кривой односигнальной избирательности изображен на рис. 1.5.

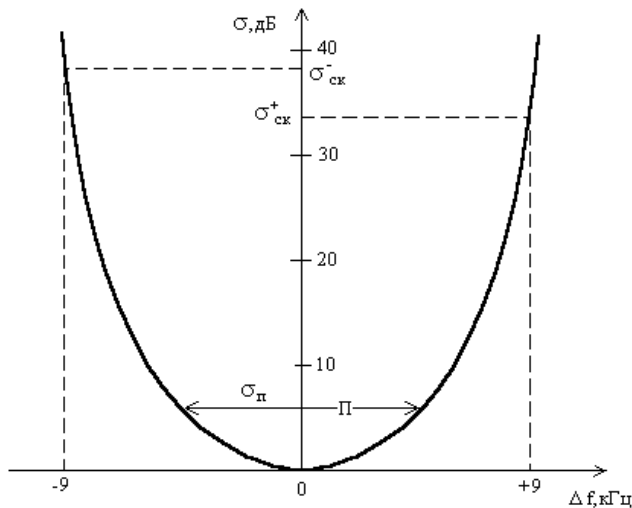


Рис. 1.5. Кривая односигнальной избирательности

Ширину кривой избирательности на уровне σ_n условились называть *полосой пропускания* РПрУ Π .

Величину σ_n определяют частотные искажения модулирующей функции (звуковой программы) на верхних частотах модуляции, а полоса пропускания Π – диапазон воспроизводимых звуковых частот:

$$\Pi > 2F_{MB}, \quad (1.24)$$

где F_{MB} – верхняя, воспроизводимая на выходе РПрУ звуковая частота.

В диапазонах ДВ и СВ несущие частоты радиовещательных станций распределены с шагом 9 кГц, а в диапазоне КВ-5 кГц. Селективность по соседнему каналу поэтому измеряют в диапазонах ДВ, СВ при расстройках ± 9 кГц в диапазоне $\text{КВ} \pm 5$ кГц. Дополнительно проводят измерения в диапазонах ДВ и СВ при расстройках ± 18 кГц.

Реальный РПрУ является нелинейной системой, и для учета совместного действия сигнала и помех к нему неприменим принцип суперпозиции, т.е. действие помехи зависит от уровня полезного сигнала. Слушателю важно хорошее подавление помехи от соседней станции не в отсутствии полезного сигнала, а тогда, когда соседняя станция мешает приёму полезного сигнала. Для оценки избирательности РПрУ в реальных условиях вводится понятие двухсигнальной избирательности. Она учитывает одновременное действие полезного и мешающего сигналов, имеющих различные частоты.

Зеркальный канал является частным случаем дополнительных каналов приема, существование которых вызвано супергетеродинным принципом приема. Частоты дополнительных каналов приема можно определить из следующего уравнения:

$$f_{\text{дон}} = m / n \cdot f_{\Gamma} \pm 1 / n \cdot f_{\text{нр}}, \quad (1.25)$$

где f_{Γ} – частота гетеродина;

$f_{\text{нр}}$ – промежуточная частота;

$m = 0, 1, 2, 3, \dots$;

$n = \pm 1, 2, 3, \dots$

Наибольшие помехи проникают по дополнительным каналам при $m = n = 1$ (зеркальная помеха). При f_r больше частоты настройки приемника f_0 :

$$f_{\text{зк}} = f_{\Gamma} + f_{\text{нр}} \quad (1.26)$$

Учитывая, что

$$f_{\Gamma} = f_0 + f_{\text{нр}},$$

$$f_{\text{зк}} = f_0 + 2f_{\text{нр}}. \quad (1.27)$$

При $m = n = -2$

$$f_{\text{дон}} = f_{\Gamma} - 1/2 f_{\text{нр}}; \quad (1.28)$$

$$f_{\text{дон}} = f_{\Gamma} + 1/2 f_{\text{нр}}. \quad (1.29)$$

Частоты этих каналов находятся близко от частоты полезного сигнала и их ослабление определяется резонансными свойствами избирательных цепей до преобразователя частоты.

Если частота входного сигнала равна промежуточной частоте ($m = 0, n = 1$), то преобразователь частоты будет работать в режиме усиления, ослабление помехи с частотой $f_{\text{дон}} = f_{\text{нр}}$ также будет определяться избирательностью входных цепей и УВЧ.

1.6. Лабораторный практикум. Исследование характеристик избирательности приемников по тракту приема АМ сигналов

Цель работы: изучение аппаратуры и методов измерения избирательности радиовещательных приемников по каналу приема АМ сигнала.

Описание лабораторного стенда

Структурная схема включения приборов при измерении избирательности приведена на рис. 1.6.

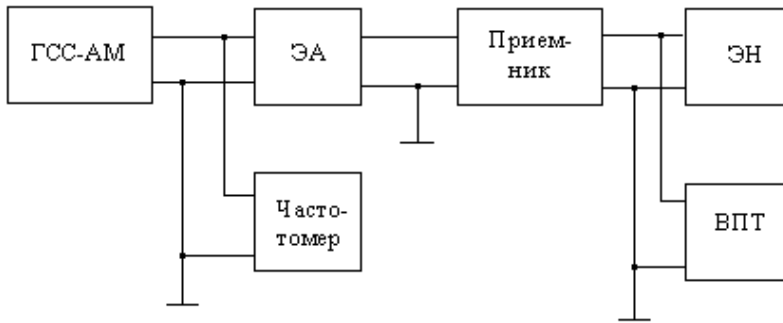


Рис. 1.6. Схема подключения приборов для измерения односигнальной избирательности тракта АМ сигналов: ГСС-АМ – генератор сигналов синусоидальных с амплитудной модуляцией; ЭА – эквивалент антенны; ЭН – эквивалент нагрузки; ВПТ – вольтметр переменного тока

Снятие характеристик избирательности по соседнему каналу односигнальным методом

Порядок измерений. Подключить приборы к исследуемому приемнику в соответствии со схемой (рис. 1.6). Подать на вход исследуемого приемника сигнал амплитудой, соответствующей паспортной чувствительности приемника. Частота сигналов $f_0 = 160 \text{ кГц}$ и 270 кГц , глубина модуляции (коэффициент модуляции) $m_{AM} = 30\% (0,3)$, частота модуляции $F_m = 1000 \text{ Гц}$.

Регулятор громкости приемника вывести в положение максимального усиления. Регулятор полосы пропускания – в положение “УП”. Регуляторы тембра – в среднее положение.

Ручкой настройки приемника по максимуму выходного напряжения на милливольтметре настроиться на частоту генератора. Регулятором громкости приемника установить на выходе напряжение $U_{ст} = 0,45 \text{ В}$, что соответствует стандартной (испытательной) мощности приемника $P_{cm} = 50 \text{ мВт}$.

$$U_{cm} = \sqrt{P_{cm} \cdot R_n}, \quad (1.30)$$

где $R_n = 40 \text{ Ом}$ – сопротивление эквивалента нагрузки (громкоговорителя).

Не изменяя частоты настройки приемника f_0 , расстраивать генератор согласно таблице 1.8. Величину выходного напряжения генератора (т.е. напряжение сигнала) увеличивать при этом до получения на выходе приемника U_{cm} на каждом шаге расстройки. Результаты измерений занести в табл. 1.8. По формулам п.1.5 определить затухание σ (дБ).

Не изменяя частоты настройки приемника, установить уровень сигнала с ГСС-АМ на 3 дБ (в 1,4 раза) больше паспортной чувствительности. Расстраивать ГСС-АМ в обе стороны от точной настройки приемника до тех пор, пока напряжение на его выходе не будет равно U_{cm} .

Таблица 1.8

Параметры избирательности по соседнему каналу

Модель	f_c ,	142	151	154	156	158	160	162	164	166	178
	кГц	252	261	264	266	268	270	272	274	279	288
	Δf , кГц	-18	-9	-6	-4	-2	0	4	6	9	18
	$U_{вх}^*$						200				
	мкВ						200				
	σ^*						1				
	дБ						1				
	σ^*						0				
	дБ						0				
	$U_{вх}^*$						350				
	раз						350				
	σ^*						1				
	раз						1				
	σ^*						0				
	дБ						0				

* – числитель для $f_0 = 160$ кГц, знаменатель для $f_0 = 270$ кГц. Соответствует чувствительности приемника.

Разность частот ГСС-АМ при увеличении и уменьшении его частот будет шириной полосы пропускания на уровне 3 дБ:

$$\Pi = f'_{0,707} - f_{0,707}, \quad (1.31)$$

где $f'_{0,707}$ – верхнее значение частоты ГСС-АМ;

$f_{0,707}$ – нижнее значение частоты ГСС-АМ.

Определить по формуле 1.30 ширину полосы пропускания исследуемых приёмников на частотах 160 кГц и 270 кГц.

Снятие характеристик избирательности по зеркальному и дополнительным каналам приема односигнальным методом

Порядок измерений. Не изменяя частоты настройки приемника, перестроить ГСС-АМ на частоту помехи, согласно табл. 1.9.

Таблица 1.9

Параметры избирательности, обусловленные супергетеродинным способом приема

Параметры для определения избирательности		Модель № 1				Модель № 2			
		Дополнит. каналы приёма				Дополнит. каналы приёма			
		$f_0 + \frac{1}{2} f_{пр}$	$f_{пр}$	$f_0 + \frac{3}{2} f_{пр}$	$f_0 + 2f_{пр}$	$f_0 + \frac{1}{2} f_{пр}$	$f_{пр}$	$f_0 + \frac{3}{2} f_{пр}$	$f_0 + 2f_{пр}$
Частота, кГц	для f_{01} ,								
	для f_{02} ,								
	для f_{03} ,								
U_{ex} , мкВ	для f_{01} ,								
	для f_{02} ,								
	для f_{03} ,								
σ , дБ	для f_{01} ,								
	для f_{02} ,								
	для f_{03} ,								

f_0 – задается преподавателем.

Уровень сигнала с ГСС-АМ увеличивать до максимального возможного значения (0,5В). Если при этом милливольтметр не зафиксирует наличия сигнала на выходе приёмника или он мал, то медленно подстраивать ГСС-АМ в области меньших и больших частот до получения максимального напряжения на милливольтметре.

После настройки на каждый дополнительный канал приёма изменять уровень входного сигнала до получения на выходе приёмника напряжения, соответствующего стандартной выходной мощности, отмечая при этом частоту и уровень входного сигнала (выходное напряжение с ГСС-АМ) соответствующего дополнительного канала приёма.

Результаты измерений занести в табл. 1.9. По формулам п. 1.2 определить σ (дБ).

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется и представляется защите каждым студентом индивидуально и должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) схемы подключения приборов (рис. 1.9);
- 4) таблицы 1.8, 1.9 с результатами измерений;
- 5) данные о полосе пропускания исследуемых приемников на уровне 3 дБ на двух несущих частотах (160 кГц и 270 кГц), определенной по формуле (1.31);
- 6) графики зависимости σ (дБ) = $f(\Delta f)$, построенные по данным таблицы 1.9 (аналогичные рис. 1.5);
- 7) краткие выводы о проделанной работе (совпадение результатов измерений с паспортными данными приемника).

Контрольные вопросы

1. Что такое избирательность радиоприемника?
2. В чем заключается отличие односигнальной избирательности от двухсигнальной?
3. Дайте определение термину “полоса пропускания” и объясните методику ее измерения.
4. Какими каскадами приемника определяется ослабление помехи по соседнему каналу? По зеркальному? Помехи с частотой, равной промежуточной?
5. Объясните возможные причины отклонения характеристик избирательности приемника от номинальных (паспортных).
6. Объясните причины изменения характеристик избирательности при изменении частоты настройки приемника.

1.7. Изучение характеристик избирательности приемников по каналу приема ЧМ-сигналов

Цель работы: изучение аппаратуры и методов измерения избирательности бытовой радиовещательной аппаратуры по каналу приема ЧМ сигналов.

К параметрам, обусловленным неидеальностью избирательных цепей в тракте промежуточной частоты относят такие параметры, как избирательность по соседнему каналу, крутизна скатов резонансной кривой и полоса пропускания по высокой частоте.

Для системы вещания в диапазоне УКВ, принятой в Российской Федерации, частота ближайшего соседнего канала отстоит от частоты полезного сигнала на 120 кГц, при этом оба эти сигнала имеют одну и

ту же синфазную модуляцию. Ближайший соседний канал с другой модуляцией отстоит от частоты полезного сигнала на 180 кГц.

При измерениях односигнальным методом избирательность РПрУ можно оценить по кривой избирательности. Она представляет собой зависимость ЭДС сигнала в антенне E_a , необходимой для создания на выходе РПрУ стандартной (измерительной) мощности, от расстройки Δf между несущей частотой сигнала f_c и частотой настройки приемника f_0 , т.е.

$$\Delta f = f_c - f_0. \quad (1.32)$$

Для обеспечения сравнительной оценки избирательности по оси ординат обычно откладывают отношение:

$$d = E_a / E_{a0}, \quad (1.33)$$

называемое ослаблением. Эта величина показывает, во сколько раз ослабляется полезный сигнал (или помеха по отношению к полезному сигналу) при данной расстройке. Удобнее ослабление задавать в логарифмических единицах – децибелах:

$$d (\text{дБ}) = 20 \lg E_a / E_{a0}. \quad (1.34)$$

Примерный вид кривой односигнальной избирательности изображен на рис. 1.7.

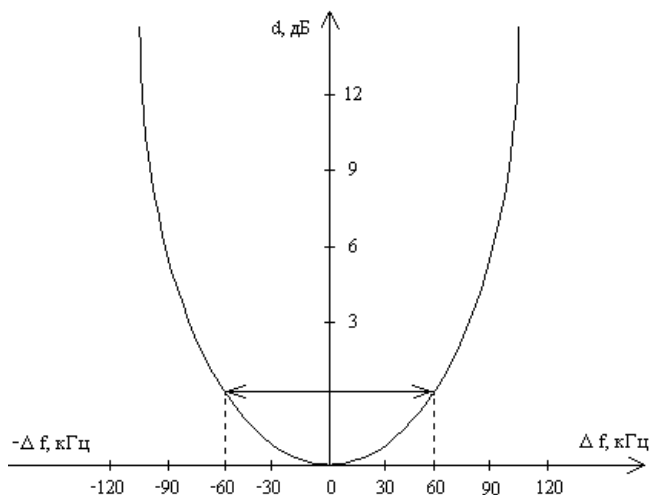


Рис. 1.7. Кривая односигнальной избирательности

Ширину кривой избирательности на уровне $d = 1,41$ (3дБ) условно называют *полосой пропускания* приемника.

Для неискаженного приема ЧМ сигнала теоретически требуется бесконечно широкая полоса пропускания. Но если ограничить спектр допустимым уровнем искажения принимаемого сигнала, учитывая только те его составляющие, минимальная амплитуда которых превышает 1% от немодулированной несущей, то ширину спектра можно определить формулой

$$\Pi = 2F_{\epsilon}(1 + \beta_{\max} + \sqrt{\beta_{\max}}), \quad (1.35)$$

где F_{ϵ} – верхняя, воспроизводимая на выходе приемника, звуковая частота;

β_{\max} – максимальное значение индекса модуляции.

Зеркальный канал является частным случаем дополнительных каналов приема, существование которых вызвано супергетеродинным принципом приема. Частоты дополнительных каналов приема можно определить из следующего уравнения:

$$f_{\text{дон}} = \frac{m}{n} f_{\Gamma} \pm \frac{1}{n} f_{\text{нр}}, \quad (1.36)$$

где f_{Γ} – частота гетеродина;

$f_{\text{нр}}$ – промежуточная частота;

$m = \pm 0, 1, 2, \dots$; $n = \pm 1, 2, 3, \dots$

Наибольшие помехи проникают по дополнительным каналам при $m = n = 1$ (зеркальная помеха). При большей частоте настройки приемника

$$f_{3n} = f_{\Gamma} + f_{\text{нр}}. \quad (1.37)$$

Учитывая, что

$$f_{\Gamma} = f_c + f_{\text{нр}},$$

$$f_{3n} = f_0 + 2f_{\text{нр}}. \quad (1.38)$$

При $m = n = -2$

$$f_{\text{дон}} = f_{\Gamma} - 1/2 f_{\text{нр}}, \quad (1.39)$$

$$f_{\text{дон}} = f_0 + 1/2 f_{\text{нр}}. \quad (1.40)$$

Частоты этих каналов находятся близко от частоты полезного сигнала и их ослабление определяется резонансными свойствами избирательных цепей до преобразователя частоты.

Описание лабораторного стенда

Структурная схема включения приборов для измерения избирательности приведена на рис. 1.8. Вольтметр постоянного тока подключается параллельно электролитическому конденсатору дробного детектора.

Подготовка к выполнению работы. Получить у преподавателя инструкции по эксплуатации (технические описания) измерительных приборов, исследуемые приемники и соединительные провода.

Изучить методику работы с приборами и подключить приборы к приёмнику, согласно рис. 1.8.

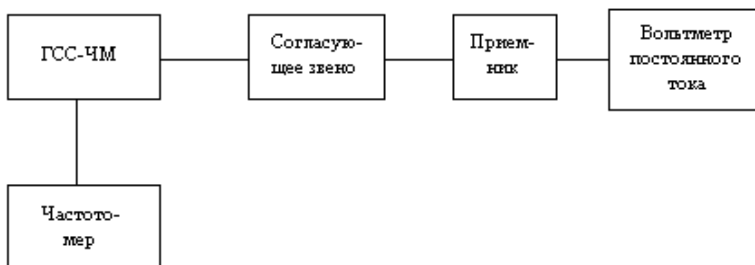


Рис. 1.8. Схема подключения приборов для измерения характеристик избирательности по тракту приема ЧМ сигнала

Снятие характеристик избирательности по соседнему каналу

Порядок измерений. Подать на вход приемника от ГСС-ЧМ немодулированный сигнал амплитудой 1 мВ, частотой 67 МГц (система автоматической подстройки частоты должна быть выключена).

Настроить РПРУ на частоту сигнала генератора по максимуму напряжения на электролитическом конденсаторе дробного детектора.

Используя аттенуаторы выходного напряжения ГСС-ЧМ установить на электролитическом конденсаторе дробного детектора при минимальном уровне входного сигнала напряжение с отношением сигнал/шум не менее 10 раз. Значение выходного напряжения ГСС-ЧМ, соответствующее в данном случае входному сигналу приемника (E_{a0}) при нулевой расстройке ($f_c = f_0$; $\Delta f = f_c - f_0 = 0$; $d = 1 (0 \text{ дБ})$) занести в таблицу 1.10.

Увеличить сигнал с ГСС-ЧМ на 3 дБ (в 1,4 раза). Медленно увеличивая частоту сигнала, получить на вольтметре постоянного тока напряжение, соответствующее нулевой расстройке. Значения выходного

напряжения ГСС-ЧМ (E_a приёмника) и расстройки $\Delta f = f_c - f_0$ занести в табл. 1.10.

Медленно уменьшая частоту сигнала, получить на вольтметре постоянного тока напряжение, соответствующее нулевой расстройке. Значения выходного напряжения ГСС-ЧМ (E_a приемника) и расстройки $\Delta f = f_c - f_0$ занести в табл. 1.10.

Таблица 1.10

Параметры односигнальной избирательности

Модель приёмника	d, раз	d, дБ	f_c , МГц	Δf , МГц	E_a , мкВ
	200	46	67	0	
	100	40			
	20	26			
	10	20			
	2	6			
	1,4	3			
	1	0			
	1,4	3			
	2	6			
	10	20			
	20	26			
	100	40			
	200	46			

Увеличивая сигнал с ГСС-ЧМ согласно таблице 1.10 по сравнению с сигналом при нулевой расстройке, аналогично предыдущему случаю определить соответствующие положительные и отрицательные расстройки частоты сигнала от частоты настройки приемника.

По данным таблицы 1.10 определить крутизну скатов кривой избирательности. Усредненная крутизна скатов выражается в децибелах на килогерц и определяется по формулам:

$$S_n = 20/(f_{n2} - f_{n1}) \quad \text{и} \quad S_g = 20/(f_{g2} - f_{g1}) \quad (1.41, 1.42)$$

где $f_{n1}, f_{n2}, f_{g1}, f_{g2}$ – частоты, соответствующие расстройке генератора соответственно приемника, при которых напряжение на последнем каскаде УПЧ-ЧМ на 6 дБ для f_{n1} и f_{g1} и на 26 дБ для f_{n2} и f_{g2} меньше, чем при точ-

ной настройке ($f_{н1}$ и $f_{н2}$ – частоты меньше частоты настройки приемника, $f_{в1}$ и $f_{в2}$ – частоты больше частоты настройки приемника).

Снятие характеристик по дополнительным каналам приема

Порядок измерений:

1. Перестроить ГСС-ЧМ на частоту дополнительного канала приема согласно таблице 1.11.

2. Увеличивать уровень сигнала с ГСС-ЧМ до тех пор, пока вольтметр постоянного тока не зафиксирует наличие сигнала помехи на электролитическом конденсаторе дробного детектора и медленно перестроить ГСС-ЧМ в области меньших, и больших частот (± 200 кГц) до получения максимального напряжения.

Если помеха не регистрируется, то в табл. 1.11 в соответствующей графе ставить прочерк.

