

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное агентство по образованию  
Московский государственный институт электроники и математики  
(Технический университет)**

**Кафедра радиоэлектроники**

**Методические указания  
к лабораторным работам по курсам  
«Электротехника и электроника» и «Электроника и схемотехника»  
для студентов групп МС-21, МС-22, ЗИ-51, Зи-52**

**Москва 2007**

Составители: доктор техн.наук С.В.Мухин  
канд.техн.наук Т.М.Андреевская

УДК 621.3.01

Методические указания к лабораторным работам по курсам «Электротехника и электроника» и «Электроника и схемотехника» для студентов групп МС-21, МС-22, ЗИ-51, Зи-52.  
Сост.: С.В. Мухин, Т.М.Андреевская М., 2007. - 32 с.

Ил. 28.

Лабораторные работы выполняются студентами специальностей факультета Прикладной математики в соответствии с учебными планами и программами курсов «Электротехника и электроника» и «Электроника и схемотехника» для студентов групп МС-21, МС-22, ЗИ-51, Зи-52».

Приводится описание лабораторных работ и рабочего места при их проведении, даются основные теоретические сведения и рекомендации, необходимые для выполнения лабораторных работ.

ISBN 978-5-94506-161-3

## Описание измерительных приборов, используемых при проведении данного цикла лабораторных работ

### 1. Генератор сигналов функциональный Г6-46.

Генератор представляет собой источник сигналов синусоидальной, треугольной, прямоугольной, пилообразной и прямоугольной (для логических схем) форм в диапазонах частот от 0,1 Гц до 1 МГц с разделением на декадные поддиапазоны. В пределах поддиапазонов осуществляется непрерывная перестройка частоты.

Заданная частота высвечивается на индикаторе частотомера.

Амплитуда сигналов составляет не менее 5 В при работе на согласованную нагрузку 600 Ом и не менее 10 В на ненагруженном выходе. Имеется дискретное ослабление сигналов на -20 и -40 дБ и плавное ослабление в пределах 20 дБ.

Органы управления, перестройки и подключения приведены в таблице.

Наименование	Назначение
Ручка «ГРУБО»	Для грубой перестройки частоты
Ручка «ПЛАВНО»	Для плавной перестройки частоты
Переключатель «ЧАСТОТА»	Для выбора поддиапазона
Ручка «АМПЛИТУДА»	Для плавного ослабления величины выходного сигнала генератора
Переключатель «АТТЕНЮАТОР, дБ»	Для ступенчатого ослабления величины выходного сигнала генератора
	Для включения режима генерации сигнала прямоугольной формы
	Для включения режима генерации сигнала пилообразной формы
Переключатель «СМЕЩ»	Для включения режима смещения формируемого сигнала
Ручка «СМЕЩ»	Для плавного смещения формируемого сигнала
Гнездо «ВЫХОД»	Для подключения к внешним исследуемым цепям
Гнездо «ВХОД ЧМ»	Для управления частотой генератора внешним сигналом (частотная модуляция)
Выключатель «СЕТЬ», находится на задней панели слева	Для включения генератора в рабочее состояние

### 2. Осциллограф двухлучевой С1-55.

Предназначен для одновременного наблюдения и исследования формы одного или двух электрических процессов путем визуального наблюдения и измерения их временных и амплитудных значений.

Осциллограф состоит из двух идентичных каналов вертикального отклонения луча (YI и YII), блока развертки и синхронизации.

Блоки вертикального отклонения луча включают в себя:

- входное гнездо «ВХОД 1МОм 40 Пф», расположенное на передней панели прибора;
- тумблер переключения открытого ( $\approx$ ) или закрытого входа ( $\approx$ );
- аттенюатор «Усиление, вольт/деление» со ступенчатой и плавной регулировкой; **Внимание:** при измерениях по вертикальной шкале плавный регулятор должен быть повернут вправо до щелчка.

– выведенные под шлиц регуляторы каналов («корр.», «баланс»).

Блок разверток включает в себя:

– ступенчатый и плавный регулятор периода развертки («Длительность», «время/делен»); **Внимание:** при измерении длительности плавный регулятор развертки должен находиться в крайнем правом положении;

– множитель длительности развертки (x1, x0.2).

Синхронизировать развертку в большинстве случаев наиболее удобно исследуемым сигналом. Для этого ручку «Синхронизация» нужно установить в положение «Внутр.І» или «Внутр.ІІ» в зависимости от того, сигналом какого канала желательно засинхронизировать развертку.

Кроме того, режим развертки можно установить ручкой «Стаб»: для получения устойчивой картины на экране ручку «Стаб» повернуть влево до исчезновения неустойчивой осциллограммы, затем попытаться получить картинку с помощью ручки плавной синхронизации. При необходимости ручку «Стаб» повернуть немного вправо.

*Подготовка осциллографа к проведению измерений.*

Включить питание осциллографа («Вкл. питание»). Должна загореться сигнальная лампочка.

Через 2—3 минуты ручками «Яркость», «Фокус», «Астигм.» отрегулировать появившиеся две линии разверток. Если лучей на экране не будет, то необходимо переместить лучи в пределы рабочей области экрана при помощи ручек  $\leftrightarrow$  и  $\updownarrow$ . Если лучей на экране все же не будет, повернуть вправо ручку «Стаб» до появления лучей.

Установить ручки «Вольт\дел» каждого канала в положение 0.5.

Ручкой «Шкала» устанавливают яркость подсвета делений, необходимую для проведения измерений.

