

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"

Кафедра радиотехники

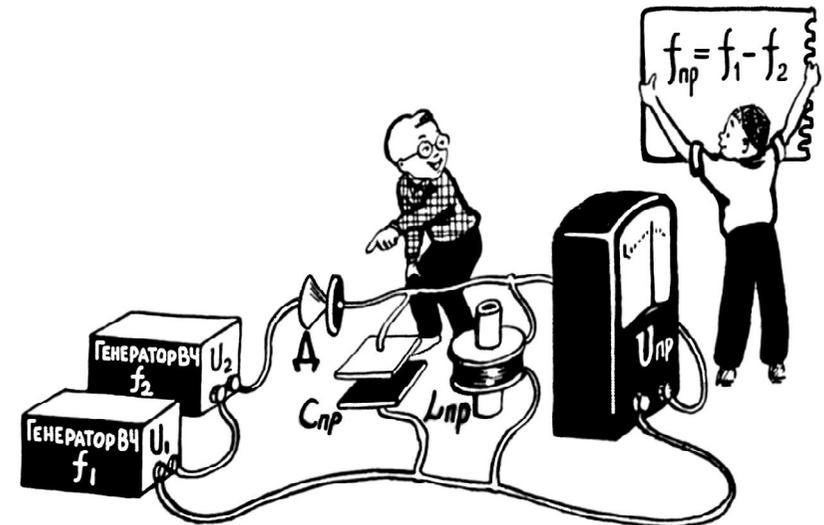
# 53-2016

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам № 5 - 7

по дисциплине "Радиотехнические цепи и сигналы"  
для студентов направления 11.03.01 "Радиотехника"  
(профиль "Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов") очной формы обучения



Воронеж 2016

Составитель д-р техн. наук А.В. Останков

УДК 621.376

Преобразование сигналов в нелинейных радиотехнических цепях: методические указания к лабораторным работам № 5 - 7 по дисциплине "Радиотехнические цепи и сигналы" для студентов направления 11.03.01 "Радиотехника" (профиль "Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов") очной формы обучения / ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"; сост. А.В. Останков. Воронеж, 2016. 34 с.

Методические указания содержат описание трёх работ, входящих в лабораторный практикум по дисциплине "Радиотехнические цепи и сигналы" и относящихся к разделу "Преобразование сигналов в нелинейных радиотехнических цепях". Лабораторные работы ориентированы на выполнение методами физического моделирования на стендах и имитационного моделирования на компьютерах.

Табл. 7. Ил. 9. Библиогр.: 7 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доц. В.П. Литвиненко

Ответственный за выпуск зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. Б.В. Матвеев

Печатается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет", 2016

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Основной целью лабораторных занятий по дисциплине "Радиотехнические цепи и сигналы" является проверка, углубление и закрепление основных теоретических положений, приобретение новых знаний практического характера, освоение методики ведения экспериментальных исследований, получения навыков работы с измерительной аппаратурой, вычислительной техникой и современными программами математического моделирования.

Рабочей программой дисциплины "Радиотехнические цепи и сигналы" предусматривается выполнение 12-ти лабораторных работ — четырёх работ в пятом и пяти работ в шестом семестрах. Описание работ № 5, 6 и 7 содержится в настоящем руководстве, остальных — в руководствах других изданий.

Перед непосредственным выполнением каждой лабораторной работы студент обязан выполнить домашнее задание. Выполнению экспериментальной части лабораторной работы предшествует процедура допуска — проверки подготовленности студента, в том числе наличия домашнего задания.

Приступать к выполнению экспериментальных исследований можно только после разрешения преподавателя, соблюдая при этом правила техники безопасности. По окончании работы необходимо предъявить результаты исследований преподавателю. После одобрения преподавателем полученных результатов следует выключить базовый блок установки и измерительные приборы, привести в порядок рабочее место.

Защита каждой лабораторной работы предполагает объяснение полученных экспериментальных результатов, ответы на теоретические вопросы и решение микрозадач, связанных с тематикой проведённых исследований. Зачёт по проделанной работе должен быть получен до начала следующей лабораторной работы.

## Лабораторная работа № 5

### АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ СМЕЩЕНИЕМ

**Цель работы** — экспериментально исследовать физические процессы в нелинейном резонансном усилителе с управляемым напряжением смещения.

#### Описание лабораторной установки

Работа выполняется на сменном блоке, верхняя панель которого (с сокращениями, не затрагивающими данную работу) показана на рис. 1. Исследуемая цепь представляет собой амплитудный модулятор, реализованный на основе транзисторного резонансного усилителя. Предполагается, что усилитель работает в нелинейном режиме, при котором проходную характеристику транзистора – зависимость тока коллектора  $i_K$  от напряжения между базой и эмиттером  $u_B$  – целесообразно аппроксимировать кусочно-линейной функцией с начальным напряжением  $U_H$  и крутизной  $S$ . Роль усиливаемого сигнала, поступающего на вход схемы (к клеммам  $\Gamma_1$ ) от внешнего высокочастотного генератора, исполняет гармоническое колебание  $u_{ВЧ}(t) = U_{\omega} \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t)$  частотой 150 ... 220 кГц, которое служит основой для формирования несущей АМ-колебания. Модуляция в усилителе осуществляется за счёт изменения во времени напряжения смещения  $u_{СМ}(t)$  на базе транзистора по закону модулирующего гармонического колебания  $u_{НЧ}(t) = U_{\Omega} \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t)$  частотой 300 ... 500 Гц, подаваемого на клеммы  $\Gamma_2$  от внешнего низкочастотного генератора. Меняющееся во времени относительно величины  $U_{Б0}$  напряжение смещения  $u_{СМ}(t) = U_{Б0} + u_{НЧ}(t)$  обеспечивает текущую вариацию угла отсечки  $\Theta$  коллекторного тока, что приводит к изменению во времени амплитуды его первой гармоники  $I_{K1}$ . Благодаря избирательным свойствам колебательного контура, настроенного на частоту первой гармоники тока, амплитуда напряжения на контуре  $U_K(t)$  приобрета-

ет форму модулирующего напряжения  $u_{НЧ}(t)$ . Временные диаграммы, отражающие принцип амплитудной модуляции смещением, приведены на рис. 2.

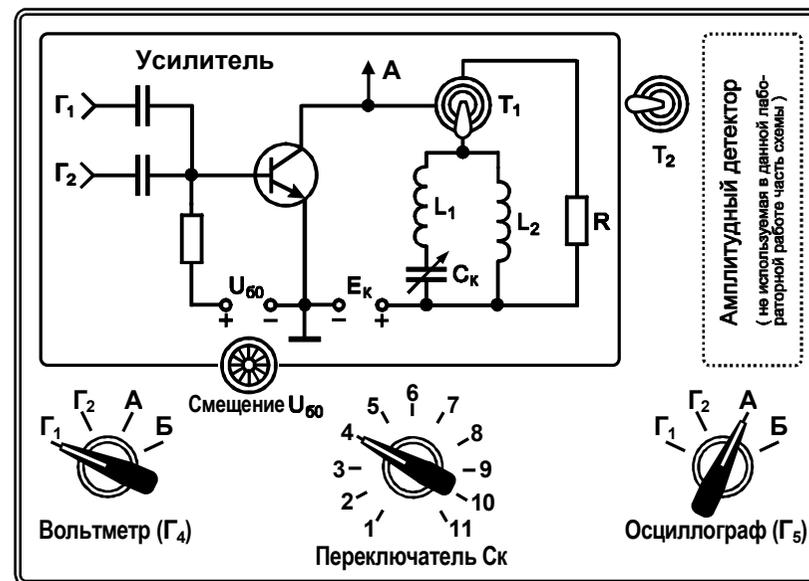


Рис. 1. Передняя панель сменного блока к пятой работе

Постоянная составляющая напряжения смещения на базе транзистора  $U_{Б0}$ , определяющая положение рабочей точки на проходной ВАХ транзистора, регулируется ручкой "Смещение  $U_{Б0}$ " и измеряется вольтметром, размещенным непосредственно на панели блока питания (предел шкалы равен 2 В). Запитывается модулятор от источника напряжения  $E_K = 6.3$  В.

В работе предусмотрена возможность замены резонансной нагрузки резистивной (тумблер  $T_1$ ), что дает возможность наблюдать осциллограммы выходного тока модулятора.

Напряжение с выхода модулятора поступает на клеммы  $\Gamma_5$  при условии перевода переключателя "Осциллограф" в положение "А". Уровни модулируемого  $u_{ВЧ}(t)$  и модулирующего

$u_{нч}(t)$  напряжений следует фиксировать внешним вольтметром на клеммах  $\Gamma_4$ , при этом переключатель "Вольтметр" должен быть переведен в положение " $\Gamma_1$ " или " $\Gamma_2$ " (рис. 1).