3. Изменяя сигнал с ГСС-ЧМ установить уровень сигнала с выхода УПЧ-ЧМ по вольтметру постоянного тока, соответствующий нулевой расстройке. Результаты измерений занести в табл. 1.11.

Таблица 1.11

Параметры избирательности, обусловленные супергетеродинным способом приема

Канал приема помехи	Частота помех, МГц	E_a , мкВ	d, раз	d, дБ
$f_{пр}$				
$f_o + 2f_{пр}$				
$f_o + 1/2f_{пр}$				

4. Величины d и d (дБ) определить по формулам (1.33) и (1.34).

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется каждым студентом индивидуально и должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) схемы подключения приборов (рис. 1.8);
- 4) таблицы 1.10 и 1.11 с результатами измерений;
- 5) значения крутизны скатов кривой избирательности S_n и S_v , определенные по формулам (1.41, 1.42);
- б) кривые избирательности приемников по данным табл. 1.10.

Контрольные вопросы

1. Опишите методику снятия кривой односигнальной избирательности по каналу приема ЧМ-сигнала.
2. Как с помощью кривой избирательности можно определить полосу пропускания приемника и крутизну скатов?
3. Почему при измерении характеристик избирательности приемников ЧМ-сигналов измерительный прибор подключается не параллельно акустической системе или ее эквиваленту, а к выходу последнего каскада УПЧ?
4. Опишите методику определения избирательности по дополнительным каналам приема.

1.8. Лабораторный практикум. Измерение уровня блокирования и перекрестных помех по каналу приема АМ-сигналов

Цель работы: изучение аппаратуры и методов измерения параметров избирательности, обусловленных взаимодействием сильных помех между собой или с принимаемым сигналом.

К параметрам, обусловленным взаимодействием сильных помех между собой или с принимаемым сигналом относят такие параметры, как коэффициент блокирования, величина перекрестных искажений и степень интерференции между несколькими сигналами, в результате которой возникает новый сигнал, воспринимаемый РПрУ.

Если сильный мешающий сигнал не модулирован, то его влияние сказывается на изменении коэффициента усиления, что приводит к ухудшению реальной чувствительности. Этот эффект оценивается коэффициентом блокирования.

Коэффициент блокирования определяется нелинейностью первых каскадов РПрУ, избирательностью РПрУ по соседнему каналу и построением цепей АРУ. При недостаточной избирательности или в случаях, когда детектор АРУ расположен до основных цепей селекции УПЧ, немодулированная помеха будет влиять на чувствительность не за счет нелинейности первых каскадов, а за счет действия АРУ.

Если сильный мешающий сигнал модулирован, то коэффициент усиления каскада может изменяться в соответствии с законом модуляции мешающего сигнала и, следовательно, полезный сигнал оказывается дополнительно модулированным. В этом случае говорят о *перекрестных искажениях*. Перекрестные искажения особенно заметны тогда, когда частота помехи находится в полосе пропускания избирательных цепей, стоящих до нелинейного элемента.

В последнее время появляются РПрУ с электронной коммутацией, в которых перед первым транзистором нет избирательных цепей. В таком РПрУ частоты помех, вызывающих перекрестные искажения и блокирование, могут далеко отстоять от частоты настройки, а значит, и количество помех, суммарно вызывающих эти явления, будет велико. Таким образом, для оценки РПрУ важен не только уровень перекрестной помехи, но и полоса частот, в которой это явление проявляется.

В транзисторных радиоприёмных устройствах перекрестные искажения в основном определяются нелинейностью базовой цепи транзисторов. Выбирая режим транзистора, глубину обратной связи или значения элементов компенсирующих цепей, можно свести перекрестные искажения до минимума. Однако в массовых моделях приходится учитывать и ряд других факторов, например: требование температурной стабильности, разброс параметров транзисторов, необходимость обеспечения малого коэффициента шума, малого потребления энергии, неточность настройки. Поэтому на практике, как правило, не достигаются теоретически возможные величины перекрестных искажений. Причиной перекрестных искажений могут стать и варикапы, включенные в контуры входных цепей.

Перекрестные искажения пропорциональны квадрату напряжения помехи и не зависят от амплитуды полезного сигнала, если уровень полезного сигнала не превышает порога линейной работы усилительных элементов и АРУ не охватывает первых каскадов РПрУ. Однако это не всегда выполняется, поэтому более правильно измерять перекрестные искажения при слабом полезном сигнале.

Радиоприёмное устройство, тракт которого начинается с апериодического или слабоизбирательного УВЧ, может иметь худшие перекрестные искажения, чем РПрУ без УВЧ, так как в первом случае перекрестные искажения могут возникать как в УВЧ, так и в преобразователе.

Следует заметить, что в преобразователе влияние сильной помехи, как правило, слабее, чем в УВЧ, если амплитуда помехи на входе преобразователя меньше амплитуды гетеродина и в спектре напряжения гетеродина нет составляющих вблизи от основной частоты гетеродина.

В диодных преобразователях частоты перекрестные искажения меньше, поскольку напряжение помехи, приложенное к каждому диоду, в этих схемах меньше, чем в схемах с одним нелинейным элементом, а амплитуда гетеродина может быть значительно больше.

Неоднозначным является вопрос о расстройке помехи, при которой следует измерять перекрестные искажения. Если уменьшать расстройку помехи, то помеха начнет проходить на выход не за счет перекрестных искажений, а за счет неидеальной избирательности по соседнему каналу. Если при измерениях перекрестных искажений находить расстройку, где эти искажения одновременно максимальны и проявляются в явном

виде (исчезают или, по крайней мере, существенно уменьшаются при снятии несущей полезного сигнала), то у различных приемников эти расстройки будут различны из-за зависимости от избирательности, что не позволит сравнить приемники различных моделей по перекрестным искажениям.

Таким образом, если во всех случаях применять одну и ту же расстройку, например ± 18 кГц, то в некоторых случаях измеряться будут не перекрестные искажения, а двухсигнальная избирательность. При значительном увеличении расстройки, например до $+\frac{1}{2}f_{\text{пр}}$, можно выйти на помеху, обусловленную супергетеродинным способом приема.

Поэтому, согласно ГОСТ 9783-89, измеряются переходные искажения с указанием расстройки, соответствующей их максимальному проявлению, а также полоса частот, в которой проявляется действие перекрестной помехи.

Описание лабораторного стенда

Для выполнения работы необходимы следующие приборы и устройства:

- 1) два высокочастотных генератора стандартных сигналов с АМ, (ГСС-АМ-1 и ГСС-АМ-2);
- 2) электронный частотомер (ЭЧ);
- 3) вольтметр переменного тока (ВПТ);
- 4) эквивалент антенны для подключения двух ГСС-АМ (ЭА);
- 5) испытуемое РПрУ.

Схема подключения приборов для выполнения лабораторной работы приведена на рис. 1.9.

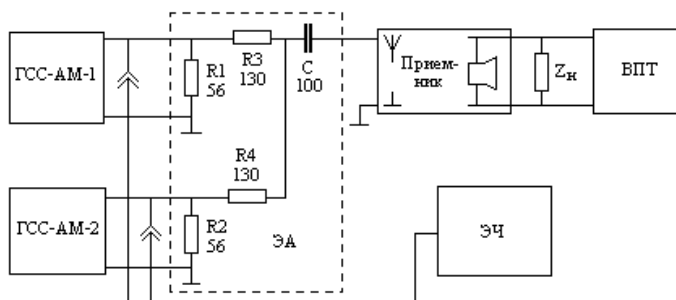


Рис. 1.9. Схема подключения приборов

Характеристики измерительных приборов должны соответствовать ГОСТ 9783-89

Измерение уровня блокирования

Порядок измерений:

1. Подключить приборы к исследуемому приемнику согласно схеме (рис. 1.9).
2. Подать на вход приемника полезный модулированный сигнал от ГСС-АМ-1 (ГСС-АМ-2 в это время должен быть выключен). Напряжение сигнала должно соответствовать реальной чувствительности приемника (300 мкВ), модуляция внутренняя – 1000 Гц, уровень модуляции – 30 %. Частоту сигнала, согласно табл. 1.12, установить равной 250 кГц.
3. Настроить РПрУ на частоту ГСС-АМ-1 по максимуму напряжения на выходе и регулятором громкости установить на выходе приемника напряжение, соответствующее стандартной выходной мощности (0,45 В).
4. Включить ГСС-АМ-2 и подать от него на вход РПрУ немодулированную помеху, напряжением соответствующую реальной чувствительности (300 мкВ). Частоты помехи устанавливать согласно табл. 2.12 для расстроек $+9, \pm 18$ кГц.
5. Увеличивать уровень мешающего сигнала до тех пор, пока напряжение на выходе, достигнутое при подаче полезного сигнала, не уменьшится на 3 дБ (до 0,3 В). Результатом измерения является уровень мешающего немодулированного сигнала U_3 с ГСС-АМ-2.

Таблица 1.12

Уровень блокирования

Диапазон	f_0 , кГц	$\pm \Delta f$, кГц	$f_{мс}$, кГц	U_3 , мВ
ДВ	250	+9	259	
		-9	241	
		+18	268	
		-18	232	
СВ	560	+9	569	
		-9	551	
		+18	578	
		-18	542	
	1400	+9	1409	
		-9	1391	
		+18	1418	
		-18	1382	

6. Повторить пункты 2–5 для $f_0 = 560, 1400$ кГц согласно табл. 1.12.

Измерение частоты, уровня и полосы воздействия перекрёстной помехи

Порядок измерений:

1. Отключить ГСС-АМ-2 от входа РПрУ (от двухсигнального эквивалента антенны).

2. Подать на вход РПрУ от ГСС-АМ-1 модулированный сигнал частотой 250 кГц, напряжение сигнала установить равным удвоенному значению реальной чувствительности РПрУ (600 мкВ). Подстроить РПрУ на частоту ГСС-АМ-1 по максимуму напряжения на выходе и регулятором громкости установить на выходе РПрУ напряжение, соответствующее стандартной выходной мощности (0,45 В). Выключить модуляцию полезного сигнала.

3. Установить частоту мешающего сигнала (помехи) от ГСС-АМ-2 268 кГц ($+4f$), напряжение $3 \cdot 10^5$ мкВ, внутренняя модуляция частотой 1000 Гц, уровень модуляции 30 % и подключить ГСС-АМ-2 ко входу приемника (через двухсигнальный эквивалент антенны).

4. Медленно увеличивая частоту мешающего сигнала от ГСС-АМ-2, по максимуму напряжения на выходе РПрУ, найти частоту наибольшего воздействия мешающего сигнала (перекрёстной помехи). Значение частоты наибольшего воздействия перекрёстной помехи ($f_{пер пом}$) занести в табл. 1.13.

5. Изменяя уровень напряжения мешающего сигнала с ГСС-АМ-2, установить на выходе приемника напряжение на 20 дБ (в 10 раз) меньше напряжения, соответствующего стандартной выходной мощности. Величину напряжения с ГСС-АМ-2 (уровень перекрёстной помехи) занести в табл. 1.13.

Таблица 1.13

Уровни перекрёстной помехи

Диа-пазон	f_0 , кГц	$\pm \Delta f$	$f_{пер пом}$, кГц	$U_{пер пом}$, мВ	$f'_{пер пом}$, кГц	$f''_{пер пом}$, кГц	$\Delta f_{пер пом}$, кГц
ДВ	250	+ Δf					
		- Δf					
СВ	560	+ Δf					
		- Δf					
	1400	+ Δf					
		- Δf					

6. Медленно изменяя частоту ГСС-АМ-2 в обе стороны относительно $f_{\text{пер пом}}$ до тех пор, пока напряжение на выходе РПрУ не уменьшится на 6 дБ (в 2 раза), определить нижнюю ($f'_{\text{пер пом}}$) и верхнюю ($f''_{\text{пер пом}}$) границы полосы воздействия перекрестной помехи. Результаты измерения занести в табл. 1.13.

Ширину полосы воздействия перекрестной помехи определить по формуле

$$\Delta f_{\text{пер пом}} = f''_{\text{пер пом}} - f'_{\text{пер пом}} \quad (1.43)$$

Значение $\Delta f_{\text{пер пом}}$ занести в табл. 1.13.

7. Установить частоту мешающего сигнала от ГСС-АМ-2 232 кГц ($- \Delta f$), остальные параметры мешающего сигнала (перекрестной помехи) те же, что и в пункте 4. Медленно изменяя частоту мешающего сигнала, отыскать частоту наибольшего воздействия перекрестной помехи для отрицательной расстройки ГСС-АМ-2.

8. Повторить пункты 5, 6 настоящего раздела.

9. Определить частоту наибольшего воздействия, уровень и полосу воздействия перекрестной помехи для частот настройки приемника $f_0 = 560$ и 1400 кГц по методике пунктов 1 – 8 настоящего раздела. Результаты измерений занести в табл. 1.13.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) схему подключения приборов для измерения уровня блокирования и характеристик перекрестной помехи;
- 4) таблицы 1.12 и 1.13 с результатами измерений;
- 5) краткие выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. На какие три группы можно разделить параметры избирательно-сти радиовещательных приёмников?
2. Как проявляется влияние мешающего немодулированного сигнала на работу радиоприемника?
3. Какими способами можно увеличить уровень блокирования РПрУ?
4. Как проявляется действие модулированной помехи, частота которой не совпадает с основными и дополнительными каналами РПрУ?
5. Какими параметрами оценивается влияние перекрестной помехи на работу РПрУ?

6. Как можно уменьшить величину перекрестных искажений в радиовещательных приемниках?

1.9. Частотные характеристики

Частотная характеристика со входа усилителя низкой частоты определяется свойствами как акустической системы, так и усилителя низкой частоты. Обычно диапазон частот усилителя низкой частоты шире диапазона частот громкоговорителя. В некоторых случаях, особенно в малогабаритных радиоприёмниках, частотная характеристика усилителя имеет подъёмы или спады, специально создаваемые для компенсации неравномерности частотной характеристики громкоговорителей.

Рассмотрим, какие элементы схемы транзисторного усилителя низкой частоты определяют его частотную характеристику. В реостатном транзисторном каскаде завал частотной характеристики в области верхних частот определяется значениями ёмкости база-эмиттер и коллекторной ёмкостью. Для расширения характеристики в области верхних частот либо уменьшают сопротивление на входе и выходе реостатного каскада, либо выбирают более высокочастотный транзистор, имеющий меньшие величины указанных ёмкостей. В области нижних частот определяющими являются величины разделительных и блокировочных конденсаторов. Чем они больше, тем шире частотная характеристика в области нижних частот.

В трансформаторном каскаде завал частотной характеристики в области верхних частот определяется индуктивностью рассеяния. Для уменьшения последней применяют секционирование обмоток или выбирают магнитный материал с более высокой магнитной проницаемостью. В области низких частот ход частотной характеристики определяет значение индуктивности первичной обмотки трансформатора. Для расширения частотной характеристики необходимо увеличить индуктивность трансформатора, что связано с увеличением размеров и массы. Частично по этой причине, но, главное, в связи с широким использованием полупроводниковых ИС в подавляющем большинстве бытовой радиоаппаратуры применяются бестрансформаторные усилители.

Частотная характеристика в таких усилителях оказывается часто излишне широкой. Диапазон усиливаемых частот простирается иногда до 100 кГц и более, что приводит к нежелательным последствиям. Отрицательный эффект проявляется тогда, когда усиливаемый звуковой сигнал подвергается ограничению и образующиеся в этом случае гармоники усиливаются, излучаются и воспринимаются входными цепями приёмника, создавая эффект генерации. Иногда такой усилитель усиливает и излучает остаточное напряжение промежуточной частоты или гетеродина тракта АМ-сигналов, или поднесущей частоты (пилат-тона)

стереотракта. В этом случае либо наступает генерация, либо появляются нелинейные искажения, вызываемые интерференцией гармоник звуковой и поднесущей частот. Чем мощнее усилитель, тем больше опасность генерации при работе с приёмником при близком их расположении. Для борьбы с этим эффектом вводятся нормы на подавление надтональных составляющих на выходе детектора; стремятся оптимально распределить усиление в тракте, исключая возможность глубокого ограничения; предпринимают меры для уменьшения длины излучающих проводов. Так, в некоторых моделях высококачественных мощных усилителей низкой частоты применены специальные охлаждающие трубки, позволяющие пространственно разъединить выходные транзисторы и их радиаторы, что уменьшает длину проводов в выходном каскаде.

В последнее время всё большее распространение получают частотные корректоры. Их задача – скомпенсировать дефекты прослушиваемой программы, громкоговорителя или помещения, где происходит прослушивание. К таким частотным корректорам, прежде всего, относятся регуляторы тембра, создающие плавные подъёмы и спады частотной характеристики.

В последнее время в схему усилителя низкой частоты иногда вводится коррекция в виде так называемого “presence – фильтра” (фильтра присутствия). Специальная цепочка осуществляет подъём частотной характеристики в области средних частот (от 1000 до 3000 Гц) на 4 – 6 дБ. В высококачественном приёмнике такой подъём усиливает впечатление присутствия и является дополнительной окраской звучания.

Ещё одной целью введения специальных коррекций частотной характеристики является введение в схему фильтров низкой и высокой частот, создающих резкий спад частотной характеристики. При этом обеспечивается эффективное подавление составляющих фона и шумов в той части диапазона, где отсутствуют составляющие полезного сигнала. Оптимальной нагрузкой спада является величина 12 дБ на октаву. Фильтры такого рода могут быть переключаемыми, что позволяет выбрать ширину диапазона воспроизводимых частот в соответствии с качеством воспроизводимой программы.

Применяются и многополосные (до 5 полос) регуляторы, позволяющие сформировать желаемую частотную характеристику, создавая подъёмы или спады в любой части диапазона звуковых карт.

Для комплектования высококачественных звуковых систем частотные корректоры (в основном многополосные) выпускаются в виде самостоятельных, называемых эквалайзерами.

Основным измерением частотной характеристики является измерение при нормальном положении регуляторов тембра, при котором проверяется диапазон воспроизводимых частот либо неравномерность частотной характеристики. Все изменения частотной характеристики

должны изменяться от нормального положения. Это требование исключает возможность выполнения норм по частотной характеристике при крайних положениях регуляторов тембра, не оставляя запасов на регулировку для потребителя.

Требования к нормальному положению регуляторов тембра должны устанавливаться до начала всех испытаний, исходя из характеристик громкоговорителя.

При измерениях частотных характеристик со входов корректирующих усилителей или с применением эквивалентов, специально искажающих частотную характеристику, например, эквивалента пьезокерамического звукоснимателя, требуемая частотная характеристика должна быть задана в соответствующем виде, отличном от линейного.

1.10. Лабораторный практикум. Измерение и анализ частотных характеристик приёмников

Цель работы: изучение методики и аппаратуры для измерения частотных характеристик радиоприемных устройств со входа усилителя низкой частоты и с антенного входа радиоприёмника, определение зависимостей между частотными характеристиками отдельных каскадов и кривой верности.

Частотную характеристику приёмника по всему тракту называют *кривой верности*, или *верностью воспроизведения*. Кривая верности в диапазоне УКВ является основным параметром, определяющим уровень линейных искажений современного высококачественного приёмника, поскольку именно диапазон УКВ обеспечивает высокое качество приёма музыкальных передач. Обычно ширина диапазона воспроизводимых частот в диапазоне УКВ в области высоких частот определяется необходимостью давления составляющих пилот-тона или поднесущей частоты. Практически дополнительные линейные искажения закона модуляции могут возникнуть только в частотном детекторе. Появляются они тогда, когда с увеличением звуковой частоты изменяются фазовые сдвиги между напряжениями на обмотках фазовращающего трансформатора, т.е. происходит его рассимметрирование. Завал верхних частот может объясняться и неправильным выбором элементов фильтров детекторной цепи. Принципиально линейные искажения могут создавать системы АПЧ, бесшумной настройки и подавления боковых настроек. В области низких частот кривая верности в диапазоне УКВ определяется в основном трактом УНЧ. В стереорежиме дополнительные линейные искажения может создавать стереодекодер. Диапазон воспроизводимых частот в диапазоне УКВ современных радиовещательных приёмников колеблется от 150–700 Гц в 3-м классе до 40–15 000 Гц в высшем классе.

Завал верхних частот кривой верности в диапазонах приёма сигналов с амплитудной модуляцией определяется целиком полосой пропускания трактов УВЧ – УПЧ приёмника. Известно, что верхняя граничная частота полосы пропускания в этом случае приблизительно равна половине полосы пропускания приёмника по высокой частоте. Поэтому диапазон воспроизводимых частот является компромиссным параметром по отношению к селективности по соседнему каналу. Если в диапазонах СВ и КВ полоса пропускания определяется только трактом УПЧ, то в диапазоне ДВ полоса пропускания может быть уже из-за влияния входных цепей.

Дополнительно линейные искажения могут возникнуть из-за неравномерности частотной характеристики в полосе пропускания УПЧ. Эти искажения чаще всего возникают при применении пьезокерамических фильтров. В технических условиях на фильтры обычно оговаривается неравномерность частотной характеристики. Эта неравномерность должна быть не более 4 дБ.