### 3. Вольтметры цифровые универсальные В7-16 и В7-16А.

Предназначены для измерения напряжений постоянного и переменного тока (до 20 КГц), а также величины активных сопротивлений. В данном лабораторном практикуме вольтметр используется для измерений **только постоянных напряжений**.

При включении тумблера «Сеть» должны загореться: один из знаков «+», «-» или «~», одна из размерностей «mV», «V», «Ω», «KΩ», «MΩ», несколько ламп цифрового табло.

Подготовка к работе и установка нуля.

а) *Вольтметр типа В7-16:*

- подключить кабель к разъему « $\simeq$  1-100V,R»;
- включить тумблер «сеть»;
- установить тумблер « $\text{G} / \sqrt{\text{V}}$ » в положение « $\text{G}$ »;
- установить ручку «ВР.ИНД.» в крайнее левое положение;
- установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в положение «0» (установка нуля);
- ручкой «0» установить показания прибора «0000»;
- установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в положение « $\blacktriangledown$ » и ручкой « $\blacktriangledown$ » установить на табло показание, равное значению, указанному на шильдике прибора;

– установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в положение «U\_0.1s» или «U\_-1s». Ручкой «0» установить показания «0000».

– установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в режим измерений постоянного напряжения.

*б) Вольтметр типа В7-16А.*

– подключить кабель к разъему « $\approx 100V,R$ »-«земля», соединить свободные концы (закоротить);

– ручкой «0» установить показания прибора «0000»;

– установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в положение «▼» и ручкой «▼» установить на табло показание, равное значению, указанному на шильдике прибора;

– установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в режим измерений постоянного напряжения.

#### 4. Генератор сигналов высокочастотный Г4-102А.

Используется как источник высокочастотных (от 100 кГц до 50 МГц) гармонических и амплитудно-модулированных гармонических колебаний (гнездо « $\mu V$ »), а также почти прямоугольных высокочастотных колебаний с нерегулируемой амплитудой (гнездо «1В»).

Частота колебаний устанавливается нажатием соответствующей кнопки выбора диапазона и ручкой плавной установки частоты по шкале «Установка частоты, МГц». С гнезда « $mV$ » снимаются гармонические колебания, эффективное значение амплитуды которых определяется в микровольтах произведением значения множителя ступенчатого аттенюатора и значения плавного аттенюатора с круглой шкалой в соответствии с цветом установки ступенчатого делителя.

При необходимости получения на выходе « $mV$ » амплитудно-модулированных колебаний используют внутреннюю АМ с частотой модуляции 1 КГц, при этом тумблер АМ должен быть включен в положение «Внутр»; если требуется установить АМ-колебания с другой частотой модуляции, на гнездо «АМ» подают низкочастотное модулирующее колебание с другого генератора, тумблер АМ при этом должен быть включен в положение «Внеш». Глубина модуляции внутренней амплитудной модуляции устанавливается ручкой «М%». При внешней АМ глубина модуляции зависит от амплитуды внешнего модулирующего сигнала.

## Лабораторная работа №1

### Анализ RC-цепей

#### 1. Цель работы.

Снятие характеристик фильтров верхних (ФВЧ) и нижних (ФНЧ) частот, построенных на RC-цепочке, исследование ФВЧ и ФНЧ в качестве дифференцирующей и интегрирующей цепей.

#### 2. Основные сведения.

Простейшие фильтры низких и высоких частот реализуются на основе RC-цепочки.

Схема фильтра нижних частот приведена на рис.1.

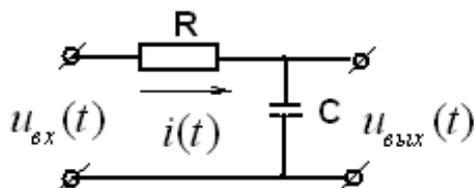


Рис.1

Входное напряжение подается на всю цепочку. Выходное напряжение снимается с ёмкости. Комплексный коэффициент передачи такого фильтра определяется соотношением

$$\dot{K}(\omega) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega CR}.$$

Модуль комплексного коэффициента передачи, т.е. его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), и аргумент (ФЧХ) данной цепочки имеют вид

$$|\dot{K}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}, \quad \varphi(\omega) = \arctg(\omega CR).$$

На рис.2,а показаны графики АЧХ и ФЧХ данного фильтра.

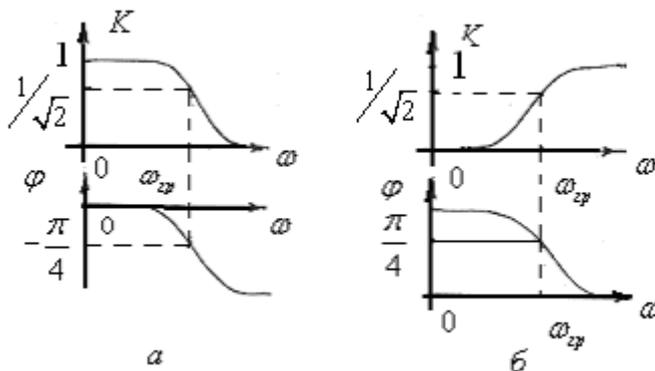


Рис.2

Граничная частота фильтра (см. рис. 2,а) определяется из соотношения

$$|\dot{K}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_{\text{гп}} CR)^2}},$$

откуда  $\omega_{\text{гп}} = \frac{1}{CR} = \frac{1}{\tau}$ , где  $\tau$  – постоянная времени цепи.

Схема фильтра верхних частот приведена на рис.3. Здесь выходное напряжение снимается с сопротивления R.