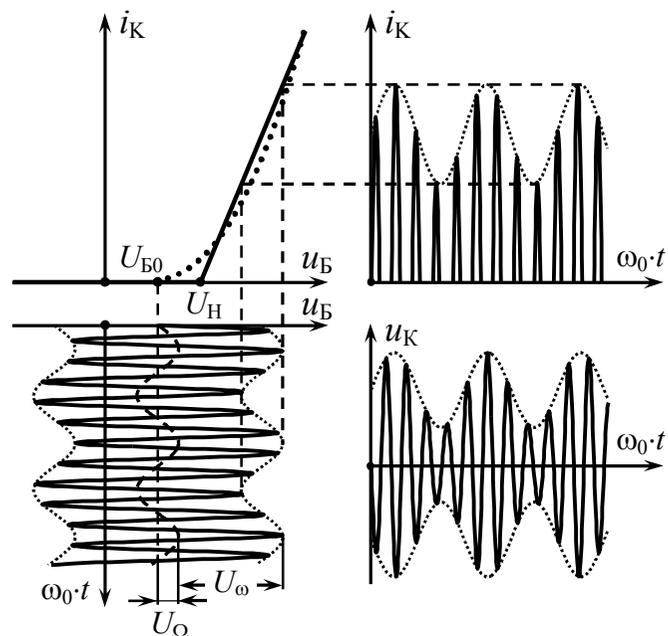


Рис. 2. Графики, поясняющие работу нелинейного резонансного усилителя при гармонической модуляции смещением

## Подготовительное (домашнее) задание

### 1. Расчёт модуляционных характеристик

Начертить схему амплитудного модулятора с модуляцией смещением на базу. Полагая, что напряжение излома проходной ВАХ транзистора  $U_H = 0.6$  В, а значение её крутизны  $S$  приведено в табл. 1, рассчитать и построить модуляционные характеристики модулятора для двух значений амплитуды модулируемого напряжения  $U_\omega = 0.4$  и  $0.6$  В.

Таблица 1

Исходные данные для выполнения домашнего задания

Номер варианта	$S$ , мА/В	$R_{кЭ}$ , кОм	Номер варианта	$S$ , мА/В	$R_{кЭ}$ , кОм
1	1.3	10.2	6	1.0	13.4
2	1.2	12.2	7	1.0	13.7
3	1.3	12.6	8	1.1	11.7
4	1.2	12.5	9	1.0	13.0
5	1.4	11.2	10	1.5	10.4

Комментарий к выполнению задания состоит в следующем. Модуляционной характеристикой амплитудного модулятора называют зависимость амплитуды первой гармоники выходного колебания (напряжения на контуре  $U_K$ ) от статического напряжения смещения  $U_{B0}$  (соответствующего условию  $u_{нч}(t) = 0$ ) при постоянной амплитуде модулируемого высокочастотного напряжения  $U_\omega$ . Для заданной аппроксимации ВАХ модуляционную характеристику можно рассчитать по формуле

$$U_K = S \cdot R_{кЭ} \cdot \gamma_1(\Theta) \cdot U_\omega, \quad (1)$$

где  $R_{кЭ}$  — эквивалентное резонансное сопротивление колебательного контура, настроенного на частоту  $f_0$  (табл. 1);

$$\gamma_1(\Theta) = \frac{\Theta - \sin \Theta \cdot \cos \Theta}{\pi} \quad \text{— коэффициент Берга;}$$

$$\Theta = \arccos \frac{U_H - U_{B0}}{U_\omega} \quad \text{— угол отсечки выходного тока.}$$

Область определения модуляционной характеристики задаётся условием  $\Theta \in [0^\circ; 180^\circ]$ , что, очевидно, соответствует неравенству  $U_H - U_\omega \leq U_{B0} \leq U_H + U_\omega$ . Результаты расчёта — девять точек для каждого значения амплитуды модулируемого напряжения  $U_\omega$  — необходимо внести в таблицу. Характеристики изобразить графически (каждую — в отдельной системе координат).

## 2. Расчёт условий режима линейной модуляции

Считая, что на вход модулятор подается высокочастотное напряжение амплитудой  $U_{\omega} = 0.6$  В, рассчитать максимальную амплитуду  $U_{\Omega \max}$  модулирующего колебания и напряжение смещения  $U_{B0 \text{ опт}}$ , при которых обеспечивается режим линейной амплитудной модуляции.

Полагая напряжение смещения  $U_{B0}$  равным напряжению излома проходной ВАХ транзистора  $U_H$ , а амплитуды модулируемого  $U_{\omega}$  и модулирующего  $U_{\Omega}$  колебаний одинаковыми, изобразить ожидаемую осциллограмму выходного напряжения  $u_K(t)$  для случаев, когда нагрузкой модулятора служат: а) резонансный контур; б) резистор.

*Комментарий к выполнению первой части задания* состоит в следующем. Модуляционная характеристика определяет условия линейного режима работы модулятора. Рабочую точку, соответствующую режиму "молчания" (условию отсутствия  $u_{HЧ}(t)$ ), следует выбирать на середине её линейного участка. Теоретически это означает, что оптимальная величина смещения должна быть равна напряжению излома проходной ВАХ транзистора:  $U_{B0 \text{ опт}} = U_H$ . Тогда для обеспечения минимальных нелинейных искажений амплитуда модулирующего колебания  $U_{\Omega}$  не должна превышать  $U_{\omega}/2$ . Результаты расчёта необходимо внести в отдельную таблицу, в которой следует предусмотреть графу для экспериментальных данных.

Ожидаемые осциллограммы напряжения на выходе модулятора могут быть получены в соответствии с методикой, использованной при построении графиков на рис. 2.

## 3. Расчёт коэффициента модуляции

Полагая, что статическое напряжение смещения модулятора  $U_{B0}$  соответствует середине линейного участка модуляционной характеристики, амплитуда модулируемого колебания

$U_{\omega} = 0.6$  В, частота модулирующего сигнала  $F$  такова, что сопротивление контура боковым спектральным составляющим амплитудно-модулированного тока практически не отличается от резонансного, рассчитать и построить зависимость коэффициента модуляции выходного напряжения  $M_U$  от амплитуды модулирующего колебания  $U_{\Omega}$ .

Описать методику оценки коэффициента модуляции по осциллограмме модулированного колебания.

*Комментарий к выполнению задания* состоит в следующем. Если частота  $F$  модулирующего гармонического колебания  $U_{\Omega} \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t)$  мала по сравнению с полосой пропускания эквивалентного контура (резонансного усилителя), можно считать, что искомый коэффициент модуляции выходного напряжения  $M_U$  совпадает по величине с коэффициентом модуляции первой гармоники тока модулятора  $M_1$ . Зависимость  $M_1$  от амплитуды модулирующего напряжения  $U_{\Omega}$  можно рассчитать, воспользовавшись простой формулой:

$$M_1 = \frac{I_{K1 \max} - I_{K1 \min}}{I_{K1 \max} + I_{K1 \min}}, \quad (2)$$

где  $I_{K1 \max}$  и  $I_{K1 \min}$  — максимальное и минимальное значения амплитуды первой гармоники выходного тока модулятора. При выборе рабочей точки на середине линейного участка модуляционной характеристики ( $U_{B0} = U_H$ ) значения  $I_{K1 \max}$  и  $I_{K1 \min}$  определяются следующим образом:

$$I_{K1 \max} = S \cdot U_{\omega} \cdot \gamma_1 \left[ \arccos \left( -\frac{U_{\Omega}}{U_{\omega}} \right) \right], \quad (3)$$
$$I_{K1 \min} = S \cdot U_{\omega} \cdot \gamma_1 \left[ \arccos \left( +\frac{U_{\Omega}}{U_{\omega}} \right) \right].$$

Амплитуду  $U_{\Omega}$  изменять в пределах от 0 до  $1.2 \cdot U_{\omega}$  с шагом  $0.1 \cdot U_{\omega}$ . Результаты внести в таблицу и отразить графически.

## Лабораторные задания и методические указания по их выполнению

### 1. Исследование модуляционных характеристик модулятора

Включить измерительные приборы: генераторы ГЗ-33 и АНР-1001, вольтметр АВМ-1071 и осциллограф АСК-1021\*. Дать приборам прогреться. Подготовить сменный лабораторный блок к работе: 1) тумблер  $T_2$  переключить в левое положение; 2) переключатель "Ск" перевести в положение, соответствующее номеру варианта; 3) переключатель "Вольтметр" установить в положение " $\Gamma_1$ ", переключатель "Осциллограф" – в положение "А"; 4) тумблер  $T_1$  переключить в нижнее положение "Контур"; 5) к гнездам  $\Gamma_5$  подключить спаренные вольтметр и осциллограф; 6) к гнездам  $\Gamma_1$  подключить генератор ВЧ, в роли которого использовать генератор ГЗ-33 (генератор НЧ – АНР-1001 – при выполнении задания к  $\Gamma_2$  не подключать!).