Некоторое расширение диапазона воспроизводимых частот ощущается, если незначительно расстроить приёмник. В этом случае одна из боковых полос большей своей частью попадает в полосу пропускания приёмника. Тем не менее существенного улучшения качества звучания таким способом добиться нельзя, так как при расстройке приёмника увеличивается уровень нелинейных искажений.

В транзисторных приёмниках степень линейных искажений может увеличиваться с ростом необходимого постоянства значений напряжений на зажимах транзисторов. Увеличение напряжений приводит к изменению параметров транзисторов и, следовательно, к расстройке контуров.

С другой стороны при слабых входных сигналах также могут увеличиваться линейные искажения. Возникают они тогда, когда усилитель промежуточной частоты находится в режиме подвозбуждения. При увеличении сигнала подвозбуждение обычно исчезает.

Частотные характеристики по тракту сигналов с АМ желательно снимать во всех положениях регуляторов полосы: узкая полоса, широкая полоса и местный приём.

Если в положениях узкая полоса и широкая полоса верхние частоты кривой верности ограничиваются требованиями селективности и составляют 3 – 5 кГц, то в положении местный приём желательно обеспечить воспроизведение частот до 10 кГц, поскольку многие передатчики в диапазонах с АМ излучают эти частоты.

Большое влияние на степень линейных искажений оказывает построение системы АРУ. Её постоянная времени выбирается как компромисс между необходимостью быстро реагировать на изменения входного сигнала и недопустимостью демодуляции низкочастотных

составляющих закона модуляции. Поэтому система АРУ иногда является «виновником» спада низких частот.

Необходимо отметить, что в диапазонах ДВ и СВ особое значение приобретает частотная характеристика по электрическому напряжению. Эта характеристика очень легко определяется и в то же время несёт информацию о качестве настройки контуров в приёмнике. Поэтому величину неравномерности частотной характеристики по электрическому напряжению в диапазонах ДВ и СВ целесообразно включать в перечень параметров, контролируемых у 100% приёмников. При этом достаточно измерить граничную частоту пропускания на уровне 6 или 3 дБ.

Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд содержит:

1. Исследуемое РПрУ (AR8600).
2. Генератор ВЧ с АМ (KEYSIGHT 33210A).
3. Генератор НЧ (KEYSIGHT 33210A).
4. Эквивалент антенны (встроен в РПрУ).
5. Эквивалент нагрузки (встроен в РПрУ).
6. Вольтметр переменного тока (ВЗ–38).

Кроме того, радиола имеет дополнительные типовые гнезда для подключения ВЗ–38 к эквиваленту нагрузки и для подключения генератора НЧ ко входу УНЧ РПрУ (звукоснимателю параллельны типовые гнезда).

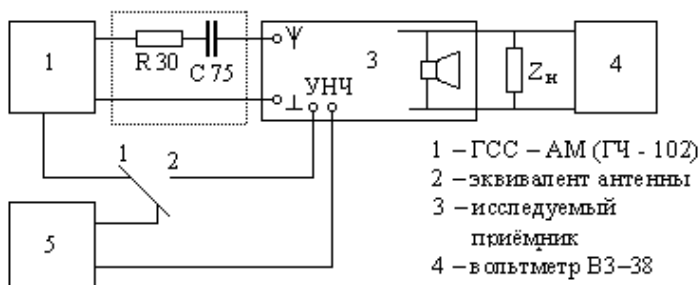


Рис. 1.10. Схема подключения приборов

Измерение частотных характеристик со входа усилителя низкой частоты

Порядок измерений:

1. Собрать стенд по схеме рис.1.10, выход генератора НЧ (5) в положении 2 (на вход УНЧ).

2. Установить регулятор громкости радиолы в положение, соответствующее максимальному усилению, регулятор тембра – в среднее положение.

3. Подать на вход УНЧ РПрУ сигнал частотой 1000 Гц, величина сигнала должна соответствовать паспортной чувствительности УНЧ (250 мВ).

Регулятором громкости установить напряжение на нагрузке соответствующее нормальной выходной мощности:

$$P_{\text{норм}} = 0,1 \cdot P_{\text{норм}} = 0,1 \cdot 4 = 0,4 \text{ В}; \quad (1.44)$$

$$U_{\text{норм}} = \sqrt{P_{\text{норм}} \cdot Z} = 1,3 \text{ В}. \quad (1.45)$$

Определить диапазон воспроизводимых частот. Для этого изменить частоту сигнала с ГЗ–102 до тех пор, пока напряжение на выходе не выйдет за пределы установленных норм (0,9 В). Частоты F_v и F_n соответствующие выходному напряжению 0,9 В, определяют границы диапазона воспроизводимых частот.

4. Снять амплитудно-частотную характеристику (АХЧ) УНЧ для установленного выше положения регуляторов тембра, для крайних левых положений и для крайних правых положений. Результаты измерений занести в табл. 1.14.

Таблица 1.14

Данные для построения АЧХ УНЧ

Положение регулировок тембра	Выходное напряжение ($U_{\text{вых}}$, В)									
	При частоте сигнала (F , кГц)									
	0,05	0,1	0,2	0,4	1,0	2,0	5,0	10,0	15,0	20,0
“среднее ”										
“левое ”										
“правое ”										

Измерение частотных характеристик с антенного входа

Порядок измерений:

1. Переключить выход генератора НЧ со входа УНЧ радиолы на вход внешней модуляции генератора ГЧ–102.

2. Регулятор громкости радиолы установить в положение максимального усиления, регулятор тембров – в среднем положении, диапазон ДВ.

3. Подать на антенный вход приёмника сигнал ГСС–АМ частотой 150 кГц, амплитудой, соответствующей паспортной реальной чувствительности. Частота модуляции сигнала – 1000 Гц, глубина модуляции сигнала – 30% (не забыть выставить индикатор глубины модуляции на риску “К”, регулируя выход генератора НЧ).

4. Ручкой настройки радиолы настроить приёмник на частоту генератора (150 кГц или 2000 м) по максимуму напряжения на эквиваленте нагрузки (максимальному отклонению стрелки вольтметра ВЗ–38).

5. Регулятором громкости установить напряжение на нагрузке, соответствующее нормальной выходной мощности (0,63 В).

6. Изменяя частоту модуляции ГСС–АМ (т.е. изменяя частоту генератора НЧ), снять АЧХ приёмника по всему тракту. При измерении на забывая регулировкой выхода генератора НЧ поддерживать индикатор глубины модуляции ГЧ–102 на риске “К”. Результаты измерений занести в табл. 1.15.

7. Установить на ГСС-АМ (ГЧ-102) частоту сигнала 280 кГц, 1000 кГц и повторить п. 3, 4, 5, 6.

Таблица 1.15

Данные для построения кривой верности

Частота настройки приёмника, f_0 , кГц	Выходное напряжение ($U_{\text{вых}}$, В)									
	При частоте модуляции ($F_{\text{мод}}$, кГц)									
f_0 , кГц	0,05	0,1	0,2	0,4	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	10,0
150										
280										
560										
1500										

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) схемы подключения приборов для снятия частотных характеристик приёмно–усилительной аппаратуры;
- 4) диапазон воспроизводимых частот УНЧ (верхнее F_v , нижнее F_n значение частоты генератора НЧ соответствуют спаду АЧХ на 3 дБ, $U_{\text{вых}} = 0,9$ В);

- 5) таблицы 1.14 и 1.15 с результатами измерений;
- 6) графики зависимости выходного напряжения от частоты сигнала на входе УНЧ и от частоты модулирующего НЧ колебания, построенные в логарифмическом масштабе:

$$U_{\text{вых}} = f(4 \cdot \lg F); \quad (1.46)$$

$$U_{\text{вых}} = f(4 \cdot \lg F_{\text{мод}}), \quad (1.47)$$

где $\lg F$ ($\lg F_{\text{мод}}$) множится на 4 и откладывается в мм по оси абсцисс. Все кривые должны быть расположены в одной системе координат (на одном рисунке);

- 7) краткие выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое частотные искажения?
2. Что такое нелинейные искажения?
3. Что такое кривая верности?
4. Чем определяется частотная характеристика со входа УНЧ?
5. Какими каскадами приёмника АМ-сигнала определяется завал АХЧ приёмника с антенного входа в области верхних частот?
6. Из-за чего возникают дополнительные линейные искажения?
7. Какие параметры приёмника АМ-сигнала ухудшаются, если увеличить верхнюю воспроизводимую частоту на выходе УНЧ?

2. ПРОХОЖДЕНИЕ МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЧЕРЕЗ ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

2.1. Прохождение АМ колебания через частотно-избирательные цепи

Практикум. Расчёт параметров последовательного резонансного контура

Исследование производится для случая, когда модулирующее напряжение синусоидально. Мгновенное значение модулированного напряжения может быть выражено так:

$$\begin{aligned} u(t) = U_m [1 + m \sin(\Omega t + \gamma)] \sin(\omega t + \psi) = \\ U_m \sin(\omega t + \psi) + \frac{mU_m}{2} \cos[(\omega + \Omega)t + \psi + \gamma] + \\ + \frac{mU_m}{2} \cos[(\omega - \Omega)t + \psi - \gamma], \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $m = \Delta U_m / U_m$ – коэффициент модуляции напряжения; U_m и ΔU_m – амплитуда и максимальное изменение амплитуды высокочастотного напряжения; ω , Ω и ψ , γ – круговые частоты и начальные фазы высокочастотного и низкочастотного напряжений.

Из полученных выражений следует, спектр АМ напряжения состоит из трёх высокочастотных составляющих: несущей частоты ω и двух боковых частот $\omega + \Omega$ и $\omega - \Omega$, симметрично расположенных относительно несущей. Амплитуды напряжений боковых частот одинаковы и равны $U_o = mU_m / 2$.

Фазы напряжений боковых частот симметричны относительно фазы несущего напряжения; в момент $t = 0$ одно напряжение боковой частоты отстаёт на угол γ , другое – на этот же угол опережает напряжение несущей частоты. Следовательно, АМ-сигналу свойствен закон симметрии в отношении частот, амплитуд и фаз. При нарушении этой симметрии в АМ-сигнале возникают искажения формы огибающей.

При прохождении последовательного колебательного контура составляющие АМ-колебания претерпевают изменения по амплитуде и по фазе. Это связано с зависимостью комплексного коэффициента передачи контура по напряжению K от частоты ω :

$$K = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \quad (2.2)$$

$$K(\omega) = \frac{K_p}{\sqrt{1 + (2Q\Delta\omega / \omega_p)^2}}, \quad (2.3)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg(2Q\Delta\omega / \omega_p) + \varphi_0. \quad (2.4)$$

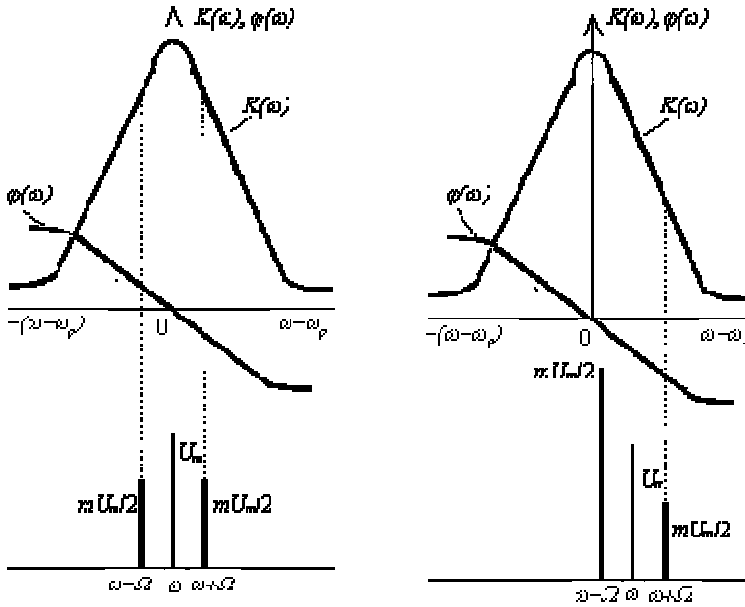


Рис. 2.1. Зависимость модуля $K(\omega)$ и фазы $\varphi(\omega)$ коэффициента передачи контура от частоты. Спектры АМ напряжения при $\omega = \omega_p$ (а) и $\omega \neq \omega_p$ (б)

На рисунке 2.1 изображены зависимости модуля $K(\omega)$ и фазы $\varphi(\omega)$ коэффициента передачи последовательного контура от частоты ω , построенные по формулам (2.3) и (2.4).

При подаче на вход контура напряжения $u(t)$ с несущей частотой ω , равной резонансной частоте ω_p (рис. 2.1, а), амплитуды напряжений боковых частот $\omega_p \pm \Omega$ будут одинаково ослаблены по отношению к несущей в соответствии (2.3) на величину коэффициента ослабления

$$K(\omega_p \pm \Omega) / K_p = 1 / \sqrt{1 + (2Q\Omega / \omega_p)^2}. \quad (2.5)$$

Здесь $K(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ – модуль и фаза комплексного коэффициента передачи;

K_p – резонансное значение коэффициента передачи, равное добротности контура Q ;

$\Delta\omega/\omega_p = (\omega - \omega_p)/\omega_p$ – относительная расстройка контура;

ω_p – резонансная частота;

φ_0 – постоянный фазовый сдвиг, которым в дальнейшем пренебрегаем для упрощения задачи.

Из формулы (2.5) следует, что для боковых частот коэффициент передачи контура в $\sqrt{1 + (2Q\Omega/\omega_p)^2}$ раз меньше коэффициента передачи для несущей частоты.

Кроме того, напряжения боковых частот получают дополнительные сдвиги фаз относительно напряжения несущей частоты на величину

$$\varphi(\omega_p \pm \Omega) = -\arctg(2Q\Omega/\omega_p). \quad (2.6)$$

Мгновенное значение АМ напряжения на выходе настроенного контура, на основании (5.1–5.4), записывается в виде:

$$U_{\text{вых}}(t) = QU_m [1 + m' \sin(\Omega t + \gamma + \varphi)] \cdot \sin(\omega t + \psi), \quad (2.7)$$

где $m' = m/\sqrt{1 + (2Q\Omega/\omega_p)^2}$ – коэффициент модуляции АМ напряжения на выходе контура.

Из сравнения (2.1) и (2.7) следует, что дополнительные, одинаковые по величине, но разные по знаку сдвиги фаз напряжений боковых частот относительно напряжения несущей частоты вызывают только сдвиг фазы, огибающей входное напряжение по отношению к выходному, что не имеет особого практического значения. Однако изменение соотношения амплитуд напряжений боковых и несущей частот приводит к уменьшению коэффициента модуляции на величину

$$D = m'/m. \quad (2.8)$$

Величина D – фактор демодуляции, характеризующий степень уменьшения коэффициента модуляции АМ напряжения на выходе контура. Из соотношения коэффициента модуляции АМ напряжения на выходе контура, а также на рис. 2.1, а видно, что уменьшение коэффициента модуляции будет тем больше, чем больше добротность Q и чем выше частота модуляции Ω .

Из выражения (2.7) следует, что при прохождении через настроенный контур симметрия амплитуд и фаз не нарушается, поэтому искажений формы огибающей АМ напряжения не происходит, а имеются лишь частные искажения входного АМ напряжения.

При расстройке контура относительно несущей частоты $\omega \neq \omega_p$ напряжения боковых частот получают изменения амплитуды и разные величины дополнительных фазовых сдвигов (рис. 2.1б). Закон симметрии при этом нарушается, и, кроме изменения коэффициента модуляции, возникают искажения формы огибающей АМ напряжения – она становится отличной от синусоидальной. Это приводит к возникновению нелинейных искажений управляющего сигнала после детектирования (появлению новых частот модуляции).

При расстроенном контуре возможно как уменьшение, так и увеличение коэффициента модуляции – в зависимости от степени расстройки контура и частоты управляющего сигнала (рис. 2.1, б).

Все вышеприведённые рассуждения справедливы для выходного напряжения контура, снимаемого с любого из реактивных элементов (L и C), только при достаточно большой добротности ($Q > 10$) и при малых расстройках.

Цель работы: практический расчёт элементов последовательного резонансного контура.

Для заданного в табл. 2.1 АМК и резонансного контура определить глубину модуляции M' и фактор демодуляции D для частот модуляции $F = 1F_0, 2 F_0, 5F_0$. Определить параметры RLC цепи по формулам:

$$L = \frac{\delta}{2\pi f_p}; C = \frac{1}{2\pi f_p \delta}; R = \frac{\delta}{Q}. \quad (2.9)$$

Таблица 2.1

Параметры АМК и резонансного контура

№ варианта	Несущая частота, f_0 , кГц	Частота модуляции, F_0 , кГц	Коэффициент модуляции, M	Резонансная частота контура, f_p , кГц	Характеристика сопротивления, δ , Ом	Добротность контура, Q
1	2	3	4	5	6	7
1	51	1,2	0,9	51	500	50
2	54	2	0,8	54	600	60
3	56	1,5	0,7	56	400	40
4	58	1,3	0,8	58	300	50
5	50	1,4	0,9	50	1000	50
6	53	1,6	0,7	53	700	70
7	55	1,7	0,8	55	400	80

1	2	3	4	5	6	7
8	57	1,8	0,9	57	300	60
9	50	1,4	0,8	50	1200	80
10	52	1,1	0,7	52	900	90
11	55	1,5	0,8	55	750	75
12	59	1,6	0,9	59	600	50
13	60	1,9	0,8	60	800	40
14	52	1,3	0,9	52	800	80
15	55	1,8	0,7	55	1200	60
16	47	1,7	0,8	47	750	75
17	40	1,5	0,9	40	1000	50
18	43	1,9	0,7	43	900	60
19	45	1,2	0,9	45	850	85
20	48	1,6	0,8	48	600	60

Содержание отчета

Отчёт по должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) данные варианта и рабочую схему для исследования прохождения АМК через RLC-колебательный контур;
- 4) описание, последовательности выполнения работы, с результатами в текстовой и табличной формах;
- 5) ответы на контрольные вопросы;
- 6) выводы, по результатам выполнения работы.

Контрольные вопросы

1. Перечислите параметры колебательного контура.
2. Перечислите параметры АМК.
3. Как влияет добротность колебательного контура на полосу пропускания?
4. Что такое АЧХ, резонансная частота, полоса пропускания, частоты среза и крутизна спада колебательного контура.
5. В каких узлах радиоприёмных устройств применяют колебательные контуры и с какой целью?

2.2. Описание программного пакета NI Multisim

Разработка любого радиоэлектронного устройства включает физическое или математическое моделирование. Физическое моделирование связано с большими материальными затратами, так как требует изготовление макетов и их трудоемкое исследование и иногда просто невозможно из-за сложности радиоэлектронного устройства. В этом случае прибегают к математическому моделированию с использованием средств и методов вычислительной техники [1].

NI Multisim – это программный пакет (рис. 1), позволяющий моделировать электронные схемы и разводить печатные платы. Главная особенность NI Multisim [2] – простой и наглядный интерфейс, мощные средства графического анализа результатов моделирования, наличие виртуальных измерительных приборов, копирующих реальные аналоги. Библиотека элементов содержит более 2000 SPICE-моделей компонентов National Semiconductor, Analog Devices, Phillips, NXP и других производителей. Присутствуют электромеханические модели, импульсные источники питания, преобразователи мощности.

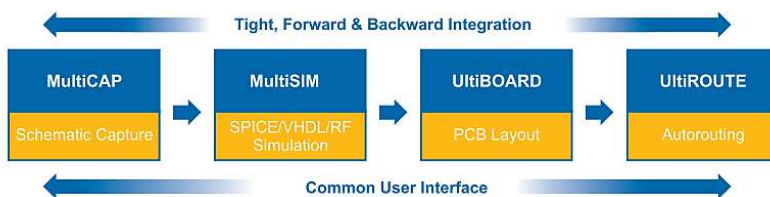


Рис. 2.2. Взаимосвязь программного обеспечения в NI Multisim

MultiCAP – средство создания и описания электрических схем. Программа включает безрежимное редактирование, имеет удобные средства взаимодействия с другими программными продуктами и обширную базу данных.

Multisim – интерактивный эмулятор схем, осуществляющий моделирование и анализ аналоговых и цифровых электрических цепей.

UltiBOARD – программное средство для размещения электрорадиоэлементов и разводки электрических соединений между компонентами.

Ultiroute – программное средство для автоматического размещения и соединения большого количества компонентов на печатной плате.

Мультиметр

Мультиметр (рис. 2.3) предназначен для измерения переменного или постоянного тока или напряжения, сопротивления или затухания

между двумя узлами схемы. Диапазон измерений мультиметра задается автоматически. Его внутреннее сопротивление и ток близки к идеальным значениям, но их можно изменить.