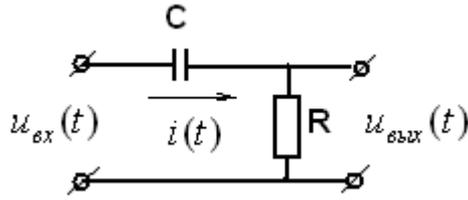


Рис.3

Комплексный коэффициент передачи этой цепочки определяется соотношением

$$\dot{K}(\omega) = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega CR}},$$

откуда АЧХ и ФЧХ соответственно равны:

$$\left| \dot{K}(\omega) \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{1}{\omega CR} \right)^2}}; \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{1}{\omega CR}.$$

Графики АЧХ и ФЧХ фильтра высоких частот показаны на рис.2,б.

Граничная частота ФВЧ также определяется через постоянную времени цепи,

как 
$$\omega_{гр} = \frac{1}{CR} = \frac{1}{\tau}.$$

Указанные выше RC-цепочки могут использоваться не только в качестве фильтров, но и в качестве интегрирующих и дифференцирующих цепей, то есть цепей, для которых характерны следующие зависимости:

$$u_{вых}(t) \sim \int_0^t u_{вх}(t) dt, \quad u_{вых}(t) \sim \frac{d}{dt} u_{вх}(t).$$

В этом случае анализ цепочки ведется во временной области. Для последовательной RC-цепочки можно записать следующее дифференциальное уравнение:

$$u_{вх}(t) = Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad \text{или} \quad Cu_{вх}(t) = RCi(t) + \int i(t) dt.$$

Характер связи между током и входным напряжением зависит от величины  $\tau$  или  $\omega_{гр}$ . Если  $\tau$  мало по сравнению, например, с длительностью входного сигнала и можно пренебречь первым слагаемым, то ток в цепочке в этом случае определяется выражением  $i(t) = C \frac{du_{вх}(t)}{dt}$ . Если выходное напряжение при этом снимается с

сопротивления  $R$  (схема рис.3), то  $u_{вых}(t) = Ri(t) = RC \frac{du_{вх}(t)}{dt}$ , что говорит о том, что данная цепочка дифференцирует входной сигнал. Саму цепочку рис.3 можно в этом случае назвать дифференцирующей.

При больших значениях  $\tau$  можно пренебречь вторым слагаемым. Тогда  $i(t) = \frac{C}{\tau} u_{вх}(t) = \frac{u_{вх}(t)}{R}$ . Если теперь выходное напряжение снимается с емкости  $C$  (см.

схему рис.1), то  $i(t) = \frac{C du_{вых}(t)}{dt}$ , следовательно,  $u_{вых}(t) = \frac{1}{RC} \int u_{вх}(t) dt$ . Таким образом, в этом случае цепочка (рис.1) выполняет роль интегратора входного сигнала, а сама цепочка может быть названа интегрирующей.

В зависимости от соотношения между длительностью импульса  $\tau_H$ , поступающего на вход RC-цепочки, и постоянной времени цепочки  $\tau$  форма импульсов на ее

выходе может быть различной. В дифференцирующей цепочке при  $\tau \gg \tau_{II}$  входной сигнал передается на ее выход с небольшими искажениями, а при  $\tau \ll \tau_{II}$  происходит дифференцирование. В интегрирующей - наоборот: при  $\tau \gg \tau_{II}$  происходит интегрирование, а при  $\tau \ll \tau_{II}$  имеет место передача входного импульса на выход с небольшими искажениями. Изменение формы выходного при увеличении длительности входного прямоугольного импульса при подаче на вход дифференцирующей цепочки показано на рис.4,а и интегрирующей – на рис.4,б.

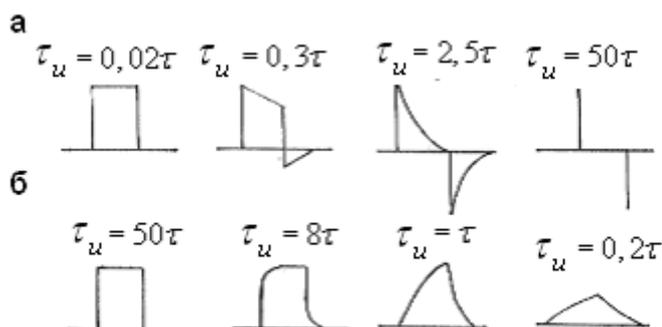


Рис.4

При подаче импульса на вход дифференцирующей цепочки происходит заряд емкости по экспоненциальному закону. По мере заряда ток, протекающий по цепочке, уменьшается. Соответственно уменьшается и напряжение на сопротивлении от максимального значения вплоть до 0 при достаточной длительности импульса ( $\tau_{II} \gg \tau$ , см. вариант  $\tau_{II} = 50\tau$  на рис.4,а). После прохождения импульса емкость разряжается. Если  $\tau_{II} \ll \tau$ , то емкость не успевает полностью разрядиться. На выходе в этом случае мы будем наблюдать сигнал, практически равный входному (см. вариант  $\tau_{II} = 0,02\tau$  на рис.4,а).

Аналогичные процессы заряда и разряда конденсатора происходят и в интегрирующей цепочке. При  $\tau \ll \tau_{II}$  (см. последнюю осциллограмму на рис.4,б) напряжение на емкости отражает недостаточность времени для полной перезарядки конденсатора, а само напряжение на нем пропорционально интегралу от входного сигнала. При больших же длительностях (первая осциллограмма) процессы заряда и разряда происходят так быстро по сравнению с длительностью импульса, что сигнал на выходе практически повторяет форму входного сигнала.