Установить на базе транзистора постоянное напряжение смещения около 1 В. Обеспечить на выходе генератора ВЧ уровень гармонического напряжения около 20 - 40 мВ и, изменяя его частоту в пределах от 150 до 220 кГц, добиться совпадения частоты ВЧ колебаний с резонансной частотой контура. Увеличить уровень ВЧ колебания так, чтобы его амплитуда составила 0.6 В, а действующее значение, фиксируемое вольтметром на клеммах  $\Gamma_4$ , — примерно 0.85 В. Плавно изменяя напряжение смещения в доступных пределах, убедиться по осциллограмме, что амплитуда выходного напряжения не остается постоянной, т.е. амплитудная модуляция возможна.

Снять модуляционные характеристики для двух значений амплитуды высокочастотного колебания  $U_\omega = 0.6$  В и 0.4 В: из-

---

\* Описание измерительных приборов и рекомендации по работе с ними приведены в приложении к методическим указаниям № 354-2015.

меня постоянное напряжение смещения  $U_{Б0}$  в пределах от  $U_H - U_\omega$  до  $U_H + U_\omega$  с шагом не более 0.1 В, измерять амплитуду напряжения на выходе модулятора  $U_K$ . Особенно тщательно (с малым шагом) следует фиксировать показания на краях указанного интервала. Учесть, что шкала вольтметра проградуирована в действующих значениях напряжения. Результаты измерений оформить в таблицу. Полученные экспериментально характеристики построить в одной системе координат с расчётными характеристиками.

Прокомментировать степень соответствия теоретических и экспериментальных результатов. Дать рекомендации по выбору параметров модулятора (напряжения смещения, амплитуды модулирующего напряжения и т.п.), обеспечивающих удовлетворительное качество его работы.

### 2. Определение условий обеспечения линейной модуляции

Получить на выходе модулятора АМ - колебание. Для этого установить амплитуду (не действующее значение!) модулируемого ВЧ колебания  $U_\omega = 0.6$  В, подать от НЧ генератора через гнезда  $\Gamma_2$  модулирующее напряжение частотой 400 Гц и амплитудой  $U_\Omega \approx 0.4 \cdot U_\omega$ . Изменяя напряжение смещения  $U_{Б0}$  и анализируя осциллограмму АМ - колебания, зафиксировать оптимальное значение смещения  $\tilde{U}_{Б0 \text{ опт}}$ , т.е. такое, при котором обеспечиваются минимальные искажения огибающей АМ - колебания (режим линейной модуляции). Найденное значение  $\tilde{U}_{Б0 \text{ опт}}$  занести в таблицу и сравнить с рассчитанным теоретически. Осциллограмму выходного напряжения для режима линейной модуляции зарисовать\*.

---

\* Учитывая наличие у студентов мобильных телефонов с цифровыми камерами, рекомендуется приводить в отчёте не рисунки, а *фотографии* осциллограмм. При этом следует оцифровать деления осей показанных на фотографиях сигналов.

Плавнo увеличивая модулирующее НЧ напряжение, оценить его максимальную амплитуду  $\tilde{U}_{\Omega \max}$ , т.е. такую предельную амплитуду напряжения, превышение которой приводит к визуально фиксируемому нелинейным искажениям огибающей АМ-сигнала на выходе модулятора. Зафиксировать значение максимальной амплитуды  $\tilde{U}_{\Omega \max}$  в отчёт и сравнить с расчётным значением. Сделать вывод.

Не меняя напряжение смещения ( $U_{B0} = \tilde{U}_{B0 \text{ опт}}$ ), увеличить амплитуду модулирующего НЧ напряжения до значения, равного амплитуде модулируемого ВЧ колебания:  $U_{\Omega} \approx U_{\omega}$ . Зафиксировать осциллограммы выходного напряжения как для резонансной, так и для резистивной нагрузки (тумблер  $T_1$  – в верхнем положении). Визуально оценить возникающие искажения огибающей амплитуд. При разной степени искажений максимума и минимума огибающей амплитуды выяснить и указать причину этого различия.

Тумблером  $T_1$  вновь включить резонансную нагрузку модулятора. Уменьшить амплитуду модулирующего НЧ напряжения до значения  $U_{\Omega} \approx 0.5 \cdot U_{\omega}$  и одновременно увеличить постоянное напряжение смещения, положив  $U_{B0} = U_H + U_{\omega}$ . Обратит внимание на возникающие искажения АМ-колебания и установить их причину (для этого может оказаться полезной замена резонансной нагрузки резистивной). Осциллограммы выходного напряжения и тока зафиксировать. Уменьшить напряжение смещения  $U_{B0}$  до значения  $U_H - U_{\omega}$ . Оценить возникающие искажения огибающей амплитуд, выяснить и указать их причину. Осциллограмму выходного напряжения вновь зафиксировать. Провести анализ полученных результатов. Сделать предварительные выводы.

Дать рекомендации по выбору режима работы модулятора (напряжения смещения, амплитуды модулирующего напряжения и т.п.), который бы обеспечил формирование амплитудной модуляции с наименьшими искажениями.

### 3. Исследование зависимости коэффициента модуляции от амплитуды модулирующего колебания

Установить напряжение смещения  $U_{B0}$  равным оптимальному значению  $\tilde{U}_{B0 \text{ опт}}$ , подобранному экспериментально в предыдущем пункте. Обеспечить амплитуду (не действующее значение!) модулируемого ВЧ колебания  $U_{\omega}$  равной 0.6 В, модулирующего НЧ колебания —  $U_{\Omega} \approx 0.4 \cdot U_{\omega}$ , и получить на выходе модулятора неискаженное амплитудно-модулированное колебание с частотой модуляции 400 Гц.

Снять экспериментальную зависимость коэффициента модуляции  $\tilde{M}_U$  выходного напряжения модулятора от амплитуды модулирующего колебания  $U_{\Omega}$ , изменяя амплитуду  $U_{\Omega}$  от нуля до  $1.2 \cdot U_{\omega}$  с шагом  $0.1 \cdot U_{\omega}$  и фиксируя максимальный  $A_{\max}$  и минимальный  $A_{\min}$  размах по вертикали выходного напряжения. Данные внести в таблицу, значения коэффициента модуляции для текущей амплитуды  $U_{\Omega}$  рассчитать по формуле:

$$\tilde{M}_U = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}. \quad (4)$$

Экспериментальную зависимость  $\tilde{M}_U(U_{\Omega})$  нанести на график расчётной. Дать сравнительную оценку теоретическим и экспериментальным результатам. По экспериментальной характеристике оценить интервал значений амплитуды модулирующего колебания  $U_{\Omega}$ , определяющий режим неискаженной модуляции. Установить причину загиба исследуемой зависимости при больших значениях амплитуды  $U_{\Omega}$ .

#### Контрольные вопросы к защите работы

1. Почему режим работы транзистора при модуляции смещением должен быть нелинейным? Чему будет равен коэффициент модуляции первой гармоники коллекторного тока,

если мгновенное напряжение на базе не будет выходить за пределы линейного участка проходной ВАХ транзистора?

2. Изобразите временные диаграммы напряжения между базой и эмиттером, коллекторного тока и напряжения между коллектором и эмиттером при использовании в качестве нагрузки модулятора: а) избирательного фильтра, б) резистора.

3. Почему напряжение смещения, определяющее положение рабочей точки модулятора, должно соответствовать середине линейного участка модуляционной характеристики?

4. Можно ли при модуляции смещением получить неискаженную по форме амплитудно-модулированную первую гармонику тока с единичным коэффициентом модуляции?

5. Как изменится модуляционная характеристика с изменением: а) постоянного напряжения смещения на базе транзистора? б) амплитуды модулируемого колебания? в) резонансного сопротивления контура?

6. В модуляторе смещением подобран режим неискаженной модуляции. Как изменится временная диаграмма выходного напряжения, если значительно увеличить: а) напряжение смещения? б) амплитуду напряжения высокой частоты?

7. Для чего в амплитудном модуляторе нужен избирательный фильтр? Из каких соображений следует выбирать частоту настройки и полосу пропускания фильтра?

8. Транзистор, используемый в амплитудном модуляторе, обладает характеристикой с изломом в точке 0.6 В. Амплитуда несущего колебания на входе 0.4 В, амплитуда модулирующего сигнала 0.1 В, постоянное напряжение смещения 0.6 В. Рассчитать коэффициент амплитудной модуляции первой гармоники выходного тока. Можно ли его увеличить за счёт увеличения крутизны характеристики транзистора?