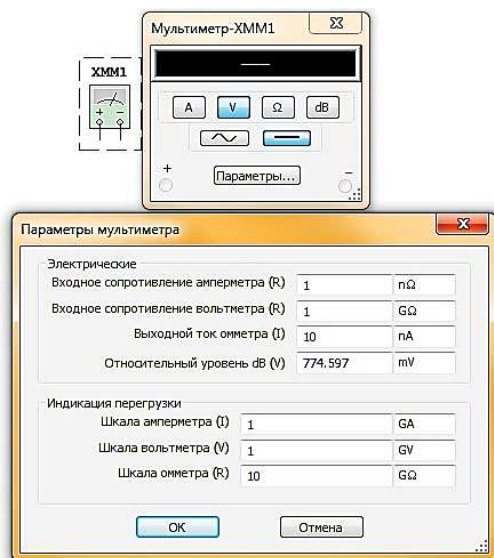


Рис. 2.3. Окно мультиметра

Осциллограф

Осциллограф (рис. 2.4) имеет два канала (CHANNEL) А и В (в случае двухканального осциллографа; в арсенале приборов Multisim имеется также и 4-х канальный осциллограф, а также виртуальный осциллограф фирмы Agilent) с отдельной регулировкой чувствительности в диапазоне от 10 мкВ/дел (mV/Div) до 5 кВ/дел (kV/Div) и регулировкой смещения по вертикали (YPOS). При этом каждый канал имеет два вывода обозначенные как «+» и «-». Подавая сигнал на один из выводов, другой целесообразно заземлять.

Выбор режима по входу осуществляется нажатием кнопок AC, 0, DC. Режим AC предназначен для наблюдения только сигналов переменного тока (его еще называют режимом «закрытого входа», поскольку в этом режиме на входе усилителя включается разделительный конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую). В режиме 0 входной зажим замыкается на землю. В режиме DC (включен по умолчанию) можно проводить осциллографические измерения как постоянного, так и переменного тока. Этот режим еще называют режимом «открытого входа», поскольку входной сигнал поступает на вход верти-

кального усилителя непосредственно. С правой стороны от кнопки DC расположен входной зажим.

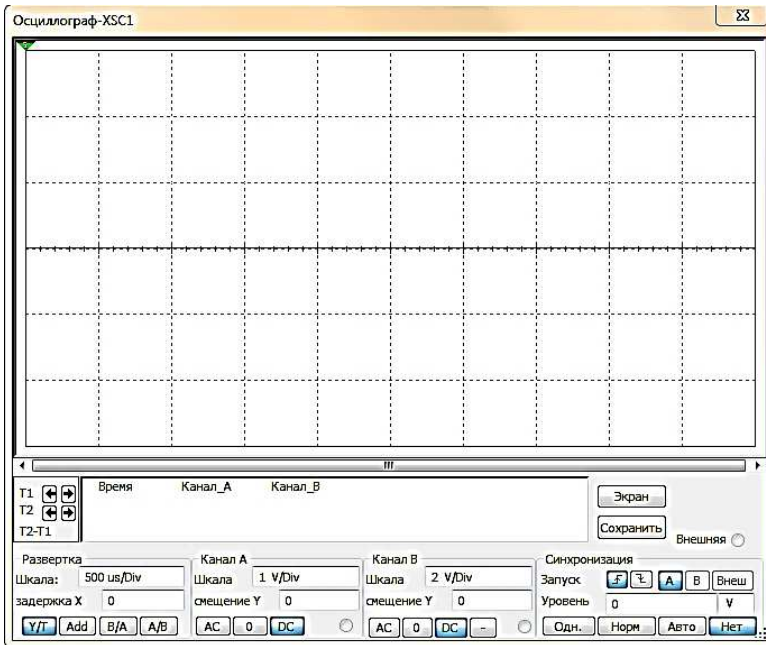


Рис. 2.4. Окно осциллографа

Режим развертки выбирается кнопками Y/T, B/A, A/B. В режиме Y/T (обычный режим, включен по умолчанию) реализуются следующие режимы развертки:

- по вертикали – напряжение сигнала, по горизонтали,
- время; в режиме B/A: по вертикали – сигнал канала B, по горизонтали,
- сигнал канала A; в режиме A/B: по вертикали – сигнал канала A, по горизонтали – сигнал канала B.

Анализатор спектра

Описание элементов управления и настройки прибора (рис.2.5)
Анализатор спектра:

а) *Управление частотой.*

Режим «Узкополосный» – спектральный анализ сигнала с максимальным разрешением.

Режим «**Весь диапазон**» – спектральный анализ сигнала в пределах полосы частот, реализуемой программным пакетом.

Режим «**Установить**» – ручная установка границ спектрального анализа.

Кнопка **Ввод** – применение введённых значений.

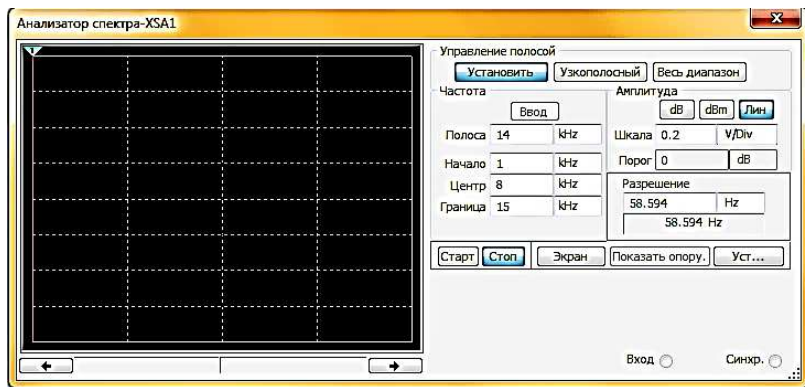


Рис.2.5. Окно Анализатора спектра

б) *Частота.*

Полоса – полоса анализируемого спектра,

Начало – начальная частота анализа,

Центр – частота, отображаемая в центре рабочего окна,

Граница – конечная частота анализа.

в) *Амплитуда.*

Установка единиц отображения амплитуды и цены деления.

г) *Разрешение.*

Установка минимального шага анализа. Отображение достигнутого шага анализа при моделировании.

д) *Общие настройки и управление.*

Старт – запуск процесса спектрального анализа сигнала,

Стоп – остановка процесса спектрального анализа сигнала,

Уст... – установки (**рекомендуется установить число точек FFT – 32768**). FFT – Быстрое преобразование Фурье.

4. Анализ «Фурье»

Измерительный пробник

Измерительный пробник (рис.2.6) показывает постоянные (dc) и переменные (ac) напряжения (V) и токи (I) на участке цепи, а также частоту сигнала.

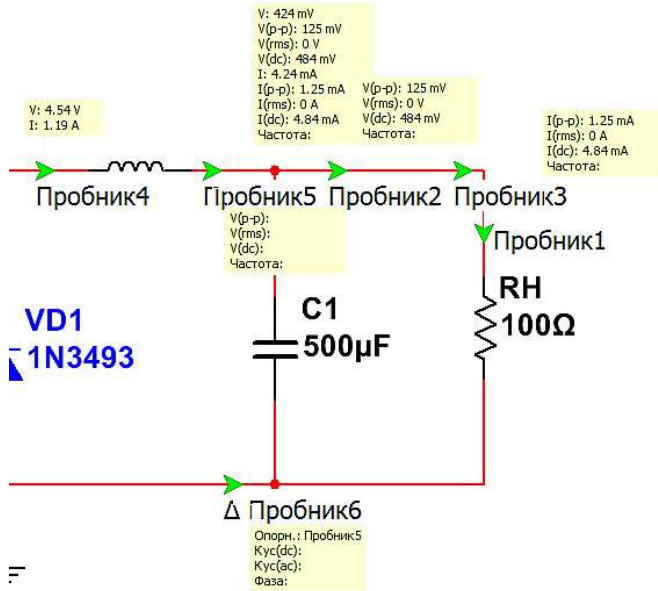


Рис. 2.6. Измерительные пробники в схеме

Общие правила моделирования

При моделировании схем необходимо соблюдать следующие общие правила:

1. Любая схема должна обязательно содержать хотя бы один символ заземления.
2. Любые два конца проводника либо контакта устройства, встречающихся в точке, всегда считаются соединенными. При соединении трех концов (Т-соединение) необходимо использовать символ соединения (узел). Те же правила применяются при соединении четырех и более контактов.

3. В схемах должны присутствовать источники сигнала (тока или напряжения), обеспечивающие входной сигнал, и не менее одной контрольной точки (за исключением анализа схем постоянного тока).

Топология схем

1. В схеме не должны присутствовать контуры из катушек индуктивности и источников напряжения.
2. Источники тока не должны соединяться последовательно
3. Не должно присутствовать короткозамкнутых катушек

4. Источник напряжения должен соединяться с катушкой индуктивности и трансформатором через последовательно включенный резистор. К конденсатору, подключенному к источнику тока, обязательно должен быть параллельно присоединен резистор.

2.3. Компьютерный практикум. Измерение параметров АМ-сигнала при прохождении через колебательный контур

Цель работы: измерение параметров АМК при прохождении через настроенный и расстроенные последовательные колебательные контуры в пакете NI Multisim.

Порядок выполнения:

1. Собрать в программе NI Multisim рабочую схему (рис. 2.7) для исследования прохождения АМ-колебаний через частотно-избирательные цепи. Установить параметры R, L, C в соответствии с рассчитанными значениями в пункте 2.1.

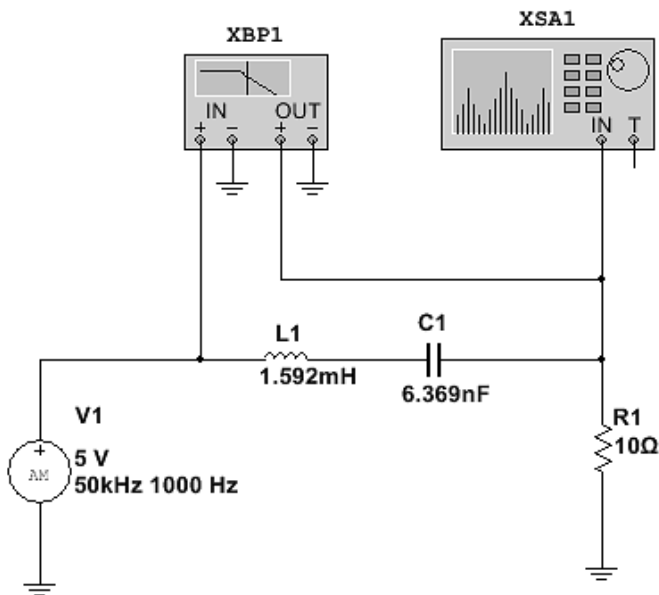


Рис. 2.7. Рабочая схема для исследования прохождения АМК через RLC-колебательный контур. Пример для параметров варианта: $f_0=50$ кГц; $F_0=2$ кГц; $M=0,8$; $f_p=50$ кГц; $\delta=500$ Ом; $Q=50$

Элементы R, L, C доступны по команде **Вставить/Компонент** и находится в *База данных: Основная, Раздел: Basic*.

V1 – источник АМ-колебаний, доступен по команде **Вставить/Компонент** и находится в *База данных: Основная, Раздел: Source, Семейство: SIGNAL_VOLTAGE_SOURCE* под именем **AM_VOLTAGE**.

XBP1 – плоттер Боде, доступен по команде **Моделирование/Приборы/Плоттер Боде**;

XSA1 – анализатор спектра, доступен по команде **Моделирование/Приборы/Анализатор спектра**.

2. Используя **Плоттер Боде XBP1**, измерить резонансную частоту контура и ширину полосы пропускания по уровню -3дБ. Определить реальную добротность контура по формуле $Q=f_{рез.}/\Pi_{-3дБ}$, где $\Pi_{-3дБ} = f_{верх.-3дБ} - f_{нижн.-3дБ}$ – полоса пропускания контура по уровню -3дБ. (см. пример на рис. 2.8).

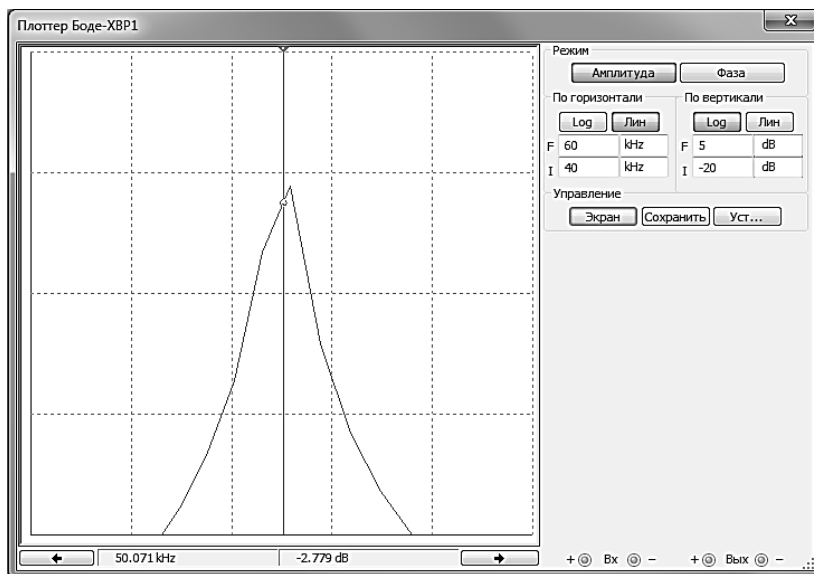


Рис. 2.8. АЧХ последовательного RLC-колебательного контура: $L1=1,592$ мГн; $C1=6,369$ нФ; $R1=10$ Ом, $\delta=500$ Ом

3. Установить параметры источника АМ-колебаний **V1**, в соответствии с заданием.

4. Используя **Анализатор спектра XSA1** (см. пример на рис. 2.4) и **Анализ Фурье** измерить амплитуды и фазы гармоник сигнала.

По формуле

$$M' = 2U_{f_0 \pm F_0} / U_{f_0}$$

определить коэффициент модуляции на выходе контура и по формуле (2.8) рассчитать фактор демодуляции D.

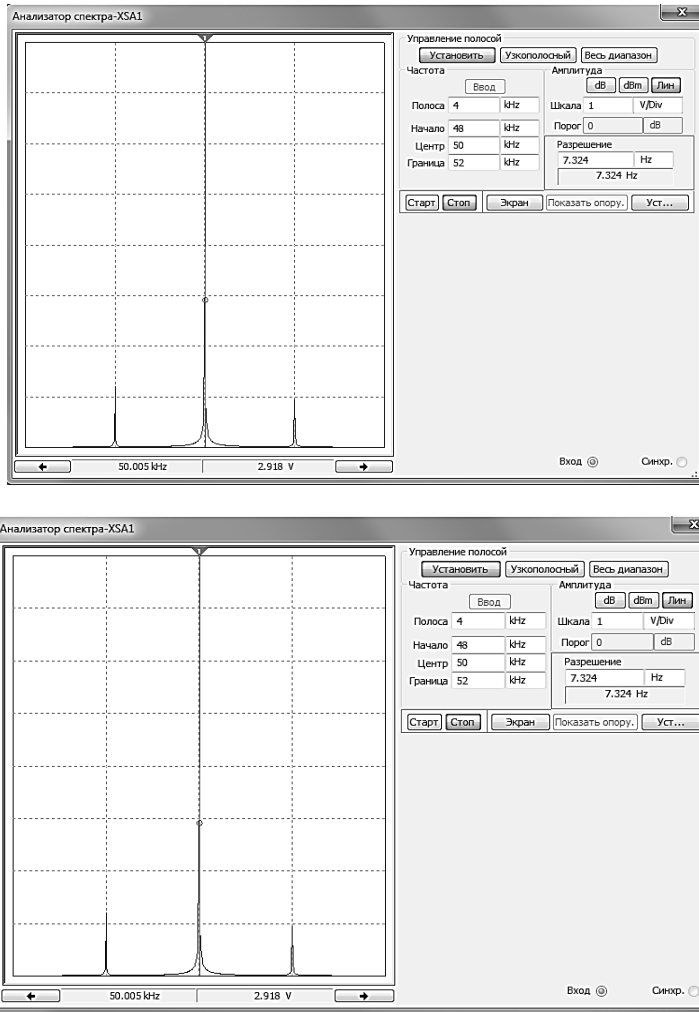


Рис. 2.9. Спектр на выходе RLC последовательного контура: $L1=1,592$ мГн; $C1=6,369$ нФ; $R1=10$ Ом; $\delta=500$ Ом. Пример для параметров варианта: $f_0=50$ кГц; $F_0=2$ кГц; $M=0,8$; $f_p=50$ кГц; $\delta=500$ Ом; $Q=50$

5. Повторить пункты 3, 4 для частот модуляции $F = 2F_0$ и $F = 5F_0$.
6. Изменить параметры источника АМ-колебаний **V1**: увеличить несущую частоту f_0 АМК на 1 кГц, установить частоту модуляции $F = F_0$.
7. Используя **Анализатор спектра XSA1** и **Анализ Фурье** измерить амплитуды и фазы гармоник сигнала.
8. Повторить пункты 6, 7 для частот модуляции $F = 2F_0$ и $F = 5F_0$.
9. Увеличить несущую частоту f_0 АМК на 2 и 5 кГц и повторить пункты 7, 8.
10. Проанализировать полученные данные и сделать выводы по работе.

Содержание отчета

Отчёт по компьютерному практикуму должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) рабочую схему для исследования прохождения АМК через RLC-колебательный контур.
- 4) описание, последовательности выполнения работы, с результатами в текстовой и графической формах.
- 5) ответы на контрольные вопросы.
- 6) выводы, по результатам выполнения работы, с анализом их корреляции с ожидаемыми результатами.

Контрольные вопросы

1. Перечислите параметры колебательного контура.
2. Перечислите параметры АМК.
3. Что такое фактор демодуляции?
4. Назначение анализатора спектра.
5. Назначение плоттера Бюте.
6. Что такое АЧХ, резонансная частота, полоса пропускания, частоты среза и крутизна спада колебательного контура.

2.4. Прохождение ЧМ колебания через частотно-избирательные цепи

При ЧМ неравномерность амплитудно-частотной и кривизна фазо-частотной характеристик контура оказывают более сложное влияние на параметры выходного колебания. Даже при гармонической модуляции частоты спектр колебания обычно содержит очень большое число пар боковых частот. Нарушение нормальных амплитудных и фазовых соотношений между отдельными парами боковых частот приводит к искажению закона модуляции даже при полной симметрии характеристик цепи относительно несущей частоты колебания.

При ЧМ влияние цепи может выразиться:

- а) в искажении закона изменения мгновенной частоты и мгновенной фазы колебания;
- б) в изменении амплитуды полезного частотного отклонения в зависимости от частоты модуляции Ω ;
- в) в возникновении паразитной АМ.

Рассмотрим воздействие ЭДС, частота которой изменяется по закону

$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_n \cos \Omega t, \quad (2.10)$$

на резонансную колебательную цепь. Амплитуду ЭДС считаем строго постоянной, так что ЭДС можно представить выражением

$$e(t) = E_0 \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t). \quad (2.11)$$

Комплексный коэффициент передачи цепи обозначим через

$$K(i\omega) = K(\omega)e^{i\varphi(\omega)}. \quad (2.12)$$

Примерный вид модуля $K(\omega)$ и фазы $\varphi(\omega)$ для обычной резонансной цепи изображён на рис. 2.10, а. Так как перед $\varphi(\omega)$ выбран знак плюс, то фазовая характеристика $\varphi(\omega)$ имеет отрицательный наклон в полосе прозрачности цепи. Частотный спектр и график изменения мгновенной частоты $\omega(t)$ входной ЭДС показаны на рис. 2.10, б, в.

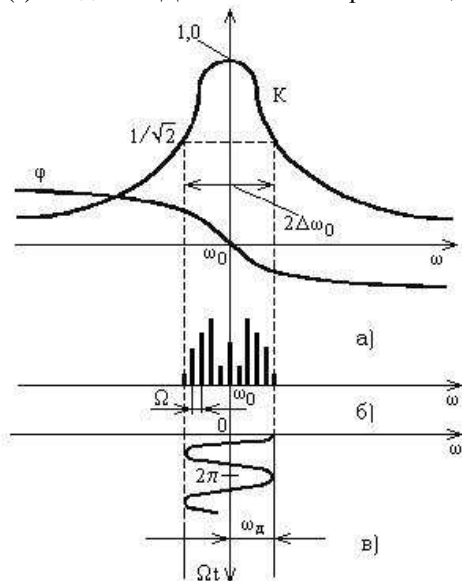


Рис. 2.10. Прохождение ЧМК через избирательные цепи: а) – АЧХ и ФЧХ контура; б) – спектр ЧМК, в) – закон изменения частоты

Амплитуда выходного напряжения изменяется – по закону

$$U_{\text{вых}}(t) = E_0 K(\omega) = E_0 K(\omega_0 + \omega_d - \cos \Omega t), \quad (2.13)$$

а мгновенная частота – по закону

$$\omega_{\text{вых}}(t) = d\psi / dt + d\varphi / dt, \quad (2.14)$$

где $\psi(t) = \omega_0 t + m \sin \Omega t$ – полная фаза ЭДС на входе цепи;

$\varphi(\omega)$ – аргумент коэффициента передачи цепи; при $\omega = \omega(t)$ является функцией времени.

2.5. Практикум. Расчёт параметров последовательного резонансного контура

Цель работы: практический расчет элементов последовательного резонансного контура.