Эти процессы в цепочках могут быть объяснены и со спектральных позиций, если проанализировать изменение спектра входного сигнала при прохождении сигналов через фильтры высоких и низких частот, которые при соответствующих условиях являются дифференциатором (ФВЧ) или интегратором (ФНЧ). ФВЧ будет хорошим дифференциатором, если основная часть спектра входного сигнала будет сосредоточена в области низких частот фильтра, где  $\dot{K}(\omega) \approx j\omega / \omega_{гр}$ . С другой стороны, ФНЧ будет хорошо интегрировать входной сигнал, если спектр последнего будет сосредоточен в области высоких частот фильтра, где  $\dot{K}(\omega) \approx -j\omega_{гр} / \omega$ .

### 3. Домашнее задание.

- в тетради для отчетов по лабораторным работам зарисовать схемы ФНЧ и ФВЧ, а также вывести формулы для расчета АЧХ и ФЧХ;
- для указанных на стенде значений  $C$  и  $R$  рассчитать постоянную времени и граничную частоту;

- построить АЧХ и ФЧХ ФНЧ и ФВЧ. При построении использовать логарифмический масштаб для частоты, отметить граничную частоту;
- определить, при каких частотах повторения и длительности последовательности прямоугольных импульсов на входе та или иная цепочка осуществляет интегрирование или дифференцирование входного сигнала.

#### 4. Порядок выполнения работы.

1) На лабораторном макете собрать схему ФНЧ.

2) К входным зажимам подключить генератор Г6-46, к выходным – осциллограф С1-55.

3) Подавая на вход гармонические (синусоидальные) колебания амплитудой 2В, снять и построить АЧХ и ФЧХ фильтра. Измерения проводятся на частотах 100 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц. По графику АЧХ определить граничную частоту.

4) Подавая на вход ФНЧ последовательность прямоугольных импульсов с частотами повторения, указанными выше, зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений, отметив на них амплитуды. Записать частоту повторения и длительность импульсов для каждого эксперимента.

5) Собрать схему ФВЧ.

6) Подавая на вход гармонические (синусоидальные) колебания амплитудой 2В, снять и построить АЧХ и ФЧХ фильтра. Измерения проводятся на частотах 100 кГц, 10 кГц, 1 кГц, 100 Гц. По графику АЧХ определить граничную частоту.

7) Подавая на вход ФВЧ последовательность прямоугольных импульсов с частотами повторения, указанными выше, зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений, отметив на них амплитуды. Записать частоту повторения и длительность импульсов для каждого эксперимента.

#### 5. Содержание отчета.

- схемы эксперимента, значения параметров элементов цепочек, расчетные формулы;
- рассчитанные графики АЧХ и ФЧХ фильтров, граничные частоты, постоянные времени,
- спектры входного и выходного сигнала при подаче на вход последовательности прямоугольных импульсов типа «меандр»;
- экспериментально измеренные АЧХ и ФЧХ фильтров, граничные частоты;
- рисунки осциллограмм выходного напряжения ФВЧ и ФНЧ при подаче на вход последовательности прямоугольных импульсов.

#### 6. Контрольные вопросы.

- Кто называется ФНЧ и ФВЧ, их схемы?
- Записать выражения для определения АЧХ и ФЧХ ФВЧ и ФНЧ.
- Как выглядят графики АЧХ и ФЧХ ФВЧ и ФНЧ?
- Как определить граничные частоты ФНЧ и ФВЧ?
- Как определить реакцию ФВЧ и ФНЧ на воздействие прямоугольного импульса?
- При каких условиях ФНЧ интегрирует, а ФВЧ дифференцирует прямоугольный импульс?
- Как построить ФНЧ и ФВЧ на элементах  $L$  и  $R$ ?

## Лабораторная работа №2 Исследование колебательных контуров

### 1. Цель работы.

Снятие и анализ частотных характеристик последовательного и параллельного колебательных контуров. Исследование резонансных свойств колебательных контуров.

### 2. Основные сведения.

Элементы контура  $L$  и  $C$  могут подключаться к внешнему генератору последовательно или параллельно. Соответственно различают контуры последовательные и параллельные.

Если сообщить контуру порцию энергии (зарядить конденсатор), в нем начинается колебательный процесс, заключающийся в периодическом переходе энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки и наоборот. Возникают собственные (свободные) колебания контура. Из-за потерь на активном сопротивлении эти колебания являются затухающими. Их частота определяется выражением  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , а скорость убывания амплитуды тем меньше, чем выше добротность контура  $Q = \frac{\rho}{r}$ ; где  $\rho$  - характеристическое сопротивление контура, равное сопротивлению реактивных элементов контура на частоте его свободных колебаний

$\rho = \frac{1}{\omega_0 C} = \omega_0 L = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ,  $r$  - сопротивление потерь в контуре.

Добротность показывает, во сколько раз реактивная мощность колебательного процесса больше мощности потерь.

Практический интерес представляют вынужденные колебания в контуре, которые происходят под воздействием внешней переменной ЭДС. Амплитуда этих колебаний зависит от соотношения частоты внешнего генератора и собственной частоты контура. Характер вынужденных колебаний зависит от типа возбуждаемого контура – последовательный он или параллельный.

В последовательном колебательном контуре (рис.5) внешний генератор подключается к клеммам 1 и 2, а нагрузка подключается чаще всего к емкости контура (клеммы 3-4).