**Литература:** [1, с. 254-255], [2, с. 362-364], [3, с. 255-257], [4, с. 283-284], [5, с. 223-227], [6, с. 79-81], [7, с. 29-34].

## Лабораторная работа № 6

### ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

**Цель работы** — экспериментально исследовать процессы, происходящие при диодном детектировании амплитудно-модулированных колебаний.

#### Описание лабораторной установки

Работа выполняется методом моделирования на компьютере. Вид виртуальной установки показан на рис. 3.

По умолчанию ко входу детектора подключен идеальный амплитудный модулятор ("Modulat"), который и является источником детектируемого АМ-напряжения  $e_{AM}(t)$  (переключатель, управляемый клавишей "I", установлен в нижнее положение). Требуемые частота ( $f_0$ ) и амплитуда ( $U_0$ ) несущего высокочастотного колебания, а также коэффициент амплитудной модуляции ( $M$ ), определяющий глубину модуляции, обеспечиваются посредством вынесенных из модулятора источников " $f_0$ ", " $S_0$ " и " $M$ " (один вольт источника " $f_0$ " соответствует одному герцу несущей частоты). Управляющий амплитудой несущего колебания низкочастотный сигнал вырабатывается источником "Function Generator", подключенным ко входу модулятора. Панель управляющего источника также показана на рис. 3.

Наблюдение и регистрация временных диаграмм колебаний производится осциллографом, подключаемым к разным точкам схемы детектора с помощью коммутатора "Switch". Напряжение, снимаемое с левого верхнего вывода коммутатора, соответствует входному. На правый верхний вывод коммутируется выходное напряжение детектора. Подключившись к центральному верхнему выводу, можно изучить форму напряжения на диоде, напряжение на нижнем выводе прямо пропорционально значениям тока диода (с коэффициентом 10 В/А).

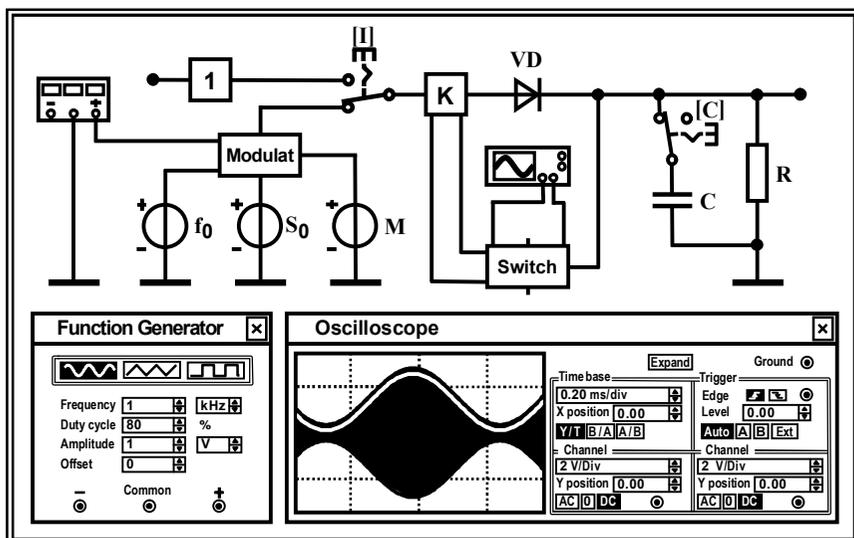


Рис. 3. Вид основной части установки к шестой работе

## Подготовительное (домашнее) задание

### 1. Расчёт ёмкости фильтра на выходе детектора

Начертить исследуемую в работе схему диодного амплитудного детектора.

Полагая, что величина сопротивления  $R$  фильтра на выходе детектора задана (табл. 2), рассчитать величину ёмкости  $C$  фильтра, обеспечивающую неискажённое детектирование АМ-напряжения с заданными (табл. 2) частотой несущей  $f_0$ , частотой модуляции  $F$  и коэффициентом модуляции  $M$ .

Полагая, что ёмкость  $RC$ -фильтра значительно а) меньше, б) больше рассчитанного значения, изобразить предполагаемую форму напряжения на выходе детектора.

Комментарий к выполнению задания состоит в следующем. Постоянная времени  $RC$ -фильтра на выходе детектора выбирается так, чтобы обеспечить неискаженное воспроизведение огибающей АМ-колебаний ( $RC \ll 1/F$ ) и необходимое

сглаживание высокочастотных пульсаций ( $RC \gg 1/f_0$ ). Если частота несущей  $f_0$  значительно превышает частоту модуляции  $F$ , так что  $f_0/F \gg 1$ , то искомая ёмкость фильтра  $C$  определяется из условия минимизации искажений, обусловленных инерционностью детектора при максимальных значениях коэффициента  $M$  и частоты  $F$  модуляции:

$$C \leq \sqrt{1-M^2} / (2\pi \cdot F \cdot R \cdot M). \quad (5)$$

Если постоянная времени  $RC$ -фильтра слишком мала, то для напряжения на выходе детектора характерны высокочастотные пульсации. Если величина произведения  $RC$  чрезмерно велика, то при уменьшении амплитуды детектируемого напряжения конденсатор  $C$  не успевает разряжаться через резистор  $R$ , и напряжение на выходе детектора не отслеживает изменение амплитуды входного колебания.

Таблица 2

Исходные данные для выполнения шестой работы

Номер варианта	Параметры						
	детектируемого АМ-колебания			элементов детектора:			
	$f_0$ , кГц	$F$ , Гц	$M$	фильтра	диода		
			$R$ , кОм	$RS$ , Ом	$IS$ , А	$S$ , мА/В	
1	100	100	0.80	100	6	1e-06	3.6
2	200	200	0.75	80	5	5e-06	4.9
3	300	300	0.70	60	4	1e-05	7.2
4	400	400	0.65	40	3	5e-05	13.1
5	500	500	0.60	20	2	1e-04	29.0
6	600	400	0.55	10	3	5e-05	39.5
7	500	300	0.50	30	2	1e-05	14.4
8	400	200	0.45	50	3	5e-06	7.9
9	300	100	0.40	70	4	1e-06	4.7
10	200	050	0.35	90	5	5e-07	3.4

## 2. Расчёт детекторной характеристики детектора

По заданной крутизне  $S$  характеристики диода и сопротивлению нагрузки детектора  $R$  (табл. 2) рассчитать и построить детекторную характеристику амплитудного детектора.

*Комментарий к выполнению задания.* Детекторная характеристика диодного детектора, под которой подразумевают зависимость постоянной составляющей напряжения на выходе детектора  $\bar{U}$  от амплитуды  $U_\omega$  высокочастотного входного напряжения, может быть приближённо рассчитана по формуле:

$$\bar{U} = U_\omega \cdot \cos\Theta, \quad (6)$$

где  $\Theta$  — угол отсечки тока диода, величина которого существенно зависит лишь от параметров схемы:

$$\Theta \approx \sqrt[3]{3 \cdot \pi / (S \cdot R)}, \quad (7)$$

где  $S$  — крутизна ВАХ диода. Отыскав угол отсечки тока, расчёт выполнять по формуле (6), полагая, что амплитуда  $U_\omega$  на входе детектора принимает значения из интервала  $0 \dots 2$  В.

## 3. Расчёт входного сопротивления детектора

Рассчитать среднее по первой гармонике входное сопротивление диодного амплитудного детектора.

*Комментарий к выполнению задания* состоит в следующем. При малом по сравнению с сопротивлением нагрузки  $R$  прямом сопротивлении диода и  $\cos\Theta \approx 1$  входное сопротивление детектора составляет  $R_{вх1} \approx \frac{1}{2} \cdot R$ . Если учитывать найденное значение угла отсечки, то  $R_{вх1} = [(\operatorname{tg}\Theta - \Theta) / (\Theta - \sin 2\Theta)] \cdot R$ .

Для реализации измерения входного сопротивления детектора следует рассчитать параметры  $L_k$ ,  $C_k$ ,  $r$  колебательного контура, шунтируемого детектором, так чтобы резонансная частота контура была равна частоте несущей  $f_0$ , характери-

стическое сопротивление имело значение в пределах от 200 до 500 Ом, а добротность составляла 50.

## Лабораторные задания и методические указания по их выполнению

### 1. Исследование влияния постоянной времени RC-фильтра на искажения при детектировании

Загрузить схемный файл "Diode\_amplitude\_detector.ewb".