Для заданного в табл. 2.2 ЧМК и резонансного контура определить параметры RLC цепи по формулам:

$$L = \frac{\delta}{2\pi f_p}; C = \frac{1}{2\pi f_p \delta}; R = \frac{\delta}{Q}. \quad (2.15)$$

Таблица 2.2

Параметры ЧМК и резонансного контура

№ варианта	Несущая частота, f_0 , кГц	Частота модуляции, F_0 , кГц	Индекс модуляции, m	Резонансная частота контура, f_p , кГц	Добротность контура, Q	Характеристическое сопротивление, δ , Ом
1	2	3	4	5	6	7
1	51	1,0	2	51	20	200
2	54	2,0	1	54	10	300
3	56	1,5	2	56	15	300
4	58	1,0	3	58	20	500
5	60	3,0	1	60	15	450
6	63	2,0	2	63	20	600
7	65	1,0	3	65	18	360

1	2	3	4	5	6	7
8	67	3,0	2	67	12	240
9	70	2,0	3	70	8	400
10	72	2,5	2	72	20	400
11	75	1,5	3	75	25	750
12	78	2,0	2	78	15	600
13	80	3,0	1	80	20	600
14	82	1,0	3	82	25	500
15	85	2,0	2	85	15	750
16	87	3,0	3	87	10	200
17	90	1,5	3	90	20	600
18	93	1,0	3	93	25	750
19	95	2,0	2	95	20	400
20	97	3,0	1	97	10	300

Содержание отчета

Отчёт по практикуму должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) данные варианта и рабочую схему для исследования прохождения ЧМК через RLC-колебательный контур.
- 4) описание, последовательности выполнения работы, с результатами в текстовой и табличной формах.
- б) выводы, по результатам выполнения работы.

2.6. Компьютерный практикум. Измерение параметров ЧМ-сигнала при прохождении через колебательный контур

Цель работы: измерение параметров ЧМК при прохождении через настроенный и расстроенные последовательные колебательные контуры в пакете NI Multisim.

Порядок выполнения:

1. Собрать в программе NI Multisim рабочую схему (рис. 2.11) для исследования АЧХ последовательного RLC-колебательного контура. Установить параметры R, L, C в соответствии с рассчитанными значениями в пункте 2.5.

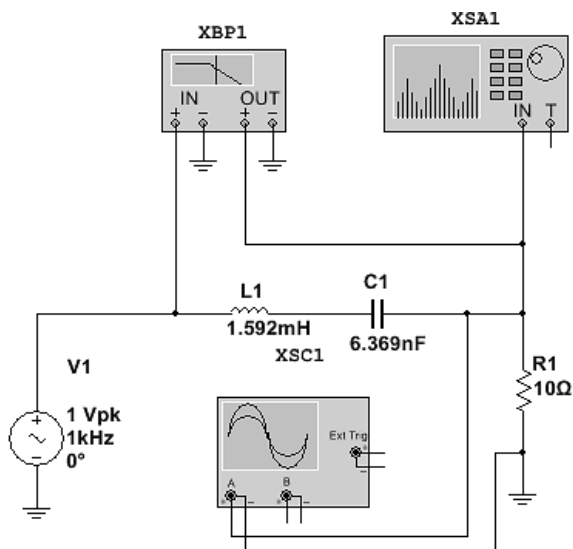


Рис. 2.11. Рабочая схема для оценки параметров последовательного RLC-колебательного контура. Пример для параметров варианта: $f_0=50$ кГц; $F_0=2$ кГц; $m=2$; $f_p=50$ кГц; $\delta=500$ Ом; $Q=50$

Элементы R, L, C доступны по команде **Вставить/Компонент** и находится в База данных: **Основная, Раздел: Basic**.

V1 – источник переменного напряжения, доступен по команде **Вставить/Компонент** и находится в База данных: **Основная, Раздел: Source, Семейство: SIGNAL_VOLTAGE_SOURCE** под именем **AC_VOLTAGE**.

XBP1 – плоттер Боде, доступен по команде **Моделирование/Приборы/Плоттер Боде**;

XSA1 – анализатор спектра, доступен по команде **Моделирование/Приборы/Анализатор спектра**;

XSC1 – осциллограф, доступен по команде **Моделирование/Приборы/Осциллограф**.

2. Используя **Плоттер Боде XBP1** и меню параметров, измерить резонансную частоту контура и ширину полосы пропускания по уровню -3дБ. Определить реальную добротность контура по формуле

$Q=f_{рез.}/\Pi_{-3дБ}$, где $\Pi_{-3дБ} = f_{верх.-3дБ} - f_{нижн.-3дБ}$ – полоса пропускания контура по уровню -3дБ. (см. пример на рис. 2.11).

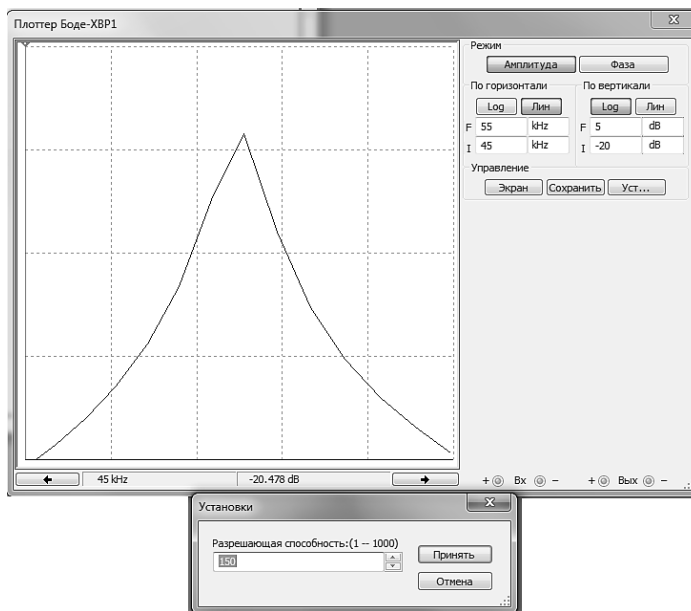


Рис. 2.12. АЧХ последовательного RLC-колебательного контура: $L1=1,592$ мГн; $C1=6,369$ нФ; $R1=10$ Ом, $\delta=500$ Ом

3. Заменить источник переменного напряжения **V1** на источник ЧМ-колебаний, который доступен по команде **Вставить/Компонент** и находится в **База данных: Основная, Раздел: Source, Семейство SIGNAL_VOLTAGE_SOURCE** под именем **FM_VOLTAGE**. Рабочая схема для исследования прохождения ЧМК через последовательный RLC-колебательный контур показана на рис. 2.11.

4. Установить параметры источника ЧМК, в соответствии с вариантом, табл. 2.2.

5. Используя **Анализатор спектра XSA1** измерить амплитуды и фазы несущей и пяти верхних и нижних боковых гармоник (см. пример на рис. 2.13).

6. Используя **Осциллограф XSC1** оценить частоту и коэффициент паразитной АМ (см. пример на рис. 2.14) по формуле

$$M_{пар} = \frac{A_{макс} - A_{мин}}{A_{макс} + A_{мин}}$$

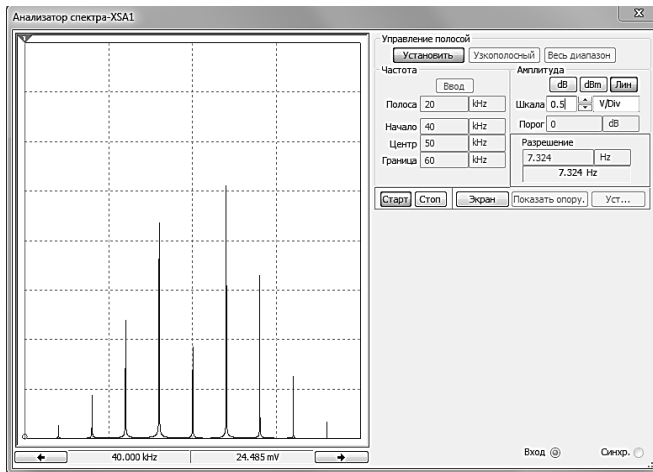


Рис. 2.13. Спектр сигнала на выходе RLC-колебательного контура. Пример для параметров варианта: $f_0=50$ кГц; $F_0=2$ кГц; $m=2$; $f_p=50$ кГц; $\delta=500$ Ом; $Q=50$

Из приведенной на рис. 2.14 осциллограммы видно, что в ЧМК присутствует паразитная амплитудная модуляция с полупериодом 154,265 мкс, что соответствует частоте **3,2 кГц**, и коэффициентом $M_{\text{пар}}=(2,014-0,908512)/(2,014+0,908512)=\mathbf{0,378}$.

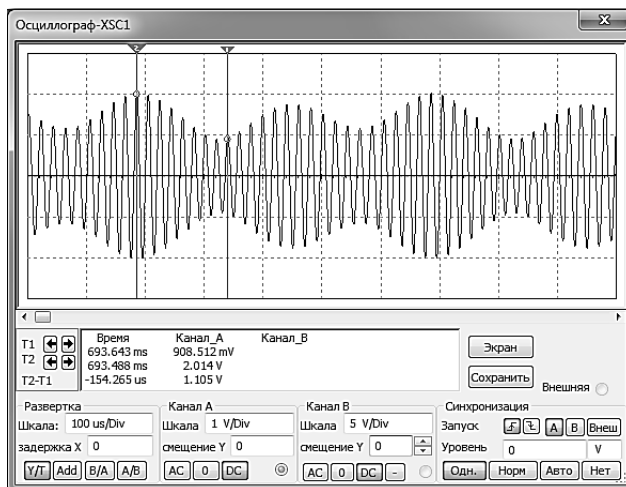


Рис. 2.14. Осциллограмма сигнала на выходе RLC-колебательного контура. Пример для параметров варианта: $f_0=50$ кГц; $F_0=2$ кГц; $m=2$; $f_p=50$ кГц; $\delta=500$ Ом; $Q=50$

Содержание отчета

Отчет по должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) рабочую схему для исследования прохождения ЧМК через RLC-колебательный контур.
- 4) описание, последовательности выполнения работы, с результатами в текстовой и графической формах.
- 5) ответы на контрольные вопросы.
- 6) выводы, по результатам выполнения работы, с анализом их корреляции с ожидаемыми результатами.

Контрольные вопросы

1. Перечислите параметры колебательного контура.
2. Перечислите параметры ЧМК.
3. Что такое фактор коэффициент паразитной АМ?
4. Назначение анализатора спектра.
5. Назначение плоттера Боде.
6. Что такое АЧХ, резонансная частота, полоса пропускания, частоты среза и крутизна спада колебательного контура.

3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

3.1. Назначение, классификация, структура и характеристики преобразователей частоты

Преобразование частоты – это процесс линейного переноса спектра сигнала из одной радиочастотной области в другую. Чаще такой перенос осуществляется в низкочастотную область. Линейность этого процесса проявляется в том, что при преобразовании вид модуляции и параметры сигнала в некотором динамическом диапазоне остаются неизменными, а коэффициент передачи ПЧ не зависит от уровня преобразуемого радиосигнала [1].

Преобразование частоты можно рассматривать как результат перемножения напряжений сигнала $u_c(t) = U_{mc}\cos(\omega_c t + \Phi_c)$ и гетеродина $u_z(t) = U_{mz}\cos(\omega_z t + \Phi_z)$. Выходное напряжение будет иметь частотную компоненту с разностной частотой $\omega_{np} = |\omega_c - \omega_z|$.

Если на выход смесителя включить контур, то можно выделить эту компоненту $u_{np}(t) = U_{mnp}\cos(\omega_{np} t + \Phi_{np})$ с промежуточной частотой

$$f_{np} = |f_c - f_z|. \quad (3.1)$$

Закон изменения амплитуды, частоты или фазы сигнала будет сохраняться в процессе этих преобразований.

В зависимости от типа нелинейной зависимости различают ПЧ на взаимных и невзаимных активных элементах. Преобразователи на взаимных нелинейных элементах – это главным образом диодные ПЧ. Отличительной особенностью таких ПЧ является идентичность коэффициентов преобразования в прямом и обратном направлениях. Это обстоятельство накладывает дополнительные требования к выходным частотно-избирательным цепям.

К преобразователям на невзаимных нелинейных относят ламповые и транзисторные преобразователи частоты, у которых реакция выходного преобразованного напряжения на входной сигнал полностью или частично исключена.

По характеру проводимости нелинейного элемента различают преобразователи частоты с активной и реактивной проводимостью. В первом случае преобразователь частоты выполняется на транзисторах и смесительных диодах. В них напряжение гетеродина изменяется преимущественно в области прямого тока диода. В этом случае главную роль играет нелинейная проводимость диода, поэтому такой преобразователь называют резистивным диодным преобразователем частоты [1].

При выполнении преобразователей частоты на параметрических диодах реализуются усилители-преобразователи. Напряжение гетеродина в них изменяется преимущественно в области обратных токов

диода (за счет напряжения смещения). Переменным параметром в таких ПЧ является емкость р-перехода диода, смещенного в обратном направлении. Этот преобразователь частоты называется емкостным.

Если нелинейный элемент одновременно выполняет в преобразователе частоты функции гетеродина и смесителя, то такая схема называется *преобразователь частоты с совмещенным гетеродином* или *автодинным преобразователем частоты*. Поскольку оптимальные режимы работы активного элемента для генерирования и преобразования частоты неодинаковы, то лучшими характеристиками обладают преобразователи частоты с отдельным гетеродином.

Структурная схема ПЧ приведена на рис. 3.1. В ней нелинейный элемент, преобразующий колебания сигнала с помощью гетеродина, называют *смесителем*. В состав преобразователя частоты входит также частотно-избирательные цепи для выделения полезного продукта преобразования. В простейшем случае частотно-избирательные цепи представляют собой параллельный контур [1].

Полосовой фильтр имеет достаточную полосу пропускания, допустимую неравномерность АЧХ в пределах этой полосы и требуемую избирательность для неискаженной передачи спектра сообщения и эффективного подавления помех. В случае прямого преобразования, при котором частота гетеродина равна несущей

частоте радиосигнала, вместо полосового фильтра включается ФНЧ.

Транзисторные преобразователи частоты [1] применяются в основном в диапазоне умеренно высоких частот. Нелинейный элемент такого смесителя является невзаимным, а реакция нагрузки на источник сигнала исключена. Диодные ПЧ применяются преимущественно в диапазоне СВЧ, что объясняется малым уровнем собственных шумов, малыми внутренними паразитными реактивностями, малогабаритностью и экономичностью работы.

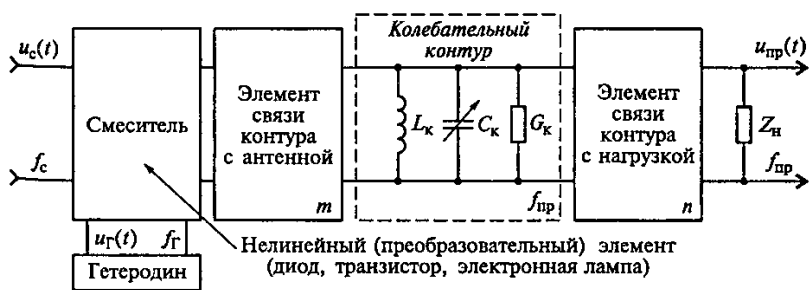


Рис. 3.1. Функциональная схема преобразователя частоты

В отличие от транзисторных преобразователей частоты, в которых проявляется лишь эффект прямого преобразования частоты, в диодных ПЧ наблюдается эффект обратного преобразования частоты. Напряжение промежуточной частоты при этом вызывает напряжение с частотой сигнала $f_c = f_\Gamma - f_{пр}$. Эффект обратного преобразования, таким образом, является следствием полной взаимности нелинейного элемента. Кроме этого явления в диодном ПЧ возникает эффекта вторичного преобразования, проявляющийся в том, что на входе ПЧ возникает напряжение на частоте зеркального канала $f_{з.к} = f_\Gamma + f_{пр}$. Зеркальная частота получается также за счет взаимодействия частоты сигнала со второй гармоникой частоты гетеродина $f_{з.к} = 2f_\Gamma - f_c$. Взаимодействие сигнальной и зеркальной частот является причиной фазовых искажений и неравномерности основных параметров преобразователей частоты в диапазоне рабочих частот.

Микросхемы для преобразователей частоты (ПЧ) условно можно разделить на специализированные и универсальные интегральные микросхемы (ИМС). Специализированные ИМС преимущественно используются для построения функционального узла или нескольких узлов радиоприемного устройства.

Универсальные ИМС для ПЧ ориентированы на перемножение двух колебаний. Применение универсальных ИМС сопряжено с использованием большого числа внешних элементов для частотной коррекции, установки режимов работы, согласования с источником сигналов и др. Как правило, универсальные ИМС имеют более высокие электрические параметры, чем специализированные.

В ПЧ различают внешние и внутренние параметры. К внешним относятся следующие параметры:

коэффициент передачи $K_{опч} = U_{мпр} / U_{мс}$;

входная и выходная проводимости;

коэффициент шума $\Pi_{пч}$.

Частотной характеристикой ПЧ называется зависимость его выходного напряжения (или коэффициента передачи) от частоты сигнала при постоянном значении частоты гетеродина.

3.2. Компьютерный практикум. Изучение преобразователей частоты

Цель работы: Изучение преобразователя частоты на основе аналогового перемножителя в пакете NI Multisim.

Порядок выполнения:

1. Собрать, рис. 3.2, рабочую схему для изучения преобразователя частоты.

2. В соответствии с данными варианта (табл. 3.1) установить параметры генератора АМ сигнала V1: f_c – частота сигнала, F_c – частота модулирующего сигнала, K_{AM} – коэффициент амплитудной модуляции.

3. Рассчитать, по (3.1), частоту гетеродина V2, при которой промежуточная частота на выходе преобразователя частоты $U_{\text{ВыхF}}$ станет равной 465 кГц.

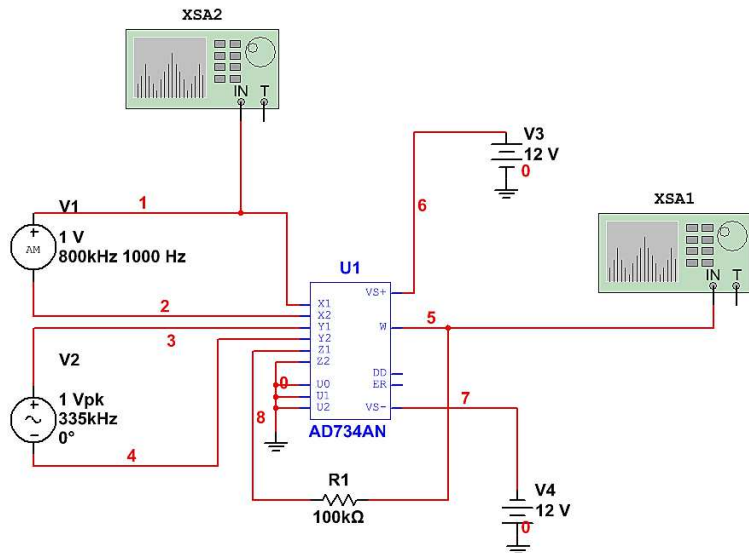


РИС. 3.2. РАБОЧАЯ СХЕМА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Таблица 3.1

Изучение ПЧ. Данные вариантов

№ варианта	f_c , кГц	F_c , кГц	K_{AM}
1	2	3	4
1	850	5	0,3
2	900	5	0,3
3	700	5	0,3
4	600	5	0,3
5	200	5	0,3
6	250	5	0,3

7	300	5	0,3
---	-----	---	-----

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4
8	850	3	0,3
9	900	3	0,3
10	700	3	0,3
11	600	3	0,3
12	200	3	0,3
13	250	3	0,3
14	300	3	0,3
15	850	5	0,5
16	900	5	0,5
17	700	5	0,5
18	600	5	0,5
19	200	5	0,5
20	250	5	0,5

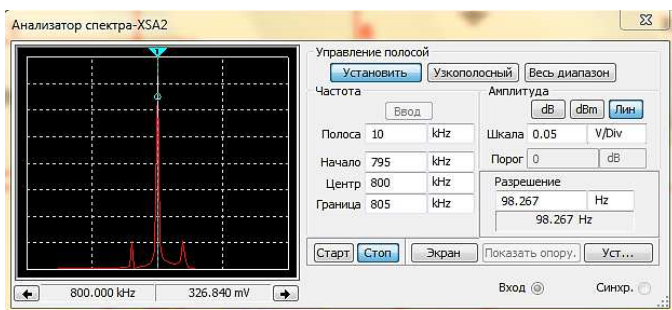


Рис. 3.3. Вид окон анализатора спектра: исходного АМ сигнала и на частоте промежуточной частоты 465 кГц

4. Перенести частотный спектр сообщения в область с несущей частотой 465 кГц.
5. Определить амплитуды составляющих спектра на выходе смесителя.
6. Определить коэффициент модуляции K_{AM} сигнала на выходе смесителя.
7. Снять выходную характеристику смесителя и построить зависимость $U_{\text{вых}}$ (амплитуда несущей с частотой 465 кГц на выходе) от $U_{\text{мс}}$ (амплитуда входного АМ сигнала) при $K_{AM} = 1$ по варианту для $U_{\text{мс}} = 0.1\text{ мВ}, 0.47\text{ мВ}, 1\text{ мВ}, 4.7\text{ мВ}, 10\text{ мВ}, 47\text{ мВ}, 100\text{ мВ}, 470\text{ мВ}, 1\text{ В}, 4.7\text{ В}, 10\text{ В}$
Измерить коэффициент шума частотного смесителя.