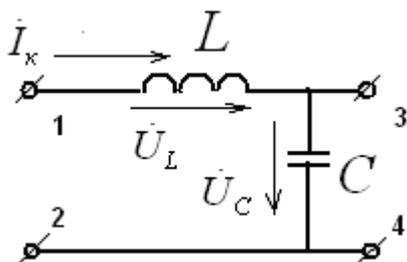


Рис.5

Модуль полного сопротивления контура определяется формулой  $|\dot{Z}| = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}$ , его фаза  $\varphi(\omega) = +\arctg \frac{x_L - x_C}{r}$ .

Если частота внешнего генератора совпадает с собственной частотой контура, сопротивления реактивных элементов равны  $x_L = x_C$ ,  $\varphi(\omega) = 0$ , сопротивление кон-

тура чисто активное. При этом напряжения на реактивных элементах  $U_L = E \frac{x_L}{R} = EQ$ ,  
 $U_C = E \frac{x_C}{R} = EQ$ .

Эти напряжения в  $Q$  раз больше ЭДС генератора  $E$ . Такое явление называют резонансом напряжений. Основной характеристикой последовательного контура является зависимость комплексной амплитуды тока в контуре от частоты входного сигнала. Выделяют амплитудно-частотную (рис. 6,а) и фазочастотную (рис. 6,б) -  $\varphi_K(\omega)$  характеристики контура.

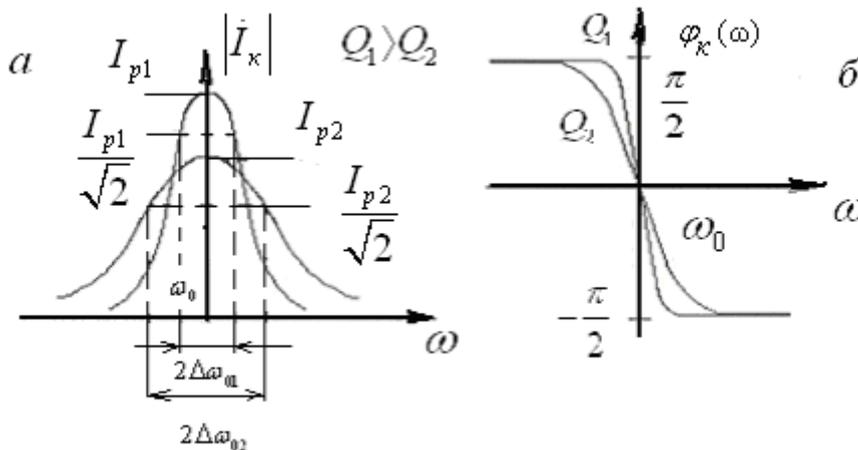


Рис.6

$$| \dot{I}_K | = \frac{\frac{E}{r}}{\sqrt{1 + \left(\frac{x_L - x_C}{r}\right)^2}} = \frac{I_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{x_L - x_C}{r}\right)^2}}$$

Интервал  $2\Delta\omega_0$  называется полосой пропускания контура и определяется на уровне  $| \dot{I}_K | = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$ . Добротность контура можно определить по экспериментальной кривой по формуле  $Q = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega_0}$ .

В параллельном колебательном контуре (рис.7) при совпадении собственной частоты с частотой внешнего генератора происходит резонанс токов, при котором

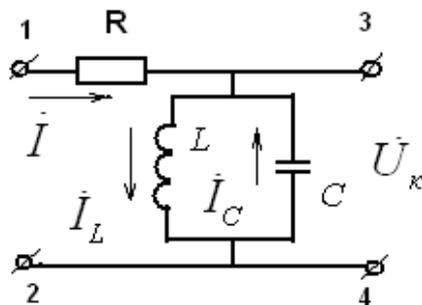


Рис.7

сопротивление контура  $Z_{\kappa} = \frac{-(r + jx_L)jx_C}{r + j(x_L - x_C)} \approx \frac{\rho^2}{r + j(x_L - x_C)}$  становится максимальным и чисто активным  $Z_{\kappa,p} = \frac{\rho^2}{r}$ . При этом токи в реактивных элементах в  $Q$  раз превосходят ток генератора  $I$ :

$$I_L = \frac{IZ_{\kappa p}}{x_L} = I \frac{\rho}{r} = IQ; \quad I_C = \frac{IZ_{\kappa p}}{x_C} = I \frac{\rho}{r} = IQ.$$

Основной характеристикой параллельного контура является зависимость комплексной амплитуды напряжения на контуре от частоты внешнего генератора. Соотношения для АЧХ и ФЧХ параллельного контура имеют вид:

$$|U_{\kappa}| = \frac{I \frac{\rho^2}{r}}{\sqrt{1 + \left(\frac{x_L - x_C}{r}\right)^2}} = \frac{U_{\kappa,p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{x_L - x_C}{r}\right)^2}},$$

$$\varphi_{\kappa}(\omega) = -\arctg \frac{x_L - x_C}{r},$$

а графики АЧХ и ФЧХ показаны на рис.8,а и 8,б соответственно.