Установить параметры детектируемого АМ-колебания в соответствии с табл. 2 и номером варианта (№): частоту несущей  $f_0$  (источник "f<sub>0</sub>"), частоту  $F$  модулирующего гармонического напряжения (Frequency на панели "Function Generator"), коэффициент амплитудной модуляции  $M$  (источник "M"). Амплитуду модулирующего напряжения (Amplitude) указать равной 1 В: при этом реализуемый коэффициент модуляции будет соответствовать установленному значению.

Установить в соответствии с табл. 2 и номером варианта параметры диода (модель "Ideal") — обратный тепловой ток "Saturation current (IS)" и сопротивление диода постоянному току в прямом направлении "Ohmic resistance (RS)" — и величину сопротивления  $R$  нагрузки детектора.

Установить ёмкость RC-фильтра на выходе детектора, равной рассчитанному в домашнем задании значению.

Выполнить моделирование работы детектора. Изучить осциллограмму напряжения на выходе детектора. Если для выходного напряжения характерны значительные высокочастотные пульсации, как, например, показано на рис. 4,а, то постоянная времени RC-фильтра слишком мала, и ёмкость  $C$  следует увеличить. Если из осциллограммы видно, что с уменьшением амплитуды детектируемого напряжения конденсатор  $C$  не успевает разряжаться через сопротивление  $R$ , и напряжение на выходе не отслеживает изменение амплитуды входного напряжения (рис. 4,б), то величина ёмкости  $C$  слишком велика.

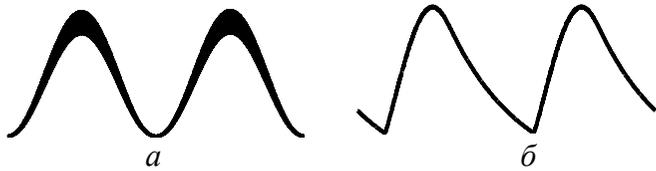


Рис. 4. Напряжение на выходе детектора при неправильно подобранной ёмкости фильтра

Изменяя ёмкость в окрестности установленного значения, выяснить, при каком его значении искажения выходного сигнала детектора минимальны. Уточненное в ходе эксперимента значение ёмкости конденсатора указать в отчёте. Зарисовать осциллограммы сигналов на входе и выходе детектора.

Подключить канал "А" осциллографа к среднему верхнему выводу, а затем к нижнему выводу коммутатора "Switch" (канал "В" заземлить), снять и зарисовать осциллограммы напряжения на диоде и тока диода.

Сначала уменьшить величину ёмкости фильтра в 15...20 раз, а затем увеличить по сравнению с оптимальным значением. В обоих случаях снять осциллограммы выходного напряжения детектора. Сделать вывод о влиянии величины постоянной времени  $RC$ -фильтра на качество детектирования.

## 2. Исследование детекторной характеристики

Вернуть значение ёмкости, обеспечивающее минимальные искажения. Переключатель "I" перевести в верхнее положение. Отключить источник "Function Generator" от модулятора и подключить его на вход блока "1". Установить частоту источника "Function Generator" равной частоте несущей  $f_0$ .

Последовательно изменяя амплитуду входного немодулированного ВЧ колебания  $U_0$  от нуля до 2 В, измерять постоянное напряжение  $\bar{U}$  на выходе детектора. Выходное напряжение может иметь незначительные пульсации, поэтому измерять следует его среднее значение. Результаты внести в табл. 3.

Таблица 3

Детекторная характеристика амплитудного диодного детектора

$U_0, \text{ мВ}$	50	100	150	200	...	...	...	...	...
$\bar{U}, \text{ мВ}$	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$K_d$	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$\Theta, ^\circ$	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Построить полученную зависимость выходного напряжения  $\bar{U}$  детектора от амплитуды  $U_0$  напряжения на входе в одной системе координат с расчётной. Сравнить экспериментальную и расчётную характеристики. Сделать вывод.

Рассчитать для каждого значения амплитуды входного напряжения коэффициент передачи детектора  $K_d = \bar{U}/U_0$  и угол отсечки тока диода  $\Theta = \arccos(K_d)$ . Результаты внести в табл. 3. Сделать вывод. Сравнить значение угла отсечки тока, полученное при максимальной амплитуде детектируемого напряжения с расчётным значением из домашнего задания. Сделать вывод.

Переключить канал "А" осциллографа к нижнему выводу коммутатора "Switch" (канал "В" заземлить), увеличить чувствительность канала и получить осциллограмму тока диода. Уменьшить длительность развёртки так, чтобы наблюдать импульсы тока с отсечкой в пределах периода. Используя известную методику (рис. 5), определить по осциллограмме угол отсечки тока диода, соответствующий максимальной, средней и минимальной амплитудам входного напряжения. Сравнить углы отсечки при разных значениях амплитуды детектируемого напряжения с расчётным значением и значениями, полученными по детекторной характеристике. Сделать выводы.

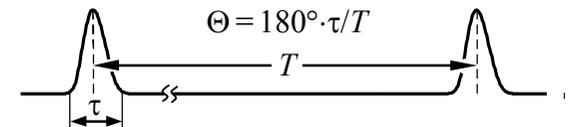


Рис. 5. Методика измерения угла отсечки тока диода

### 3. Исследование зависимости входного сопротивления детектора от величины нагрузки

Сместить вниз панели осциллографа и источника напряжения. Под ними откроется часть установки, показанная на рис. 6. Установить заданное сопротивление нагрузки ( $R$ ) и экспериментально подобранное значение ёмкости фильтра ( $C$ ).

Подать на вход блока 1 от источника гармонический сигнал частотой  $f_0$  и амплитудой 1 В. Установить рассчитанные параметры  $L_k$ ,  $C_k$  и  $r$  контура, шунтируемого детектором. На канал "А" осциллографа подать сигнал с точки "А", канал "В" – заземлить. Переключатель "D" перевести в верхнее положение.

Запустить моделирование. Уменьшить амплитуду напряжения источника, так чтобы амплитуда входного напряжения детектора (в точке "А") составила 2 В.

Измерить входное сопротивление детектора методом замещения, для чего, не прерывая моделирования, подключить эквивалент входного сопротивления детектора  $R_e$  (переводом "D" в нижнее положение), и подобрать величину  $R_e$ , так чтобы амплитуда напряжения в точке "А" была равна 2 В. Сравнить результат измерения с полученным в домашнем задании.

Последовательно уменьшать вдвое амплитуду детектируемого напряжения и измерять входное сопротивление детектора. По пяти-шести точкам построить зависимость входного сопротивления детектора от амплитуды детектируемого напряжения. Сделать выводы.

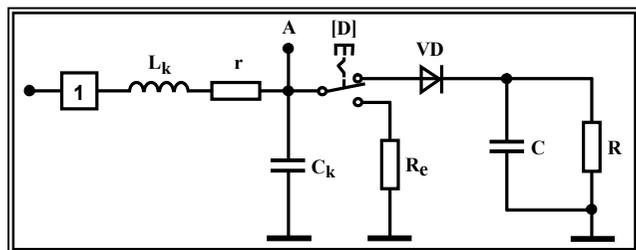


Рис. 6. Вид дополнительной установки к шестой работе

### Контрольные вопросы к защите работы

1. Каков принцип работы диодного детектора АМ - колебаний? Как выглядят временные диаграммы напряжений на диоде и на нагрузке детектора, диаграмма тока диода?

2. Зачем в диодном детекторе нужен конденсатор? Из каких соображений следует выбирать его ёмкость?

3. Изобразите временные диаграммы напряжений на нагрузке детектора и на диоде для случаев: а) ёмкость конденсатора бесконечно велика; б) конденсатор фильтра отсутствует.

4. Зависит ли угол отсечки диодного тока в детекторе от ёмкости конденсатора? Рассмотрите варианты: а) конденсатор отсутствует; б) ёмкость конденсатора бесконечно велика.

5. Как будет изменяться угол отсечки диодного тока в детекторе с изменением сопротивления нагрузки детектора?

6. По каким параметрам или из каких соображений следует подбирать диод для амплитудного детектора?

7. Что такое детекторная характеристика? Какую информацию она содержит? Каково её практическое назначение?

8. При каких условиях детектирование оказывается линейным? Квадратичным? Как по детекторной характеристике определить значения амплитуды несущей и коэффициента модуляции, при которых детектирование является линейным?

9. Изобразите детекторные характеристики при различных параметрах нагрузки.

10. От каких величин зависит коэффициент передачи детектора: а) по постоянной составляющей; б) по переменной составляющей?

11. Что понимается под входным сопротивлением детектора? От чего оно зависит? На что влияет?

**Литература:** [1, с. 255-260], [2, с. 341-349; 339-340], [3, с. 240-247], [4, с. 294-298, 289], [5, с. 233-241], [6, с. 95-100], [7, с. 45-50].