Содержание отчета

Отчёт по компьютерному практикуму должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) рабочую схему для изучения преобразователя частоты.
- 4) вид окон анализатора спектра: исходного и на частоте промежуточной частоты 465 кГц.
- 5) выходную характеристику преобразователя частоты.
- 6) Измеренные и/или рассчитанные значения коэффициента модуляции сигнала на выходе смесителя и коэффициент шума преобразователя частоты в рабочей полосе частот.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение преобразователя частоты?
2. Назначение нелинейного элемента?
3. Какие бывают преобразователи частоты.
4. Перечислите основные параметры преобразователей частоты.

4. УСИЛИТЕЛИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЧАСТОТ

4.1. Назначение и классификация усилителей промежуточной частоты

Усилители промежуточной частоты (УПЧ) применяются в супергетеродинных приемниках для усиления принимаемого сигнала до величины, обеспечивающей нормальную работу детектора. Кроме того, они обеспечивают высокую избирательность по соседнему каналу приема при допустимом уровне частотных искажений [1].

Основными параметрами УПЧ являются: номинальное значение промежуточной частоты, коэффициент шума, коэффициент усиления, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики, полоса пропускания и характеристика групповой времени задержки.

По величине относительной ширины полосы пропускания УПЧ подразделяют на узкополосные (ширина полосы около 1%) и широкополосные.

По характеру распределения избирательности в каскадах различают УПЧ с распределенной и сосредоточенной избирательностью.

В УПЧ с распределенной избирательностью функции усиления и избирательности обеспечивают в каждом каскаде. При этом резонансные контуры, создающие требуемую избирательность, одновременно являются нагрузками усилительных каскадов и определяют также усиление тракта. Равномерное распределение избирательности вдоль тракта приводит к тому, что каждый каскад имеет в среднем невысокую избирательность и подвержен влиянию помех и нестабильностей параметров усилительных элементов.

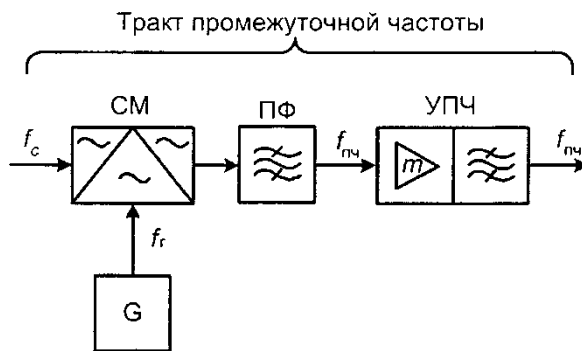


Рис. 4.1. Функциональная схема тракта промежуточной частоты

В усилителях с сосредоточенной избирательностью необходимая избирательность обычно создается фильтром, включенным между преобразователем и УПЧ, если преобразователь транзисторный, или фильтром, включенным после первого каскада УПЧ, если в преобразователе частоты использован диодный смеситель. Вся необходимая избирательность в данном случае сосредоточена в фильтре, называемом полосовым фильтром (ПФ) с сосредоточенной избирательностью (ФСИ) или фильтром с сосредоточенной селекцией (ФСС) (рис. 4.1). Фильтрация близкорасположенных помех или радиостанций (избирательность по соседнему каналу) обеспечивается фильтром ФСИ (ФСС). Требуемое усиление УПЧ обеспечивают широкополосные апериодические каскады усилителей, расположенные после фильтра. При данном способе конструирования УПЧ имеется возможность отдельно влиять на усиление и избирательность тракта, что улучшает его технологичность.

4.2 Компьютерный практикум. Изучение апериодических усилителей промежуточных частот

Цель работы: изучение основных характеристик усилителей промежуточных частот, выполненных на операционных усилителях.

Порядок выполнения:

1. Собрать, в программном пакете NI Multisim, рабочую схему апериодического усилителя промежуточной частоты (рис. 4.1), в соответствии с данными варианта (таблица 4.1). За основу взять операционный усилитель THS3202D.

2. Построить выходную характеристику $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ широкополосного усилителя для уровня входного напряжения 0,1 мВ; 0,5 мВ; 1 мВ; 5 мВ; 10 мВ; 50 мВ; 100 мВ; 500 мВ для частот 465 кГц и 10,7 МГц.

Таблица 4.1

Данные вариантов

Номер варианта	R1, кОм	Номер варианта	R1, кОм
1	2	3	4
1	47	15	75
2	33	16	30
3	27	17	45
4	36	18	50
5	39	19	54

1	2	3	4
6	56	20	45
7	68	21	32
8	22	22	48
9	18	23	44
10	15	24	32
11	12	25	39
12	24	26	40
13	43	27	44
14	51	28	37

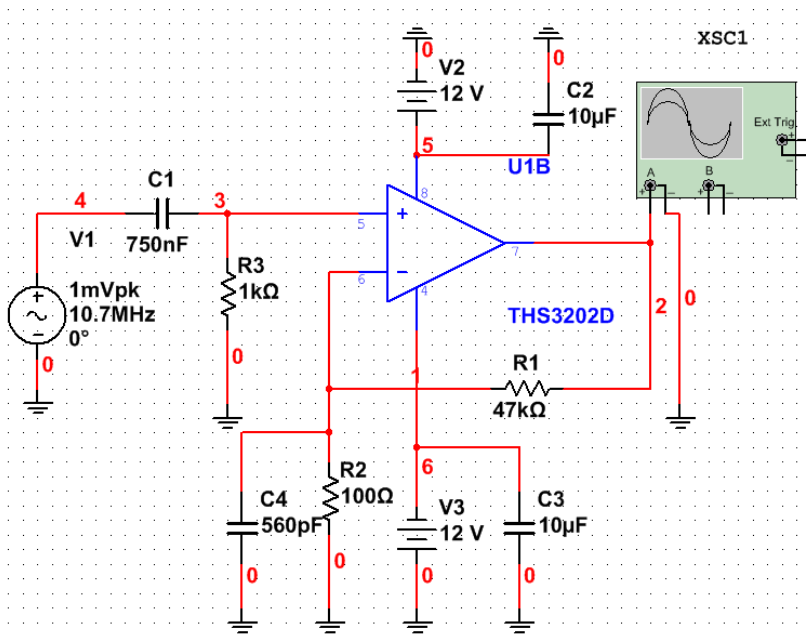


Рис. 4.1. Рабочая схема для изучения усилителя промежуточной частоты на операционном усилителе THS3202D

2. Снять осциллограмму сигнала на выходе усилителя при уровне входного сигнала 1 мВ на частотах 465 кГц и 10,7 МГц. Определить коэффициент усиления для каждой частоты.

3. Путем моделирования (Моделирование/Вид анализа/Режим АС), получить амплитудно-частотную характеристику данного усилителя для диапазона частот от 1 Гц до 10 ГГц. Определить полосу пропускания и частоту единичного усиления. На рисунке 4.2 представлен пример результата анализа амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик.

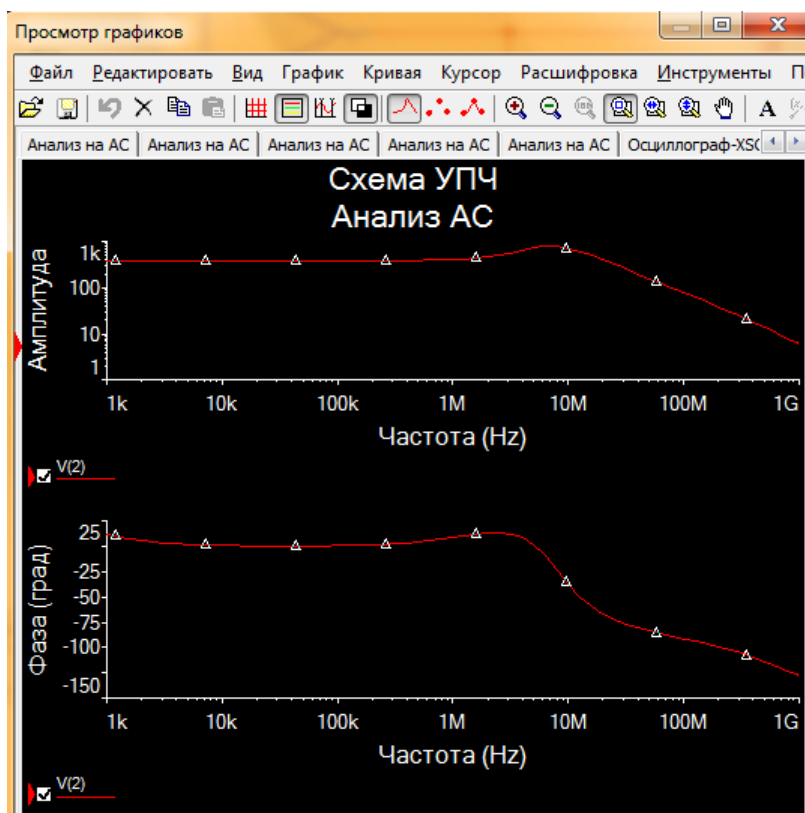


Рис. 4.2. Амплитудно-частотная характеристика усилителя промежуточной частоты на операционном усилителе THS3202D

4. Произвести анализ шумов (Моделирование/Вид анализа/Анализ шумов). Показания анализа приведены на рис. 4.3.

5. Повторить п. 1-4 усилителя промежуточной частоты на операционном усилителе LMH6702MA (рис. 4.4).

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) выходные характеристики и АЧХ УПЧ;
- 4) данные анализа шумов, значения полосы пропускания и частоты единичного усиления
- 5) выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение УПЧ?
2. Перечислите и охарактеризуйте основные типы УПЧ.
3. Перечислите основные параметры УПЧ.

5. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

5.1. Назначение, классификация и характеристики амплитудных детекторов

Детекторы предназначены для создания напряжения, изменяющегося в соответствии с законом модуляции одного из параметров входного сигнала. Детекторы классифицируют по характеру входного сигнала и виду параметру, который подвергается модуляции, по способу выполнения и т.д.

Амплитудный детектор – устройство, на выходе которого создаётся напряжение в соответствии с законом модуляции амплитуды входного гармонического сигнала [3].

Амплитудное детектирование может быть осуществлено путём использования параметрической цепи с периодически изменяющимися параметрами – синхронное детектирование, когерентный приём или с помощью нелинейной цепи – некогерентный приём, который проще, и поэтому амплитудные детекторы с нелинейным элементом нашли широкое применение [1].

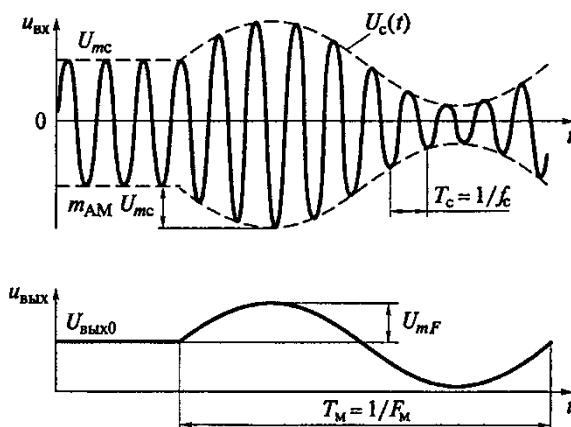


Рис. 5.1. Преобразование сигнала при амплитудном детектировании

Если на вход АД подаётся высокочастотное модулированное напряжение (рис. 5.1) $u_{\text{вх}}(t) = u_c(t) = U_c(t) \cos(\omega_c t + \Phi_c)$. На выходе идеального АД должна быть выделена огибающая высокочастотного напряжения $U_c(t)$ [1].

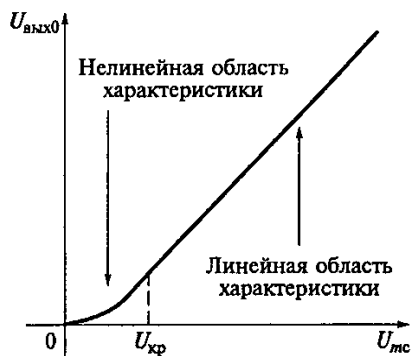


Рис. 5.2. Детекторная характеристика амплитудного детектора

Качество АД характеризуется следующими параметрами: детекторной характеристикой, которая представляет собой зависимость постоянного выходного напряжения от немодулированного входного сигнала $U_{мс}$ (рис. 5.2). Для детектирования без искажений детекторная характеристика должна быть линейной.

Крутизна детекторной характеристики определяется как производная: $S_d = \frac{dU_{вых0}}{dU_{мс}}$

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

– коэффициентом передачи для немодулированного сигнала:

$$K_{АМ0} = \frac{U_{вых0}}{U_{мс}} ; \quad (5.1)$$

– коэффициентом передачи:

$$K_{АД} = \frac{U_{mF}}{m_{АМ}U_{мс}} , \quad (5.2)$$

где $m_{АМ}$ – коэффициент модуляции АМ-сигнала;

U_{mF} – амплитуда выходного напряжения на частоте модуляции F_M ;

$m_{АМ}U_{мс}$ – амплитуда огибающей АМ-сигнала;

– минимальными и максимальными уровнями детектируемых сигналов;

– линейными (частотными) искажениями, оцениваемыми по кривой верности;

– нелинейными искажениями, которые при гармонической модуляции характеризуются коэффициентом нелинейных искажений:

$$k_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_{m2F}^2 + U_{m3F}^2}}{U_{mF}}, \quad (5.3)$$

где U_{m2F} и U_{m3F} – амплитуды выходного напряжения с частотами $2F_M$ и $3F_M$.

– коэффициентом фильтрации, характеризующим степень развязки нагрузки АД по частоте входного сигнала:

$$k_{\text{фАД}} = \frac{U_{\text{мвх}}(f_c)}{U_{\text{мвх}}(f_c)} = \frac{U_{\text{мвх}}(f_c)}{U_{\text{мс}}}; \quad (5.4)$$

– входным сопротивлением:

$$R_{\text{вхАД}} = \frac{U_{\text{мс}}}{I_{m1}}, \quad (5.5)$$

где I_{m1} – амплитуда тока первой гармоники сигнала с частотой f_c .

– выходным сопротивлением, характеризующим взаимодействие АД с последующими каскадами.

5.2. Детектирование АМ сигналов нелинейной цепью

В общем случае, детектирование АМ-сигналов представляет собой процесс выпрямления радиочастотных колебаний и сглаживания пульсаций. В качестве основных элементов детекторов часто применяют высокочастотные диоды и транзисторы. Для всех детекторов характерен резкий изгиб на вольтамперной характеристике в области нулевых анодных напряжений.

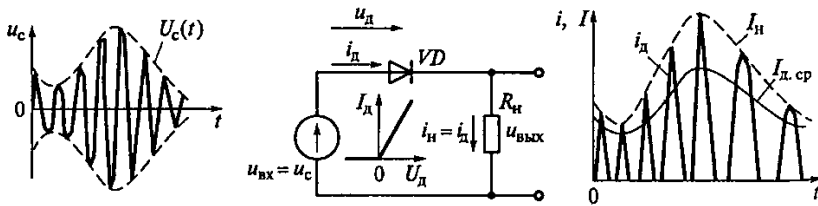


Рис. 5.3. Амплитудное детектирование нелинейной цепью

Если на вход детектора, состоящего из идеального диода, рабочая точка которого находится на нижнем изгибе его ВАХ $I_D = \varphi(U_D)$, подведен высокочастотный сигнал $u_c(t) = U_c \cos(\omega_c t + \Phi_c)$, то ток диода будет представлять собой импульсы, поступающие в нагрузку R_H во время положительных полуволн входного напряжения. Величина отдельных

импульсов тока i_H на нагрузке будет прямо пропорциональна амплитудам соответствующих импульсов, поэтому огибающая выходных импульсов $I_H(t)$ по своей форме повторяет огибающую высокочастотного модулированного напряжения $U_c(t)$ [1]. Среднее значение тока диода за каждый период высокочастотного колебания прямо пропорционально амплитудам соответствующих положительных полуволн высокочастотного напряжения $u_{вх}(t)=u_c(t)$, подводимого к диоду. Амплитуда высокочастотного модулирующего напряжения $u_c(t)$ меняется по закону модулирующего напряжения $U_c(t)$, поэтому и усреднённое значение тока диода $I_D(t)=I_H(t)$ будет меняться по закону модулирующего напряжения.

Рабочую точку на ВАХ АД следует выбирать так, чтобы изменения амплитуды входного напряжения захватывали нелинейную область. В противном случае среднее значение тока будет оставаться постоянным и не зависеть от закона модуляции. Из-за применения в качестве рабочей, нелинейной области ВАХ, такие амплитудные детекторы относят к нелинейным цепям РПРУ.

5.3. Детекторы АМ-сигналов

Детектор при нагрузке R_H (рис. 5.4а), который не шунтирован ёмкостью, безинерционен по частоте f_c , а его коэффициент передачи $K_{АД}$ мал. Пульсации выходного напряжения $u_{вых}$ с основной частотой будут велики [1]. Для увеличения коэффициента передачи и уменьшения пульсаций в нагрузке R_H детектора, необходимо шунтировать её ёмкостью C_H .

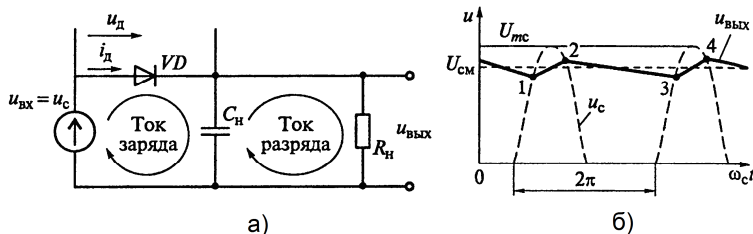


Рис. 5.4. Схема последовательного амплитудного детектора (а) и эюры его напряжений на выходе (б)

В последовательной схеме диодного АД источник сигнала, диод и нагрузка включены последовательно, а развязка высоко- и низкочастотной цепей обеспечивается при выполнении условия

$$\frac{1}{2\pi f_c C_H} \ll R_H \ll \frac{1}{2\pi F_B C_H}. \quad (5.6)$$

Установившееся выходное напряжение на конденсаторе, накапливающего заряд, имеет два цикла (рис. 5.4, б). В первом цикле происходит быстрая подзарядка конденсатора C_H (участки 1-2 и 3-4) через сопротивление открытого диода $R_{д.пр.}$. Второй цикл предусматривает разряд конденсатора C_H через нагрузку R_H (участок 2-3). Точки смены циклов асимметричны относительно максимумов входного напряжения, поскольку напряжение в начале подзарядки меньше, чем в конце. Чем сильнее неравенство $2\pi f_c C_H R_H \gg 1$, тем меньше разряд ёмкости и пульсации выпрямленного напряжения. Точки смены циклов соответствуют изменению знака напряжения на диоде, равного сумме приложенного напряжения $u_{вых}(t)$.

Работа диодного амплитудного детектора в линейном режиме характеризуется тем, что амплитуда входного сигнала не должна быть меньше некоторого критического значения $U_{кр.}$, которое ограничивает снизу диапазон амплитудных перепадов на входе (рис. 5.2). Если модуляция осуществляется гармонической функцией с частотой F_M , то для обеспечения линейного режима необходимо выполнение неравенства $U_{мс}(1-m_{AM}) \geq U_{кр.}$

Если пренебречь изменением средней крутизны характеристики диода, то для упрощения анализа обычно используется ВАХ идеального диода, аппроксимированная линейно-ломанной функцией. Диаграммы токов и напряжений идеального диода в установившемся режиме представлены на рис. 5.5.

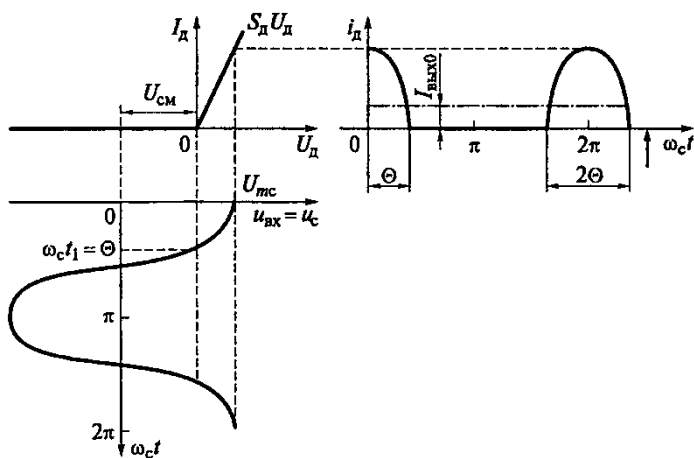


Рис. 5.5. Диаграммы токов и напряжений диода с линейно-ломанной ВАХ

Линейный режим работы диодного АД устанавливается при достаточно больших амплитудах входного сигнала в случае, когда диод работает с отсечкой тока [1]. В установившемся режиме работы вследствие усредняющего действия нагрузки на ней создается постоянное напряжение $U_{см}$, которое обратной полярностью приложено к диоду, и смещает рабочую точку в запирающую сторону. При изменении амплитуды напряжения входного воздействия напряжения автосмещения $U_{см}$ будет пропорционально этому изменению.