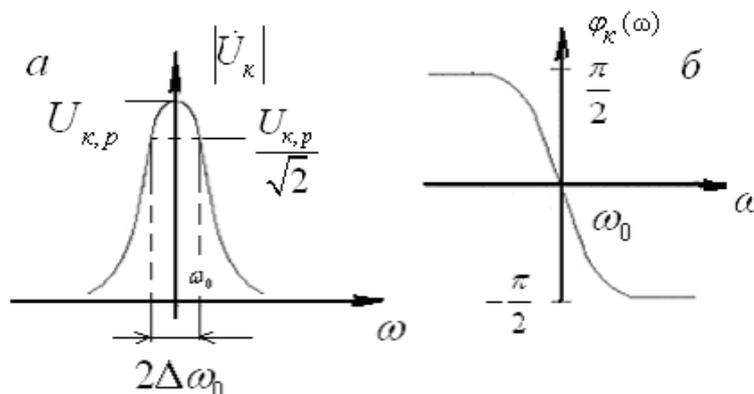


Рис.8

Добротность параллельного контура, так же как и в предыдущем случае может быть определена по экспериментальной кривой (рис.8,а) из соотношения  $Q = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega_0}$ .

Частотные характеристики последовательного и параллельного контуров совпадают по форме, и тот, и другой являются полосовыми фильтрами. Если они собраны из идентичных элементов  $R$ ,  $L$ , и  $C$ , совпадают их резонансные частоты, характеристические сопротивления, добротности и полосы пропускания. Различаются только сопротивления контуров на резонансной частоте:  $r$  – в последовательном контуре и  $\rho^2 / r$  - в параллельном.

### 3.Порядок выполнения работы.

1) Используя указанные на макете номиналы элементов  $L$ ,  $C$  и  $R$ , рассчитать резонансные частоты и построить АЧХ последовательного и параллельного контуров.

2) Собрать схему последовательного колебательного контура. Подключить к входу генератор Г6-46 (в режиме гармонических колебаний) и первый канал осцил-

логафа С1-55, а к выходу - второй канал осциллографа. Снять и построить АЧХ и ФЧХ; по полученной резонансной кривой определить резонансную частоту, полосу пропускания и рассчитать добротность контура.

3) Переключить генератор Г6-46 в режим прямоугольных импульсов с частотой следования, много меньшей резонансной частоты контура, и зарисовать осциллограммы напряжения на выходе.

4) Собрать схему параллельного колебательного контура, включив дополнительное сопротивление. Снять и построить АЧХ и ФЧХ контура, подавая на вход гармонические колебания от генератора Г6-46.

5) Подать на вход последовательность прямоугольных импульсов с частотой на порядок меньше резонансной частоты и зарисовать осциллограммы напряжения на выходе.

6) По полученной в п.5 резонансной кривой определить резонансную частоту, полосу пропускания и рассчитать добротность контура.

#### 4.Содержание отчета.

- схемы эксперимента и расчетные формулы;
- рассчитанные резонансная частота и АЧХ;
- полученные экспериментально АЧХ и ФЧХ контуров;
- результаты расчета добротности по АЧХ;
- осциллограммы выходных напряжений.

#### 5.Контрольные вопросы:

- последовательный и параллельный резонансные контура, их основные характеристики;
- как рассчитать резонансную частоту, волновое сопротивление, добротность и резонансное сопротивление последовательного и параллельного контуров?
- как определить добротность по АЧХ контура?
- чем отличаются свободные колебания контуров от вынужденных?
- что такое резонанс токов и резонанс напряжений?

### Лабораторная работа №3

#### Исследование каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером в режиме линейного усиления на фиксированной частоте

##### 1.Цель работы.

Снятие динамической проходной и амплитудной характеристик резистивно-емкостного ( $RC$ ) усилительного каскада, собранного по схеме с общим эмиттером, изучение различных режимов работы каскада по постоянному току.

##### 2.Основные сведения

Сопротивления, включаемые в цепи электродов активного элемента в усилительном каскаде, оказывают существенное влияние на режим его работы. Рассмотрим каскад резистивного усилителя, собранного по схеме с общим эмиттером на биполярном транзисторе (рис. 9).

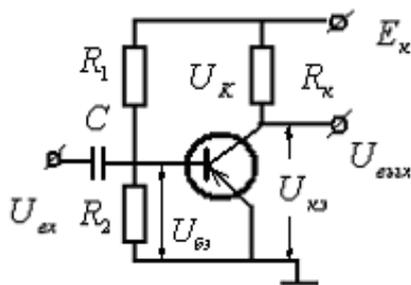


Рис.9

В цепь источника питания с ЭДС  $E_k$  оказываются последовательно включенными сопротивление нагрузки и коллекторная цепь транзистора. Для этой цепочки можно записать :  $E_k = U_{кэ} + U_{R_k}$ .

Поскольку напряжение на  $R_k$  меняется при изменении коллекторного тока  $U_{R_k} = R_k I_k$ , одновременно будет меняться и напряжение  $U_{кэ}$ . Таким образом,  $U_{кэ}$  является функцией  $I_k$ , который в свою очередь зависит от входного напряжения  $U_{бэ}$ . Зависимости между мгновенными значениями напряжений и токов в цепях активного элемента при наличии в них сопротивлений называются динамическими характеристиками. Динамическая характеристика, построенная на выходных статических характеристиках транзистора, называется нагрузочной прямой. Для схемы с общим эмиттером выражение, описывающее нагрузочную прямую, имеет вид  $R_k I_k = E_k - U_{кэ}$ .

Нагрузочная прямая может быть построена по двум точкам, отложенным на осях координат (рис. 10,а) и определяемым при  $U_{кэ}=0$  и  $I_k=0$ . Она позволяет определять для каждого значения тока соответствующее ему значение  $U_{кэ}$  при заданном сопротивлении нагрузки и ЭДС источника питания.