## Лабораторная работа № 7

### ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

**Цель работы** — экспериментально исследовать процессы в частотном детекторе на расстроенных контурах и в балансном фазовом детекторе.

#### Домашнее (подготовительное) задание

##### 1. Расчёт элементов частотного детектора

Начертить схему частотного детектора на расстроенных контурах. Полагая, что значения резонансного сопротивления  $R_K$ , эквивалентной полосы пропускания  $ПЭ$  контуров и переходной частоты детектора  $f_0$  заданы (табл. 4), рассчитать величины ёмкостей  $C_{1,2}$  и индуктивностей  $L_{1,2}$  контуров, обеспечивающие наилучшую характеристику частотного детектора.

*Комментарий к выполнению задания.* Контур по переменной составляющей шунтированы входным сопротивлением диодного детектора  $R_{вх1} \approx 1/2 \cdot R = 100$  кОм, поэтому эквивалентное резонансное сопротивление каждого из контуров составит  $R_{КЭ} = R_K \cdot R_{вх1} / (R_K + R_{вх1})$ . Ёмкости  $C_{1,2}$  и индуктивности  $L_{1,2}$  контуров следует рассчитать по формулам:

$$C_{1,2} = \frac{1}{2\pi \cdot ПЭ \cdot R_{КЭ}}, \quad L_{1,2} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_0 \mp \Delta f)^2 \cdot C_{1,2}}, \quad (8)$$

где  $\Delta f = 0.7 \cdot ПЭ$  — оптимальная расстройка контуров.

##### 2. Расчёт идеализированной детекторной характеристики частотного детектора

Рассчитать и построить идеализированную детекторную характеристику частотного детектора в пределах апертуры.

Таблица 4

Исходные данные для исследования частотного детектора

№	Параметры				№	Параметры			
	детектируемого сигнала		элементов детектора			детектируемого сигнала		элементов детектора	
	$f_0$ , кГц	$F$ , кГц	$R_K$ , кОм	$ПЭ$ , кГц		$f_0$ , кГц	$F$ , кГц	$R_K$ , кОм	$ПЭ$ , кГц
1	400	2.6	60	8	6	525	1.6	35	13
2	425	2.4	55	9	7	550	1.4	30	14
3	450	2.2	50	10	8	575	1.0	25	15
4	475	2.0	45	11	9	600	0.8	20	16
5	500	1.8	40	12	10	625	0.6	15	17

*Комментарий к выполнению задания.* Полагая, что детекторная характеристика частотного детектора в пределах апертуры  $2F_m = 2\Delta f$  линейна —  $\bar{U}_d = S_d \cdot F$  и определяется фиксированной крутизной  $S_d$ , построить её по двум точкам — при расстройках частоты детектируемого сигнала  $F = \pm \Delta f$ . Крутизну рассчитать по формуле:

$$S_d = U_0 \cdot K_0 \cdot K_d \cdot \frac{0.175}{ПЭ}, \quad (9)$$

в которой  $U_0 = 100$  мВ,  $K_d = 1$ ,  $K_0 = S \cdot R_{КЭ}$ ,  $S = 8.75$  мА/В — крутизна проходной ВАХ транзистора в рабочей точке.

##### 3. Расчёт элементов частотного детектора при вариации полосы пропускания контуров

Начертить реалистичные детекторные характеристики частотного детектора для исходной, увеличенной и уменьшенной полосы пропускания контуров, полагая, что взаимная расстройка и усиление неизменны. Рассчитать соответствующие величины ёмкостей  $C_{1,2}$  и индуктивностей  $L_{1,2}$  контуров.

Исходные данные для исследования фазового детектора

№	Параметры				№	Параметры			
	детектируемого сигнала		элементов детектора			детектируемого сигнала		элементов детектора	
	$f_0$ , кГц	$F$ , кГц	$R_{1,2}$ , кОм	$RS$ , Ом		$f_0$ , кГц	$F$ , кГц	$R_{1,2}$ , кОм	$RS$ , Ом
1	400	2.6	15	40	6	525	1.6	40	15
2	425	2.4	20	35	7	550	1.4	45	10
3	450	2.2	25	30	8	575	1.0	50	5
4	475	2.0	30	25	9	600	0.8	55	10
5	500	1.8	35	20	10	625	0.6	60	15

**5. Расчёт детекторной характеристики фазового детектора**

Изобразить предполагаемую детекторную характеристику балансного фазового детектора. Полагая, что амплитуда детектируемого напряжения  $U_{ФМ}$  задана, указать размах характеристики и рассчитать крутизну её рабочего участка. Указать максимальное значение индекса модуляции, при котором напряжение детектируется с допустимыми искажениями.

*Комментарий к выполнению задания.* Уравнение детекторной характеристики исследуемого фазового детектора приближённо описывается выражением:  $\bar{U}_д(\varphi) = U_{ФМ} \cdot K_д \cdot \sin(\varphi)$ , где  $\varphi$  — рассогласование фаз детектируемого и опорного сигналов на входах детектора. Полагая, что  $U_{ФМ} = (4 - \frac{1}{3}N_0)$  В,  $K_д = 0.9$ , и опираясь на аналитическое и графическое описания детекторной характеристики, несложно найти её размах и крутизну, а также указать максимально допустимый индекс модуляции детектируемого колебания.

*Комментарий к выполнению задания.* Для уяснения того, как будет выглядеть характеристика реального детектора, и к каким последствиям приведёт регулировка его параметров, следует изобразить в масштабе частотные характеристики расстроенных контуров (рис. 7), выдержав указанное соотношение расстройки контуров  $\Delta f$  и их полосы пропускания  $\Pi_Э$ , а затем из одной АЧХ графически вычесть другую. Коэффициент изменения полосы пропускания  $\Pi_Э$  взять равным  $k = 1.4$ . Для увеличения (уменьшения) в  $k$  раз полосы  $\Pi_Э$  при фиксированном усилении, определяемом резонансным сопротивлением контуров  $R_{кЭ}$ , следует мысленно увеличить (уменьшить) в  $k^2$  раз потери в контурах. Затем пересчитать индуктивности  $L_{1,2}$ , также увеличив (уменьшив) их, но в  $k$  раз. Чтобы частоты настроек контуров остались неизменными, следует уменьшить (увеличить) в  $k$  раз ёмкости контуров  $C_{1,2}$ .

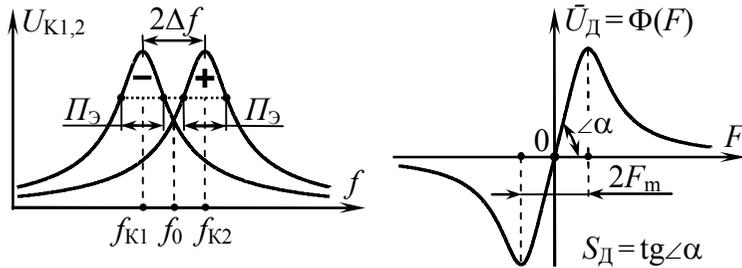


Рис. 7. Формирование характеристики частотного детектора

**4. Расчёт элементов фазового детектора**

Начертить схему векторомерного балансного фазового детектора. Полагая, что величина сопротивлений  $R_{1,2}$  фильтров на выходе детектора задана (табл. 5), рассчитать ёмкости  $C_{1,2}$  фильтров для неискажённого детектирования напряжения с заданными (табл. 5) частотами несущей  $f_0$  и модуляции  $F$ .

*Комментарий к выполнению задания.* Расчёт ёмкостей производится по формуле (5) при условии, что  $M = 0.8$ .

## Лабораторные задания и методические указания по их выполнению

### 1. Исследование детектирования частотно-модулированных сигналов

Загрузить схемный файл "Frequency\_detector.ewb". Вид виртуальной установки показан на рис. 8.

По умолчанию ко входу детектора подключен идеальный частотный модулятор ("Ch\_Modul") — источник детектируемого ЧМ-напряжения (переключатель "Space" установлен в нижнее положение). Значения частоты несущей ( $f_0$ ), амплитуды ( $U_0$ ) и девиации частоты ( $F_d$ ) ЧМ-колебания устанавливаются с помощью источников " $f_0$ ", " $S_0$ " и " $F_d$ ". Управляющий частотой ЧМ-напряжения низкочастотный сигнал вырабатывается отдельным источником "Function Generator", подключенным ко входу модулятора. Его панель также показана на рис. 8.

Установить параметры детектируемого ЧМ-колебания в соответствии с табл. 4 и номером варианта ( $N_0$ ): частоту несущей  $f_0$  (источник " $f_0$ "), амплитуду колебания  $U_0=100$  мВ (источник " $S_0$ "), частоту  $F$  модулирующего гармонического напряжения (Frequency, панель "Function Generator"). Амплитуду модулирующего сигнала (Amplitude) указать равной 1 В: при этом реализуемая девиация частоты ( $F_d$ ) будет соответствовать установленному по умолчанию значению (источник " $F_d$ ").