Детекторная характеристика (рис. 5.2) делится некоторым значением $U_{кр}$ на линейную и нелинейную части. Работа демодулятора нарушается, если $U_{мс} < U_{кр}$. Величина $U_{кр}$ определяется контактной разностью потенциалов диодной структуры и равна 300 мВ для германия и 1,2 В для арсенида галлия.

Основные требования к нагрузке АД, работающего в линейном режиме:

1. Сопротивление нагрузки амплитудного детектора для развязки высокочастотных и низкочастотных цепей должно удовлетворять условию (5.6).

2. Максимизация коэффициента передачи за счёт уменьшения угла отсечки обеспечивается при выполнении условия $S_{\theta} R_H \geq 50$ [1].

3. Линейный режим работы обеспечивается минимальной допустимой амплитудой несущего колебания АМ-сигнала $U_{мс} \geq U_{кр} / (1 - m_{АМмакс})$, где $m_{АМмакс}$ – максимальное значение коэффициента модуляции АМ-сигнала.

4. Минимизация нелинейных искажений за счёт нагрузки детектора достигается при выполнении условия:

$$R_H \leq \frac{1}{2\pi F_B C_H} \frac{\sqrt{m_{АМмакс}^2}}{m_{АМмакс}} \quad (5.7)$$

5. Реальная нагрузка АД ограничивается неравенством:

$$R_H \leq \frac{1,5}{2\pi F_B C_H} \quad (5.8)$$

$$S_D = \frac{dU_{вых0}}{dU_{мс}} \quad (5.9)$$

5.4. Компьютерный практикум. Изучение диодных детекторов АМ-сигналов

Цель работы: изучение амплитудных детекторов АМ-сигналов и измерение их основных параметров.

Порядок выполнения:

1. Изучить литературу [8-15].
2. Собрать схему в соответствии с рис. 5.6. VD1 – 1N4148, 1N4151, BA317, 1N914.
3. Установить следующие параметры генератора AM-сигналов (V1): частота несущей гармоники $f = 465$ кГц, амплитуда несущей гармоники $U_c = 1$ В, частота модуляции $F = 1$ кГц, коэффициент модуляции $m_{AM} = 0,3$.

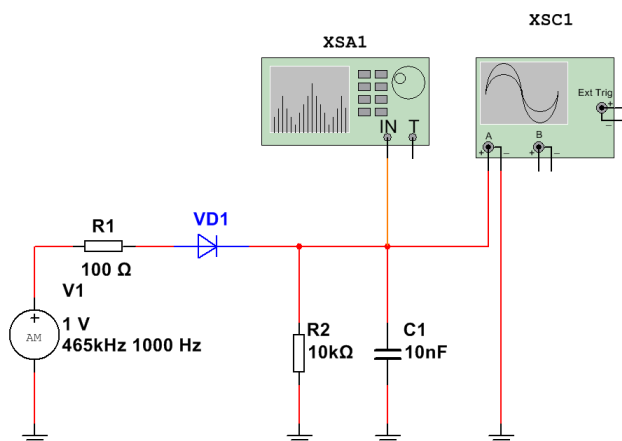


Рис. 5.6. Схема последовательного диодного детектора AM-сигналов

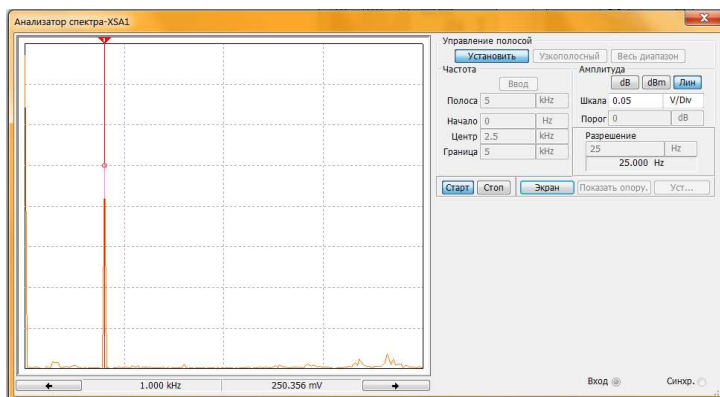


Рис. 5.7. Вид окна и органов настройки спектроанализатора. Окно анализатора: вид частотного спектра сигнала на выходе последовательного диодного детектора (рис. 5.6), $f = 465$ кГц, $U_c = 1$ В, $F = 1$ кГц, $m_{AM} = 0,3$

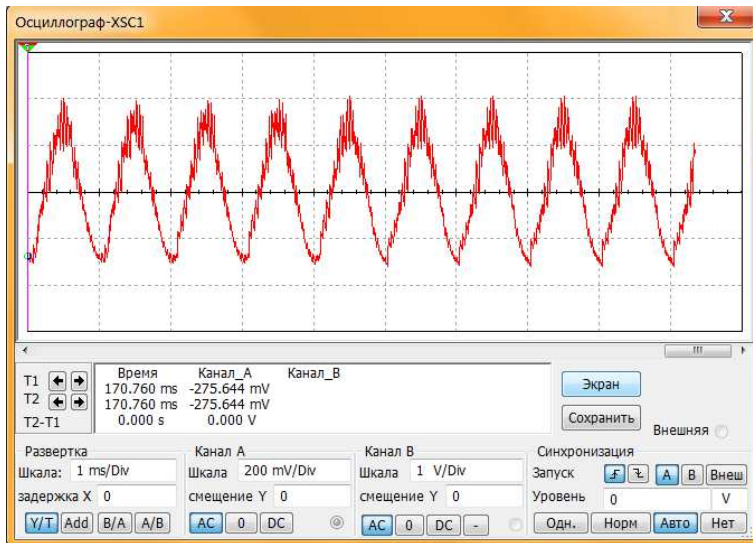


Рис. 5.8. Вид окна и органов настройки осциллографа. Окно осциллографа: вид сигнала на выходе последовательного диодного детектора (рис. 5.6), $f = 465$ кГц, $U_c = 1$ В, $F = 1$ кГц, $m_{AM} = 0,3$

Запустить спектроанализатор (главное меню / Измерители) и осциллограф ((главное меню / Измерители). Выбрать количество точек анализа FFT точек = 32768 (вызов настроек – кнопка **Уст...**). Установить на спектроанализаторе рабочую полосу от 0 до 5 кГц, центр – 2,5 кГц, разрешение 25 Гц.

4. Запустить анализ схемы. На рис. 5.7 и рис. 5.8, соответственно, приведены показания и вид органов настройки спектроанализатора и осциллографа.

5. Установить следующие параметры генератора АМ-сигналов: частота несущей гармоники $f = 465$ кГц, частота модуляции $F = 0$ кГц, коэффициент модуляции $m_{AM} = 0$.

6. Включить спектроанализатор. Установить на спектроанализаторе рабочую полосу от 0 до 5 кГц, центр – 2,5 кГц, разрешение 25 Гц (см. рис. 5.8).

7. Изменяя амплитуду несущего колебания U_{nc} , в соответствии с данными табл. 5.1, измерить значение постоянной составляющей $U_{вых0}$ на выходе амплитудного детектора. Результаты занести в табл. 5.1.

Детекторная характеристика

$U_{\text{мс}}, \text{В}$	$U_{\text{вых0}}, \text{В}$
0,1	
0,2	
0,3	
0,5	
0,6	
0,8	
1,0	
1,2	
1,4	
1,6	
1,8	
2,0	
2,4	
2,7	
3,1	
3,6	
4,1	
4,5	
5,5	

8. По данным табл. 5.1. построить детекторную характеристику АД, которая представляет собой зависимость постоянного (выпрямленного) выходного напряжения $U_{\text{вых0}}$ от амплитуды немодулированного входного сигнала $U_{\text{мс}}$ (см. для примера рис. 5.2).

9. Выделить линейный участок на построенной детекторной характеристике (см. для примера рис. 5.2) и определить крутизну детекторной характеристики диодного АД по формуле (5.9).

10. Установить следующие параметры генератора АМ-сигналов:

- частота несущей гармоники $f = 465 \text{ кГц}$,
- амплитуда несущей гармоники $U_c = 1 \text{ В}$,
- частота модуляции $F = 1 \text{ кГц}$,
- коэффициент модуляции $m_{\text{АМ}} = 0,3$.

11. Включить спектроанализатор. Установить на спектроанализаторе рабочую полосу от 0 до 5 кГц, центр – 2,5 кГц, разрешение 25 Гц (см. рис. 5.7).

12. Изменяя U_c , в соответствии с данными табл. 5.1, измерить амплитуды гармоник: на модулирующей частоте F (1 кГц) – U_{mF} ; второй гармоники (2 кГц) частоты F – U_{m2F} ; третьей гармоники (3 кГц) частоты F – U_{m3F} . Результат занести в табл. 5.2.

13. Рассчитать, по данным табл. 5.2, коэффициенты гармоник k_r , передачи K_d диодного АД, по формулам 5.2 и 5.3, результаты занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Зависимости коэффициентов гармоник и детектирования от уровня сигнала

U_c , В	U_{mF} , В	U_{m2F} , В	U_{m3F} , В	k_r , %	K_d
0,3					
0,5					
0,6					
1,0					
1,2					
1,4					
1,7					
2,0					
2,5					
2,7					
3,1					
3,6					
4,1					
4,5					
5,5					

14. Изменяя коэффициент модуляции m_{AM} от 0,1 до 1 с шагом 0,05, при $f = 465$ кГц, $U_c = 1$ В, $F = 1$ кГц, измерить амплитуды гармоник U_{mF} , U_{m2F} , U_{m3F} . Рассчитать коэффициент гармоник k_r по формуле 5.3. Результаты измерений и расчётов занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Зависимость коэффициента гармоник от коэффициента модуляции

M	0,1	0,15	0,2	0,95	1
U_F, B									
U_{2F}, B									
U_{3F}, B									
$k_r, \%$									

15. По данным табл. 5.2 построить графики зависимости $U_{mF}(U_c)$.

16. По данным табл. 5.3 построить график зависимости коэффициента гармоник k_r от коэффициента модуляции m_{AM} .

17. Установить на спектроанализаторе рабочую полосу от 0 до 25 кГц. Изменяя значение ёмкости $C1 = 4,7 \text{ нФ}, 6,8 \text{ нФ}, 10 \text{ нФ}, 22 \text{ нФ}$, измерить величину гармоники $U_{mвых}$ частотой f (465 кГц) на выходе АД, рассчитать коэффициенты передачи (5.1) и фильтрации несущей (5.4) АД. Результаты занести в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Зависимости параметров от ёмкости RC цепочки

C1	4,7 нФ	6,8 нФ	10 нФ	22 нФ
U_c, B	1	1	1	1
$U_{mвых}, B$				
K_d				
$k_{\phi АД}$				

18. По данным табл. 5.4 построить графики зависимостей коэффициента передачи K_d и фильтрации $k_{\phi АД}$ диодного АД от ёмкости конденсатора C1.

19. Снять амплитудно-частотную характеристику АД в соответствии с параметрами, указанными в табл. 5.5, коэффициенте модуляции $m_{AM} = 0,3$ и амплитуде несущей гармоники $U_c = 1 B$.

20. По данным табл. 5.5 построить зависимость амплитуды основной гармоники U_{mF} от частоты модулирующего колебания F .

Амплитудно-частотная характеристика

F, Гц	U_{mF} , мВ
50	
100	
250	
500	
1000	
2000	
3000	
4000	
5000	
7000	
9000	

21. Изучить работу и измерить основные параметры диодного детектора АМ-сигналов с удвоением напряжения, для этого собрать схему, изображённую на рис. 5.9.

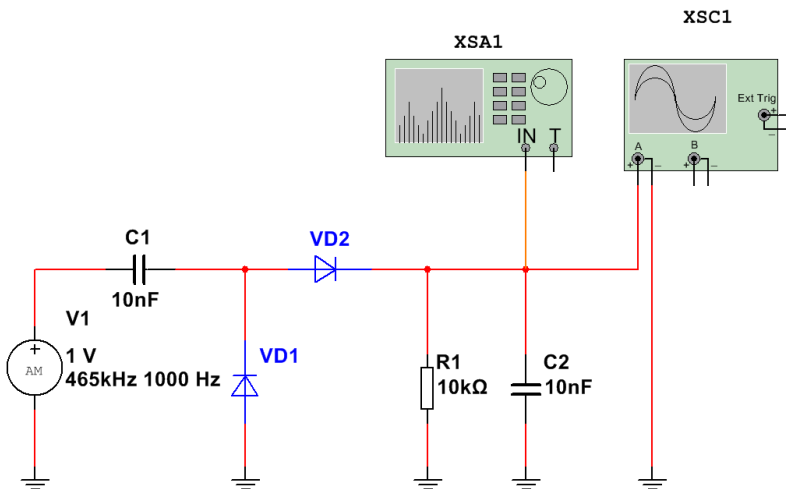


Рис. 5.9. Схема диодного детектора АМ-сигналов с удвоением напряжения

22. Повторить пункты 1–3.
23. Запустить анализ схемы. На рис. 5.10 и рис. 5.11, соответственно, приведены показания и вид органов настройки спектроанализатора и осциллографа.

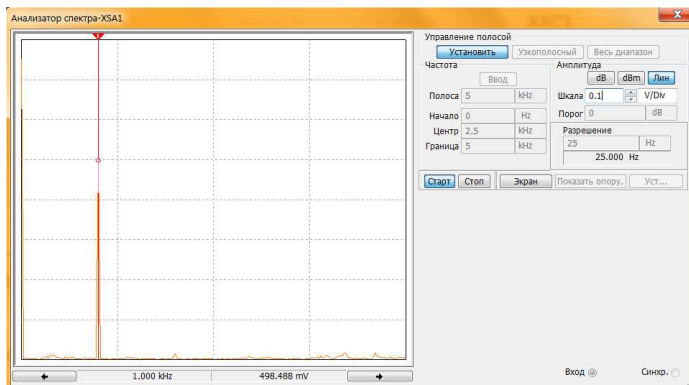


Рис. 5.10. Вид окна и органов настройки спектроанализатора. Окно анализатора: вид частотного спектра сигнала на выходе диодного детектора АМ-сигналов с удвоением напряжения (рис. 5.9), $f = 465$ кГц, $U_c = 1$ В, $F = 1$ кГц, $m_{AM} = 0,3$

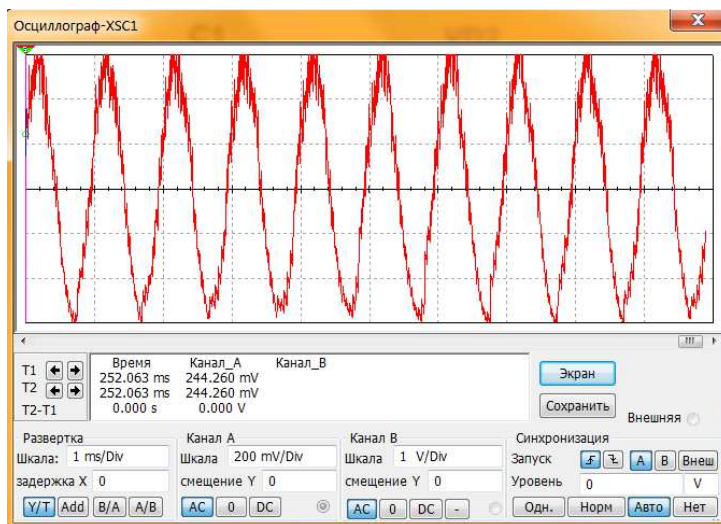


Рис. 5.11. Вид окна и органов настройки осциллографа. Окно осциллографа: вид сигнала на выходе диодного детектора АМ-сигналов с удвоением напряжения (рис. 3.17), $f = 465$ кГц, $U_c = 1$ В, $F = 1$ кГц, $m_{AM} = 0,3$

24. Выполнить пункты 5–20 для схемы, изображённой на рис. 5.9. VD1, VD2 – 1N4148, 1N4151, BA317. 1N914. В пунктах 17 и 18 принять $C1 = 33$ нФ, $C2$ изменять в соответствии со значениями, приведёнными в табл. 5.4.

25. Выполнить отдельные отчёты по изучению последовательного диодного детектора АМ-сигналов и диодного детектора АМ-сигналов с удвоением напряжения.

Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

- 1) титульный лист.
- 2) цель работы.
- 3) схемы диодных амплитудных детекторов.
- 4) таблицы с результатами измерений..
- 5) графики зависимостей $U_{\text{вых0}}(U_{\text{мс}})$, $U_{\text{мф}}(U_{\text{с}})$ и $k_{\Gamma}(m_{\text{АМ}})$.
- 6) рассчитанные значения $S_{\text{д}}$ и θ .
- 7) графики зависимостей $K_{\text{д}}$ и $k_{\phi_{\text{АД}}}$ от ёмкости конденсатора $C1$.
- 8) график зависимости амплитуды основной гармоники $U_{\text{мф}}$ от частоты модулирующего колебания F .
- 9) ответы на контрольные вопросы.
- 10) анализ полученных экспериментальных данных и выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняют амплитудные детекторы и каковы их параметры?
2. По каким признакам классифицируются амплитудные детекторы?
3. Каковы принципы работы и схемы амплитудных детекторов? В чем их достоинства и недостатки?
4. Как определить коэффициент передачи амплитудного детектора на полупроводниковом диоде?
5. Какие искажения возникают при детектировании нелинейной цепью? Какие меры следует предпринимать для уменьшения искажений сигналов?
6. Что определяет коэффициент фильтрации амплитудного детектора?

5.5. Синхронное детектирование АМ-сигналов

Амплитудные детекторы могут быть построены на аналоговых перемножителях совместно с ФНЧ (рис. 5.12) [1].

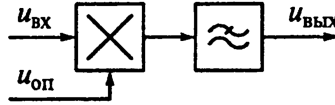


Рис. 5.12. Структурная схема амплитудного синхронного детектора на перемножителе

Если на один из входов перемножителя подаётся напряжение сигнала $u_c(t) = U_c(t)\cos(\omega_c t + \Phi_c)$, на другой – опорное напряжение $u_{оп}(t) = U_{оп}\cos(\omega_{оп}t + \Phi_{оп})$, то на выходе перемножителя с коэффициентом передачи K для синхронного режима $\Phi = \Phi_c = \Phi_{оп}$:

$$u_1(t) = K u_c(t) u_{оп}(t) = 0,5 K U_c(t) U_{мон} [1 + \cos(2\omega_c t + 2\Phi)]. \quad (5.10)$$

На выходе ФНЧ с коэффициентом передачи $K_{ФНЧ}$:

$$u_{вых}(t) = 0,5 K K_{ФНЧ} U_c(t) U_{мон}. \quad (5.11)$$

При наличии фазового сдвига $\psi = |\Phi_c - \Phi_{оп}| \neq 0$ между несущим колебанием и опорным сигналом амплитуда колебания на выходе синхронного детектора будет равна:

$$u_{вых}(t) = 0,5 K K_{ФНЧ} U_c [1 + m_{AM} \cos \Omega t] U_{мон} \cos \psi. \quad (5.12)$$

Из выражения следует, что максимальное значения $u_{вых}(t)$ достигается при величине фазового сдвига $\psi = 2k\pi$, где k – целое число 1, 2, 3 ...

К основным преимуществам синхронного детектора относятся:

- малые нелинейные искажения $u_{вых}(t)$, 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 максимальной частоты F_{max} модулирующего колебания;
- высокое входное и низкое выходное сопротивления, что обеспечивает хорошее согласование с соседними каскадами устройств обработки сигналов.

5.6. Компьютерный практикум. Изучение синхронных детекторов АМ-сигналов

Цель работы: изучение синхронного детектора АМ-сигналов на аналоговом перемножителе и измерение его основных параметров.

Порядок выполнения:

1. Изучить литературу [8-15].
2. Собрать схему в соответствии с рис. 5.13.
3. Установить следующие параметры: генератора АМ-сигналов (V1)

частота несущей гармоники $f_c = 465 \text{ кГц}$,
 амплитуда несущей гармоники $U_c = 0,7 \text{ В}$,
 частота модуляции $F = 1 \text{ кГц}$,
 коэффициент модуляции $m_{AM} = 0,8$;
опорного генератора (V2)
 напряжение $U_{\Gamma} = 5 \text{ В}$,
 частота $f_{\Gamma} = 465 \text{ кГц}$,
 фаза $\varphi = 0^\circ$.

Запустить спектроанализатор (главное меню / Измерители) и осциллограф ((главное меню / Измерители). Выбрать количество точек анализа FFT точек = 32768 (вызов настроек – кнопка Уст...). Установить на спектроанализаторе рабочую полосу от 0 до 5 кГц, центр – 2,5 кГц, разрешение 25 Гц (см. рис. 5.15).

4. Запустить анализ схемы. На рисунках 5.15 и 5.16, соответственно, приведены показания и вид органов настройки спектроанализатора и осциллографа.