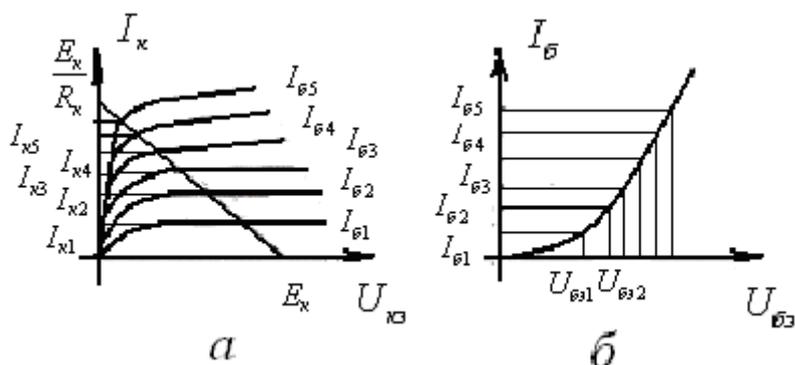


Рис.10

Проходной динамической характеристикой (ДПХ) называют зависимость выходного тока  $I_k$  от напряжения  $U_{бэ}$  при наличии нагрузки  $R_k$  в коллекторной цепи. При построении ДПХ используют точки пересечения нагрузочной прямой с выходными статическими характеристиками транзистора (рис. 10,а). Каждой такой точке соответствует свой ток коллектора  $I_{k,i}$  и свой ток базы  $I_{б,i}$  (ток базы, при котором снята данная характеристика).

Используя полученные таким образом токи базы  $I_{б,i}$  и входную статистическую характеристику транзистора (рис. 10,б), устанавливается связь между током коллектора  $I_{k,i}$  и напряжением  $U_{бэ,i}$ . Типичный вид динамической проходной характеристики приведен на рис. 11.

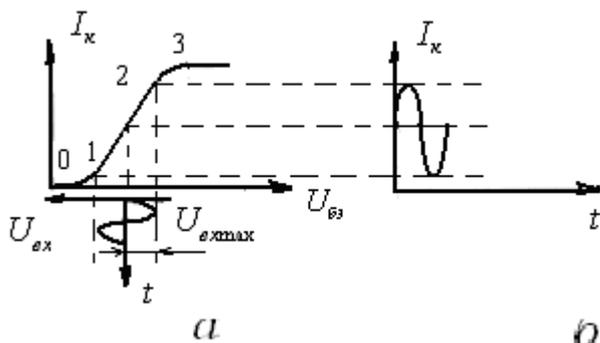


Рис.11

На ней можно выделить линейный участок (1;2) и нелинейные участки (0;1) и (2;3). При подаче на вход некоторого постоянного смещения  $U_{бэ,0}$  и переменного сигнала  $U_{вх} = U_{вх,м} \sin \omega t$  на выходе транзистора будет протекать ток, форма которого зависит от положения рабочей точки ( $U_{бэ,0}$ ) и амплитуды  $U_{вх,м}$ . Если рабочая точка соответствует середине рабочего участка характеристики и амплитуда входного сигнала не выходит за его пределы, то выходной ток по форме совпадает с входным напряжением (см. рис. 11). Смещение рабочей точки и увеличение амплитуды приводят к искажениям формы тока. Таким образом, динамическая проходная характеристика позволяет осуществить правильный выбор режима работы по постоянному току усилительного каскада и определить динамический диапазон его работы. По ней же может быть определен и коэффициент усиления каскада при его работе в линейном режиме. Для этого необходимо построить зависимость  $U_{кэ} = f(U_{бэ})$ , используя выражение  $U_{кэ} = E_k - I_k(U_{бэ})R_k$ , и определить тангенс угла наклона ее линейного участка.

Для подачи смещения на базу биполярного транзистора используется несколько вариантов схем. В схеме рис.9 смещение задается с помощью делителя  $R_1, R_2$ . Сопротивления резисторов делителя выбираются таким образом, чтобы ток делителя был больше тока базы  $I_{\text{б}0}$  в 5 - 10 раз. В этом случае  $U_{\text{б}0} \approx E_{\text{к}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ . Схема с делителем и автономным источником в цепи базы используется в универсальном макете для выполнения данной и последующей лабораторных работ. Схема макета представлена на рис.12.