Установить заданную в табл. 4 величину резонансного сопротивления контуров  $R_k$ , имитируемых одноименными сопротивлениями, и рассчитанные в п. 1 домашнего задания значения ёмкостей  $C_{1,2}$  и индуктивностей  $L_{1,2}$  контуров.

#### 1. Исследование детекторной характеристики

Отключить от входа детектора генератор ЧМ-напряжения и подключить источник " $u(t)$ " (рис. 8) немодулированного напряжения. Установить его действующее значение (Voltage)

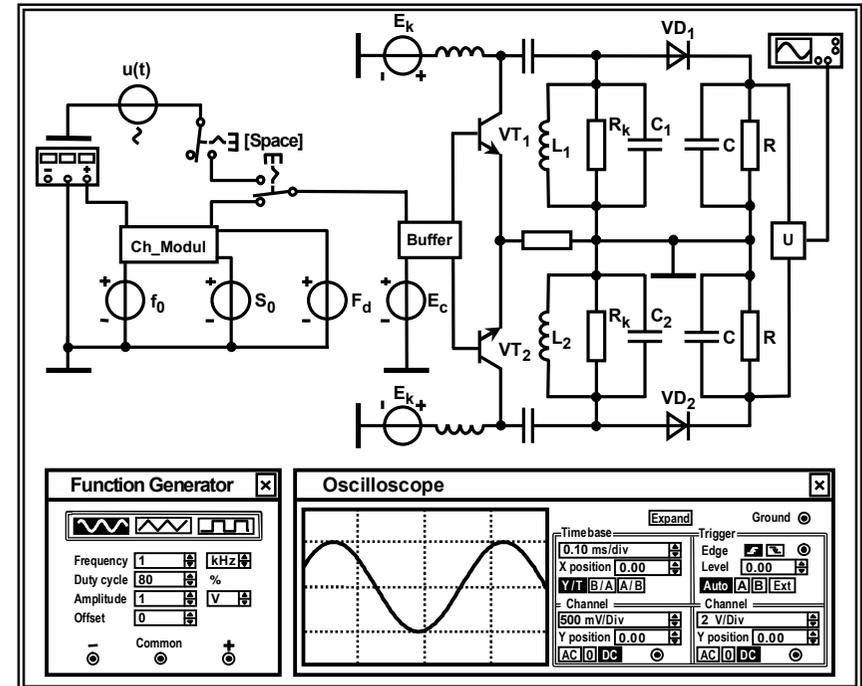


Рис. 8. Вид виртуальной установки для исследования частотного детектирования

равным 70.7 мВ, чтобы амплитуда входного сигнала составила 100 мВ. При подаче на вход частотного детектора гармонического напряжения с частотой, отличной от переходной частоты, на выходе в установившемся режиме наблюдается постоянное напряжение с малым уровнем ВЧ-пульсаций. Предлагается изменять частоту входного сигнала и по окончании переходных процессов измерять с помощью визира осциллографа средний уровень  $\bar{U}_d$  выходного напряжения. Частоту сигнала на входе  $f$  (Frequency) рекомендуется изменять в пределах от  $f_0 - 1.2\Delta f$  до  $f_0 + 1.2\Delta f$  с шагом  $0.1\Delta f$  ( $\Delta f = 0.7 \cdot P_0$ ,  $f_0$  — переходная частота детектора). Значения текущей частоты  $f$  и результаты измерения напряжения  $\bar{U}_d$  в установившемся режиме вносить в табл. 6.

Таблица 6

## Детекторная характеристика частотного детектора

$f$ , кГц	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$F=f-\tilde{f}_0$ , кГц	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$\tilde{U}_d$ , В	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Установить экспериментально частоту  $\tilde{f}_0$ , на которой выходное напряжение детектора равно нулю. Внести полученное значение частоты  $\tilde{f}_0$  в отчёт и сравнить с заданным в табл. 4 значением. Вычислить значения абсолютной расстройки частоты на входе  $F=f-\tilde{f}_0$  и занести в табл. 6.

Построить график детекторной характеристики — зависимости выходного напряжения детектора  $\tilde{U}_d$  от величины абсолютной расстройки частоты  $F$  детектируемого гармонического сигнала относительно переходной частоты детектора  $\tilde{f}_0$ . Сделать вывод о возможности реализации режима линейного частотного детектирования.

Определить по графику аперттуру — протяжённость линейного участка в значениях расстройки частоты и крутизну экспериментальной характеристики  $\tilde{S}_d \approx \Delta \tilde{U}_d / \Delta F$  в окрестности нулевой расстройки частоты и занести их значения в отчёт. Сравнить расчётные значения аперттуры и крутизны с экспериментальными значениями. Сделать вывод.

## 2. Исследование условий реализации режима неискажённого частотного детектирования

Подключить источник ЧМ-напряжения на вход детектора. Установить частоту несущей, равной значению частоты  $\tilde{f}_0$ , девиацию частоты  $F_d$  (напряжением источника "Fd"), равной четверти аперттуры детектора. Установить тип модулирующего напряжения — последовательность треугольных импульсов ("Duty cycle" = 50%). Произвести моделирование. Снять и зарисовать в пределах одного периода осциллограмму выходно-

го напряжения в установившемся режиме, сделать вывод о степени искажений информационного сигнала.

Увеличить девиацию частоты  $F_d$  детектируемого напряжения, так чтобы её значение сначала точно соответствовало, а затем несколько (в 1.2 - 1.4 раза) превышало половину аперттуры детекторной характеристики. Снять в обоих случаях осциллограммы выходного напряжения детектора и внести в отчёт. Сделать вывод о желательном практическом соотношении между аперттурой детекторной характеристики частотного детектора и девиацией частоты детектируемого ЧМ-колебания.

## 3. Исследование характеристики частотного детектора при изменении параметров контуров

Отключить от входа детектора генератор ЧМ-напряжения и подключить источник гармонического колебания.

Снять характеристику детектора, обладающего исходными переходной частотой, частотами настроек контуров, коэффициентом усиления, но отличающимся увеличенным/уменьшенным значением полосы пропускания  $\Pi_3$  контуров.

Для увеличения/уменьшения полосы пропускания контуров (при неизменном усилении) следует установить рассчитанные в п. 3 домашнего задания значения элементов  $L_{1,2}$  и  $C_{1,2}$ . Снять в обоих случаях детекторные характеристики по изложенной выше методике. Результаты отразить в таблицах, аналогичных табл. 6, в заголовках которых указать соответствующие значения отношения  $\Delta f / \Pi_3$ . Изобразить детекторные характеристики в одной системе координат, дополнив их кривой, соответствующей исходному значению полосы пропускания.

Определить по каждой характеристике её аперттуру и крутизну линейного участка. Внести полученные данные в отчёт. Сделать выводы о влиянии величины отношения  $\Delta f / \Pi_3$  на форму детекторной характеристики, размер её аперттуры и величину крутизны линейного участка.

## II. Исследование детектирования фазомодулированных сигналов

Загрузить схемный файл "Phase\_detector.ewb". Вид виртуальной установки показан на рис. 9.

По умолчанию ко входу детектора подключен идеальный фазовый модулятор ("FM") — источник детектируемого ФМ-напряжения (переключатель "Space" в нижнем положении). Значения частоты несущей ( $f_0$ ), амплитуды ( $U_{\text{ФМ}}$ ) и индекса модуляции ( $m$ ) ФМ-колебания устанавливаются с помощью источников " $f_0$ ", " $S_0$ " и " $m$ ". Управляющий набегом фазы ФМ-напряжения низкочастотный сигнал вырабатывается источником "Function Generator", подключенным ко входу модулятора.