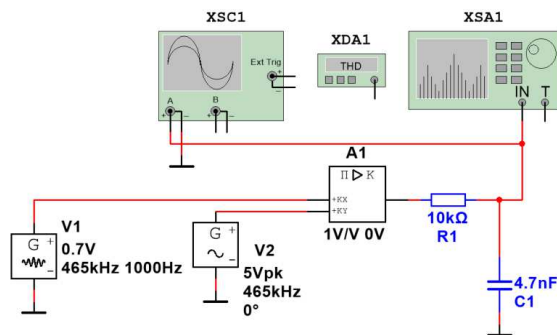


Рис. 5.13. Рабочая схема для изучения синхронного детектора АМ-сигналов на функциональных блоках

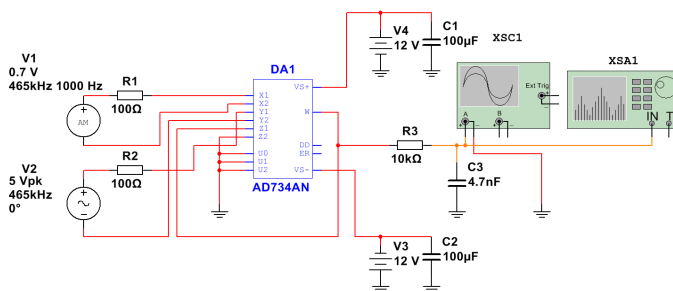


Рис. 5.14. Рабочая схема для изучения синхронного детектора АМ-сигналов на перемножителе AD734AN

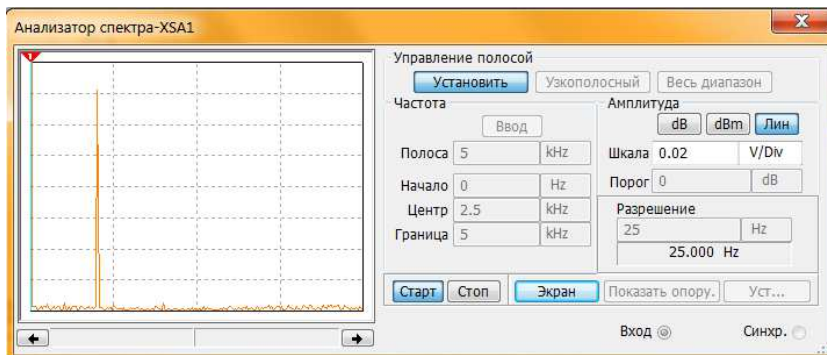


Рис. 5.15. Вид окна и органов настройки спектроанализатора. Окно анализатора: вид частотного спектра сигнала на выходе синхронного детектора АМ-сигналов на перемножителе (рис. 3.21), $f = 465$ кГц, $U_c = 0,7$ В, $F = 1$ кГц, $m_{AM} = 0,8$

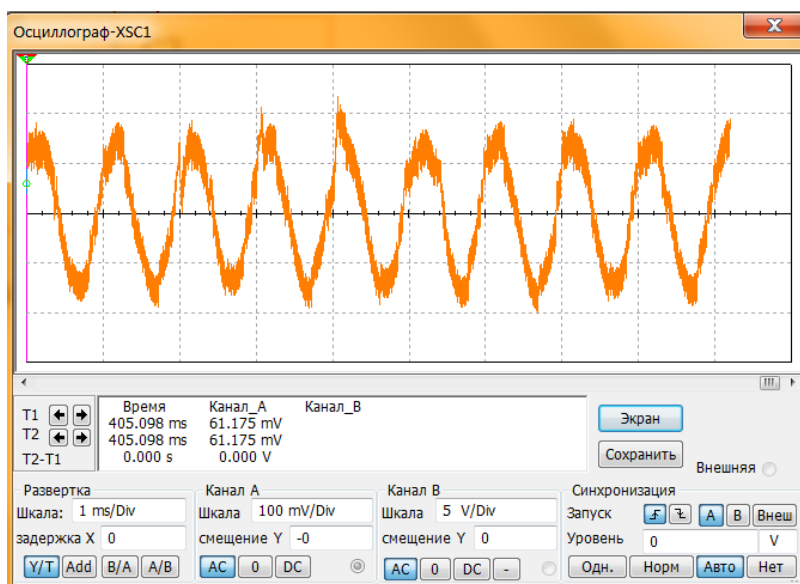


Рис. 5.16. Вид окна и органов настройки осциллографа. Окно осциллографа: вид сигнала на выходе синхронного детектора АМ-сигналов на перемножителе, $f = 465$ кГц, $U_c = 0,7$ В, $F = 1$ кГц, $m_{AM} = 0,8$

5. Установить следующие параметры генератора АМ-сигналов:
 частота несущей гармоники $f = 465$ кГц,
 частота модуляции $F = 0$ кГц,
 коэффициент модуляции $m_{AM} = 0$.

Включить спектроанализатор. Установить на спектроанализаторе рабочую полосу от 0 до 5 кГц, центр – 2,5 кГц, разрешение 25 Гц (см. рис. 5.8).

Изменяя амплитуду несущего колебания U_{mc} , в соответствии с данными табл. 5.6, измерить значение постоянной составляющей $U_{вых0}$ на выходе амплитудного детектора. Результаты занести в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Детекторная характеристика

U_{mc} , В	$U_{вых0}$, В
0,1	
0,2	
0,3	
0,5	
0,6	
0,8	
1,0	
1,2	
1,4	
1,6	
1,8	
2,0	
2,4	
2,7	
3,1	
3,6	
4,1	
4,5	
5,5	

По данным табл. 5.6. построить детекторную характеристику АД, которая представляет собой зависимость постоянного (выпрямленного) выходного напряжения $U_{вых0}$ от амплитуды немодулированного входного сигнала U_{mc} (см. для примера рис. 5.2).

Выделить линейный участок на построенной детекторной характеристике (см. для примера рис. 5.2) и определить крутизну детекторной характеристики диодного АД по формуле (5.9).

6. Изменяя фазу сигнала опорного генератора, в соответствии с данными табл. 5.7, снять зависимость уровня первой гармоники ($F=1$ кГц) U_{mF} от фазы φ опорного сигнала. Используя данные табл. 5.7, построить график зависимости U_{mF} от φ .

Таблица 5.7

$\varphi, ^\circ$	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
$U_{mF}, \text{В}$												
$\varphi, ^\circ$	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
$U_{mF}, \text{В}$												

7. Установить следующие параметры: генератора АМ сигналов (V1)
 частота несущей гармоники $f_c = 465$ кГц,
 амплитуда несущей гармоники $U_c = 0,1$ В,
 частота модуляции $F = 1$ кГц,
 коэффициент модуляции $m_{AM} = 0,3$;
 опорного генератора (V2)
 напряжение $U_\Gamma = 1$ В,
 частота $f_\Gamma = 465$ кГц,
 фаза $\varphi = 0^\circ$.

Таблица 5.8

Зависимости коэффициента гармоник от уровней входного сигнала и сигнала гетеродина

$U_c, \text{В}$	$U_{mF}, \text{мВ}$	$U_{m2F}, \text{мВ}$	$U_{m3F}, \text{мВ}$	$k_\Gamma, \%$
1	2	3	4	5
$U_\Gamma = 1 \text{ В}$				
0,1				
0,25				
0,5				
0,75				
2				
2,5				

1	2	3	4	5
3				
3,5				
4				
$U_{\Gamma} = 2 \text{ В}$				
0,1				
*				
*				
4				
$U_{\Gamma} = 3 \text{ В}$				
0,1				
*				
*				
4				
$U_{\Gamma} = 4 \text{ В}$				
0,1				
*				
*				
4				
$U_{\Gamma} = 5 \text{ В}$				
0,1				
*				
*				
4				

8. Изменяя U_c , в соответствии с данными табл. 5.8, измерить амплитуды гармоник: на модулирующей частоте F (1 кГц) – U_{mF} ; второй гармоники (2 кГц) частоты F – U_{m2F} ; третьей гармоники (3 кГц) частоты F – U_{m3F} . Результат занести в табл. 5.8.

9. По данным табл. 5.8 рассчитать коэффициент гармоник по формуле (5.3), результат занести в табл. 5.8.

10. Повторить пункты 8 и 9 для $U_{\Gamma} = 2, 3, 4, \text{ и } 5 \text{ В}$. Результаты измерений занести в табл. 5.8.

11. Используя данные табл. 5.8, построить семейство графиков зависимости $U_{mF}(U_c)$ при различных значениях амплитуды опорного сигнала U_r .
12. Используя данные табл. 5.8, построить семейство графиков зависимости $k_r(U_c)$ при различных значениях амплитуды опорного сигнала U_r .
13. Изменяя коэффициент модуляции m_{AM} от 0,1 до 1 с шагом 0,05, при $f = 465$ кГц, $U_c = 1$ В, $F = 1$ кГц, $U_r = 3$ В, $f_r = 465$ кГц, измерить амплитуды гармоник U_{mF} , U_{m2F} , U_{m3F} . Рассчитать коэффициент гармоник k_r по формуле 3.11. Результаты измерений и расчётов занести в табл. 5.9.
14. По данным табл. 5.9 построить график зависимости коэффициента гармоник k_r от коэффициента модуляции m_{AM} .

Таблица 5.9

Зависимость коэффициента гармоник от коэффициента модуляции

M	0,1	0,15	0,2	0,95	1
$U_F, В$									
$U_{2F}, В$									
$U_{3F}, В$									
$k_r, \%$									

15. Повторить п. 2–14 для схемы (рис. 5.14). Сравнить результаты измерений.

Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

- 1) титульный лист.
- 2) цель работы.
- 3) схемы синхронных детекторов АМ сигналов на функциональных блоках и перемножителе AD734AN.
- 4) таблицы результатами измерений.
- 5) графики зависимостей по пунктам.
- 6) ответы на контрольные вопросы.
- 7) анализ полученных экспериментальных данных и выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Перечислите особенности синхронных детекторов.
2. Опишите методику измерения детекторной характеристики амплитудного детектора?
3. Какова методика измерения коэффициента передачи детектора?

6. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

6.1. Назначение, классификация, параметры и характеристики частотных детекторов

Частотный детектор (ЧД) представляет собой устройство, напряжение на выходе которого определяется отклонением мгновенной частоты входного сигнала от определенного среднего значения [1]. Частотное детектирование заключается в преобразовании сигнала с ЧМ в линейной системе в колебания с другим видом модуляции. В последующем осуществляется детектирование преобразованного колебания безынерционной нелинейной цепью.

В зависимости от принципа действия различают следующие группы ЧД.

1. Детекторы с частотно-амплитудным преобразованием, в которых осуществляется преобразование колебаний с ЧМ в колебания с АМ с последующим амплитудным детектированием. В этой группе выделяют ЧД с симметричной детекторной характеристикой, которые подразделяются на частотные дискриминаторы и дробные детекторы. В ЧД с отклонение несущей частоты от номинального значения преобразуется в постоянное напряжение, знак которого характеризует направление отклонения в сторону большей или меньшей величины частоты относительно среднего значения. По конструктивному исполнению различают ЧД с расстроенными или настроенными контурами.

2. Детекторы с частотно-фазовым преобразованием, в которых осуществляется преобразование колебаний с ЧМ в колебания с ФМ с последующим фазовым детектированием.

3. Детекторы с частотно-импульсным преобразованием, в которых осуществляется преобразование колебаний с ЧМ в последовательность прямоугольных импульсов, частота которых пропорциональна изменению частоты сигнала с относительно среднего значения частоты настройки контуров. Напряжение на выходе можно сформировать при помощи счетчика импульсов. Такие детекторы называются также импульсносчетными.

4. Детекторы на базе ФАПЧ, которые строятся по структуре систем с ФАПЧ.

В РПрУ широкое распространение получили ЧД с двумя расстроенными контурами, ЧД с настроенными контурами и дробные ЧД. Эти детекторы, выполненные по балансной схеме, имеют более линейные характеристики детектирования, проходящие через 0.

К ЧД предъявляются требования обеспечения максимального коэффициента передачи, максимального входного сопротивления и минимального напряжения сигнальной (промежуточной) частоты на выходе.

В ЧД возможны нелинейные и линейные искажения сигнала. Линейные искажения обусловлены наличием в детекторе инерционных элементов, главным образом емкостей. Нелинейные искажения оцениваются коэффициентом гармоник.

Статическая характеристика частотного детектирования представляет собой зависимость постоянного напряжения на выходе

ЧД $U_{\text{вых0}}$ от частоты f_c немодулированного входного сигнала при постоянной амплитуде $U_{\text{мс}}$ (рис. 6.1).

Качество детектирования определяется шириной линейности рабочего участка характеристики (участок АБ на рис. 6.1).

Рабочей полосой частотной характеристики ПЧД называется полоса (раствор) между экстремальными значениями детекторной характеристики. Частотнозависимые цепи детектора обычно выполняют так, чтобы напряжение $U_{\text{вых0}}$ на частоте f_0 , называемой переходной частотой ЧД, равнялось 0.

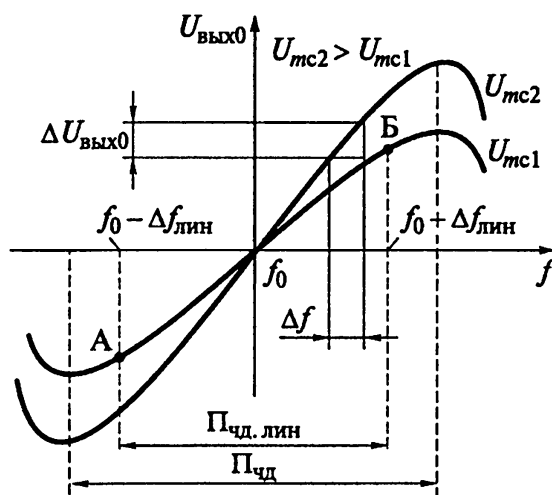


Рис. 6.1. Статическая характеристика частотного детектирования

Эффективность детектирования определяется крутизной статической детекторной характеристики в линейной области и вычисляется по формуле $S_{\text{чд}} = \Delta U_{\text{вых0}} / \Delta f$.

6.2. Компьютерный практикум. Изучение детектора ЧМ-сигналов

Цель работы: изучение основных параметров детектора ЧМ-сигналов.

Порядок выполнения:

1. Собрать рабочую схему для изучения детектора ЧМ сигналов (рис. 6.2).

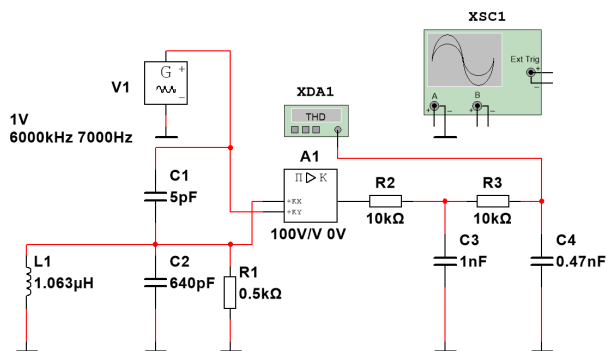


Рис. 6.2. Рабочая схема изучения детектора ЧМ-сигналов (режим измерения коэффициента гармоник)

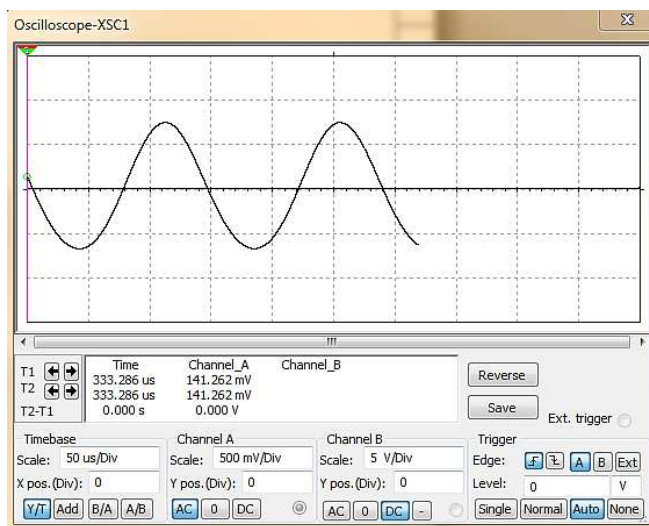


Рис. 6.3. Осциллограмма сигнала на выходе детектора ЧМ-сигналов

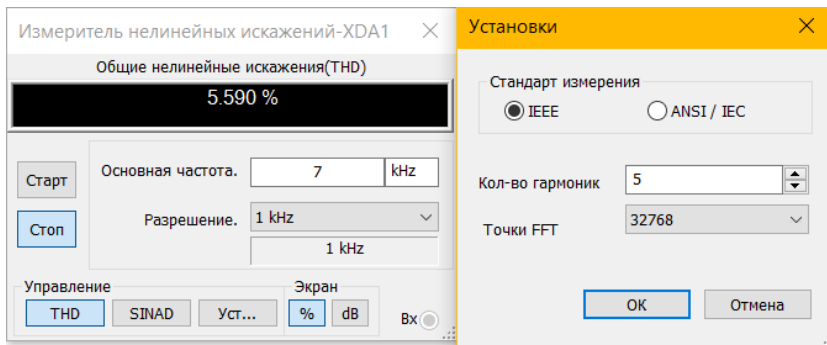


Рис. 6.4. Окно измерителя коэффициента гармоник XDA1 и окно установок

2. Отключить **Измеритель нелинейных искажений XDA1** и подключить **Осциллограф XSC1**. Получить осциллограмму на выходе детектора ЧМ сигналов.

3. Подключить **Измеритель нелинейных искажений XDA1** и отключить **Осциллограф XSC1**. Измерить коэффициент гармоник (рис. 6.4) в зависимости от индекса модуляции и сопротивления R1, в соответствии с табл. 5.10.

Таблица 6.1

Зависимости коэффициента гармоник от индекса модуляции и сопротивления R1

Индекс модуляции, $k_{чм}$	$K_r, \%$ ($R1 = 500\Omega$)	$K_r, \%$ ($R1 = 1\text{ к}\Omega$)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

3. Построить графическую зависимость коэффициента гармоник от индекса модуляции.

4. Установить на генераторе частоту модулирующего сигнала $F_c = 0$ Гц, индекс модуляции – 0. Снять детекторную характеристику (зависимость постоянного напряжения на выходе детектора $U_{вых0}$ от

частоты ЧМ сигнала f_c) частотного детектора при $R1=0,5$ и 1 кОм, устанавливая частоту генератора $V1$ согласно табл. 6.2 и фиксируя значения выходного постоянного напряжения детектора, в установившемся режиме, по показаниям мультиметра ХММ1 (режим измерения постоянного напряжения).

Таблица 6.2

Статическая детекторная характеристика

f_c , кОм	$U_{\text{вых0}}$		f_c , кОм	$U_{\text{вых0}}$	
	$R1=500$ Ом	$R1=1$ кОм		$R1=500$ Ом	$R1=1$ кОм
5800			6020		
5840			6040		
5860			6060		
5880			6080		
5900			6100		
5940			6120		
5960			6140		
5980			6160		
6000			6200		

5. Определите частоту f_{c0} , при которой напряжение на выходе детектора равно нулю и постройте графики детекторных характеристик как зависимостей $U_{\text{вых0}}$ от $\Delta f_c = f_c - f_{c0}$.

Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) рабочую схему для изучения детектора ЧМ сигналов;
- 4) осциллограмму выходного напряжения п.2;
- 5) зависимость коэффициента гармоник от индекса модуляции при значениях $R1 - 500$ ом и 1 кОм;
- 6) статические детекторные характеристики детектора при значениях $R1 - 500$ ом и 1 кОм;
- 7) анализ результатов и выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение детекторов ЧМ сигналов?

2. Перечислите и охарактеризуйте группы ЧМ детекторов.
3. Какие требования предъявляются к ЧМ детекторам?
4. Что такое статическая детекторная характеристика?
5. Как определяется рабочая полоса ЧМ детектора.
6. Какой параметр определяет эффективность ЧМ детектирования?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Румянцев, К.Е. Радиоприёмные устройства: учебник / К.Е. Румянцев. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 336 с.
2. Колосовский, Е.А. Устройства приёма и обработки сигналов: учеб. пособие для вузов / Е.А. Колосовский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 456 с.: ил.
3. Фомин, Н.Н. Радиоприёмные устройства / Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин и др.; под ред. Н.Н. Фомина. – 3-е издание, стереотип. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 520 с.: ил.
4. Головин, О.В. Радиоприёмные устройства / О. В. Головин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 384 с.: ил.
5. Побережский, Е.С. Цифровые радиоприёмные устройства / Е.С. Побережский. – М.: Радио и связь, 1987. – 184 с.: ил.
6. Румянцев К.Е. Приём и обработка сигналов: сборник задач и упражнений / К.Е. Румянцев. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 368 с.
7. Палшков, В.В. Радиоприёмные устройства: учеб. пособие / В.В. Палшков. – М.: Радио и связь, 1984. – 392 с.: ил.
8. Введение в Multisim. Трёхчасовой курс. [Электронный ресурс]. URL: <http://ni.com/russia>
9. Радиоежегодник 2013. Схемотехническое моделирование. Вып. 23. С. 141.
10. Шестеркин, А.Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10 / А.Н. Шестеркин. – М.: ДКМ Пресс, 2012. – 360 с.

Учебное издание

Белоус Игорь Александрович

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ

Практикум

В авторской редакции
Компьютерная верстка М.А. Портновой

Подписано в печать 18.07.2017. Формат 60×84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,88.
Тираж 200 экз. Заказ

Издательство Владивостокского государственного университета
экономики и сервиса
690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41
Отпечатано во множительном участке ВГУЭС
690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41