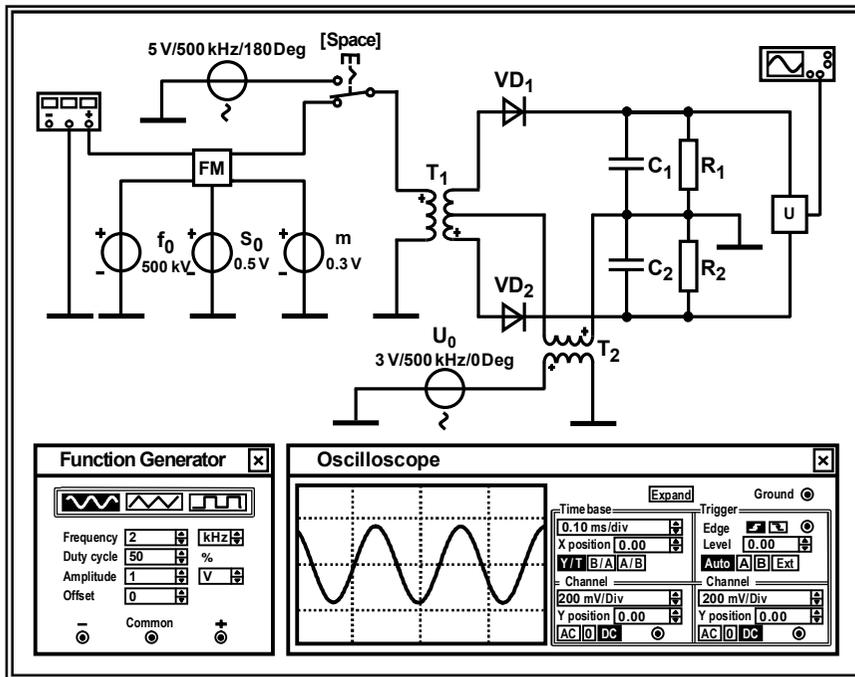


Рис. 9. Вид виртуальной установки для исследования фазового детектирования

Установить параметры детектируемого ФМ-напряжения в соответствии с табл. 5 и номером варианта (№): частоту несущей  $f_0$  (источник " $f_0$ "), амплитуду колебания  $U_{\text{ФМ}} = (4 - \frac{1}{3}N_0)$  В (источник " $S_0$ "), частоту  $F$  модулирующего напряжения (Frequency, панель "Function Generator"). Амплитуду модулирующего сигнала (Amplitude) указать равной 1 В: при этом реализуемый индекс модуляции ( $m$ ) будет соответствовать установленному по умолчанию значению (источник " $m$ ").

Установить параметры источника опорного гармонического напряжения (источник " $U_0$ " на рис. 9): частоту взять точно равной  $f_0$  (табл. 5), уровень напряжения — в два раза больше амплитуды  $U_{\text{ФМ}}$  детектируемого напряжения ( $2U_{\text{ФМ}}$ ), начальную фазу оставить равной нулю по умолчанию.

Установить в соответствии с табл. 5 и номером варианта (№) сопротивления  $RC$ -фильтров  $R_1$  и  $R_2$ , параметр "Ohmic resistance (RS)" диодов  $VD_1$  и  $VD_2$  (модель "Ideal"). Установить значения ёмкостей  $C_1$  и  $C_2$ , равными значению, рассчитанному в п. 4 домашнего задания.

### 4. Исследование детекторной характеристики

Отключить клавишей "Space" от входа детектора генератор ФМ-напряжения и подключить источник немодулированного гармонического колебания. Установить его частоту равной  $f_0$  (табл. 5), действующее значение напряжения (Voltage) равным округленному до десятых долей вольта значению  $0.707 \cdot (4 - \frac{1}{3}N_0)$  В. Изменять начальную фазу этого гармонического напряжения  $\varphi_{\text{ФМ}}$  (Phase) в пределах от  $120^\circ$  до  $420^\circ$  с шагом  $10^\circ$  и измерять с помощью визира осциллографа средний уровень  $\bar{U}_d$  выходного напряжения в установившемся режиме. Начальные фазы входного напряжения  $\varphi_{\text{ФМ}}$  и соответствующие им результаты измерений уровня  $\bar{U}_d$  внести в табл. 7. Вычислить и внести в табл. 7 значения рассогласования фаз сигналов  $\varphi = \varphi_{\text{ФМ}} - 270^\circ$ .

Таблица 7

Детекторная характеристика фазового детектора

$\varphi_{\text{ФМ}}, ^\circ$	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$\varphi = \varphi_{\text{ФМ}} - 270^\circ$	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$\tilde{U}_d, \text{В}$	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Построить график детекторной характеристики — зависимости  $\tilde{U}_d$  от  $\varphi$ . Убедиться, что характеристика периодична. Указать интервал значений расстройки фаз  $\varphi$  (и соответственно значение максимального индекса модуляции детектируемого колебания  $m_{\text{max}}$ ), в пределах которого возможна реализация режима неискажённого фазового детектирования.

Определить по графику крутизну экспериментальной характеристики  $S_d = \Delta \tilde{U}_d / \Delta \varphi$  в области малой расстройки фаз  $\varphi$ , занести её значение в отчёт и сравнить с расчётной величиной, полученной в п. 5 домашнего задания.

### 5. Исследование условий реализации режима неискажённого фазового детектирования

Подключить источник ФМ-напряжения на вход детектора. Установить тип модулирующего напряжения — последовательность треугольных импульсов ("Duty cycle" указать равным 50%). Выполнить моделирование. Зафиксировать в пределах периода осциллограмму выходного напряжения детектора в установившемся режиме. Проанализировать её форму, сделать вывод о степени искажений информационного сигнала.

Увеличить индекс модуляции детектируемого колебания сначала до значения  $m_{\text{max}}$ , а затем — до  $1.5m_{\text{max}}$ . Снять в обоих случаях осциллограммы напряжения на выходе детектора и внести их в отчёт. Сделать вывод о желательном соотношении между раствором детекторной характеристики фазового детектора и индексом модуляции детектируемого ФМ-колебания.

### Контрольные вопросы к защите работы

1. Какой принцип положен в основу работы частотного детектора на расстроенных контурах? Для чего в детекторе применяется балансная схема? Можно ли реализовать детектор на одном расстроенном контуре?

2. Что такое детекторная характеристика частотного детектора? Поясните принцип её формирования применительно к детектору на расстроенных контурах. Чем определяется протяжённость рабочего участка? Что такое апертюра детектора?

3. Изобразите характеристики частотных детекторов, отличающихся полосой пропускания контуров. Как изменяется крутизна и апертюра характеристики с увеличением полосы пропускания контуров при неизменной их расстройке?

4. Изобразите характеристики частотных детекторов, отличающихся взаимной расстройкой контуров. Как изменяется крутизна и апертюра характеристики с уменьшением взаимной расстройки контуров при их неизменной полосе пропускания?

5. Объясните принцип работы векторомерного балансного фазового детектора.

6. Приведите график детекторной характеристики фазового детектора и поясните принцип её формирования.

7. Зависит ли форма детекторной характеристики фазового детектора от соотношения амплитуд детектируемого и опорного колебания? При каком их отношении она более линейна?

8. При каких значениях индекса модуляции детектируемого колебания векторомерный фазовый детектор работает в режиме с допустимыми искажениями? Можно ли расширить рабочий участок его детекторной характеристики?

**Литература:** [1, с. 261-263], [2, с. 349-356],  
[3, с. 247-251], [4, с. 298-300],  
[5, с. 242-245], [6, с. 103-107], [7, с. 64-71].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов, М.Т. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] : учеб. для вузов. Стандарт третьего поколения / М.Т. Иванов, А.Б. Сергиенко, В.Н. Ушаков; под ред. В.Н. Ушакова. – СПб. : Питер, 2014. – 336 с.
2. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] : учеб. пособие для вузов / И.С. Гоноровский. – 5-е изд., испр. и доп. — М. : Дрофа, 2006. – 719 с.
3. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] : учеб. для вузов / И.С. Гоноровский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1986. – 512 с.
4. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] : учеб. пособие / С.И. Баскаков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2003. – 462 с.
5. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] : учеб. пособие для вузов / Д.В. Васильев, М.Р. Витоль, Ю.Н. Горшенков и др.; под ред. К.А. Самойло. – М.: Радио и связь, 1982. – 528 с.
6. Андреев, В.С. Теория нелинейных электрических цепей [Текст] : учеб. пособие для вузов / В.С. Андреев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 280 с.
7. Останков, А.В. Нелинейные радиотехнические цепи : исследование на основе имитационного моделирования [Текст] : учеб. пособие / А.В. Останков. – Воронеж : ГОУВПО "Воронежский государственный технический университет", 2009. – 158 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания .....	1
Лабораторная работа № 5. Амплитудная модуляция смещением .....	2
Лабораторная работа № 6. Детектирование амплитудно-модулированных сигналов .....	13

Лабораторная работа № 7. Детектирование сигналов с угловой модуляцией .....	22
Библиографический список .....	34

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам № 5 - 7

по дисциплине "Радиотехнические цепи и сигналы" для студентов направления 11.03.01 "Радиотехника" (профиль "Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов") очной формы обучения

Составитель

Останков Александр Витальевич

В авторской редакции

Подписано в печать 05.04.2016.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 2,3. Уч.-изд. л. 2,1. Тираж 29 экз. "С" 18.

Зак. № 37.

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"

394026 Воронеж, Московский просп., 14