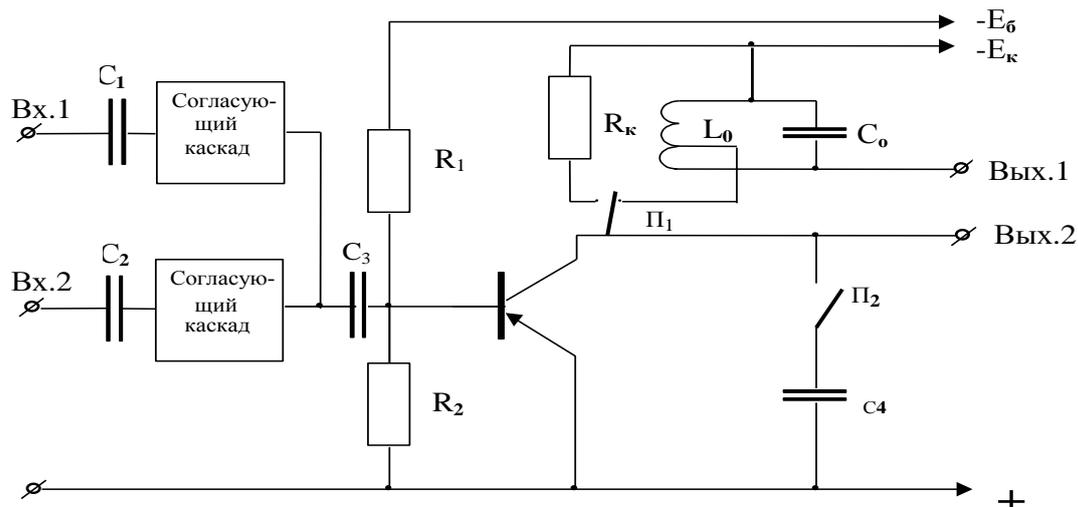


Рис.12

### 3. Порядок выполнения работы.

- 1) Включить в коллекторную цепь резистор  $R_{\text{к}}$ , повернув переключатель  $\Pi_1$  влево (см. схему макета); емкость  $C_4$  отключить (переключатель  $\Pi_2$  вправо);
- 2) подвести в цепь делителя и коллекторную цепь напряжение от отдельных источников питания;
- 3) используя цифровой вольтметр, установить в коллекторной цепи напряжение питания  $E_{\text{к}} = -6\text{В}$ ;
- 4) меняя напряжение на делителе  $E_{\text{б}}$  и измеряя цифровым вольтметром напряжения  $U_{\text{к}0}$  и  $U_{\text{б}0}$ , снять зависимость  $U_{\text{к}0} = f(U_{\text{б}0})$ ;
- 5) построить динамическую проходную характеристику, выбрать рабочую точку, определить напряжение смещения  $U_{\text{б}0,0}$  и максимальную амплитуду входного сигнала  $U_{\text{вх},\text{max}}$ , обеспечивающие линейный режим работы усилителя, рассчитать коэффициент усиления;
- 6) установить на базе транзистора выбранное смещение  $U_{\text{б}0,0}$ , подать на вход от генератора Г6-46 гармонический сигнал с частотой 20 кГц и амплитудой, несколько меньшей максимальной; с помощью осциллографа убедиться в линейной работе каскада.
- 7) изменяя амплитуду входного сигнала, снять и построить график амплитудной характеристики  $U_{\text{м,вых}}(U_{\text{м,вх}})$  каскада;
- 8) подать на вход гармонический сигнал с амплитудой, превышающей  $U_{\text{вх},\text{max}}$ , зарисовать осциллограмму напряжения на выходе;

9) подать на вход гармонический сигнал с амплитудой меньше  $U_{вх,мах}$ . Сместить рабочую точку ( $U_{бэ,0}$ ) сначала на нижний, а затем на верхний участок проходной характеристики, зарисовать две осциллограммы выходного напряжения.

#### 4. Содержание отчета.

- схема каскада, статические характеристики транзистора с нагрузочной прямой, проходная характеристика;

- снятая зависимость  $U_{кэ} = f(U_{бэ})$  и определенные по ней динамическая проходная характеристика;  $U_{бэ,0}$ ;  $U_{вх,мах}$ ;  $K_{ус}$ .

- амплитудная характеристика и 3 осциллограммы.

#### 5. Контрольные вопросы.

- как осуществляется построение нагрузочной прямой?

- как построить динамическую проходную характеристику по статическим характеристикам транзистора и нагрузочной прямой?

- чем обеспечивается линейный режим работы резистивного усилительного каскада, собранного по схеме с общим эмиттером;

- какие вы знаете схемы подачи напряжения на вход транзистора?

- объяснить полученные в работе осциллограммы.

## Лабораторная работа №4

### Исследование работы усилительного каскада с общим эмиттером в режиме линейного усиления в полосе частот при различных нагрузках

#### 1. Цель работы.

Снятие амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик усилительного каскада с общим эмиттером, работающего в линейном режиме, при резистивной и резонансной нагрузках.

#### 2. Основные сведения.

При анализе работы усилительного каскада в полосе частот необходимо учитывать, что в состав его схемы входят частотно-зависимые пассивные элементы, определяющие режим работы каскада по постоянному и переменному току, а также то, что реальные схемы всегда имеют паразитные емкости.

Для проведения анализа строится эквивалентная схема каскада по переменному току, в которой транзистор заменяется схемой, приведенной на рис. 13.

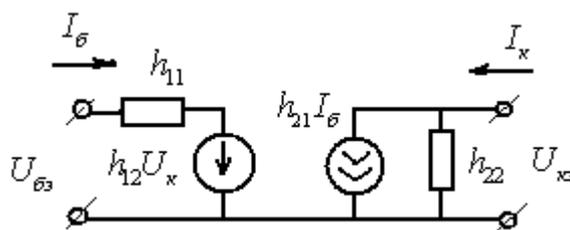


Рис.13

Эта схема является эквивалентной схемой транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, и ее элементы определяются через  $h$ -параметры четырехполюсника, описывающего транзистор.

$h$ -параметры могут быть определены через отношения приращений соответствующих переменных в окрестности рабочей точки по статическим входным и выходным характеристикам транзистора:

$$h_{11э} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{б}} \right|_{U_{кэ}=const} \quad \text{здесь} \quad \Delta U_{бэ} = U_{бэ3} - U_{бэ2}, \Delta I_{б} = I_{б1} - I_{б2}, U_{кэ2} = const \quad (\text{рис. 14, а});$$

$$h_{12э} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{б}=const} \quad \text{здесь} \quad \Delta U_{бэ} = U_{бэ3} - U_{бэ1}, \Delta U_{кэ} = U_{кэ2} - U_{кэ1}, I_{б1} = const \quad (\text{рис. 14, а});$$

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{б}} \right|_{U_{кэ}=const} \quad \text{здесь} \quad \Delta I_{к} = I_{к2} - I_{к1}, \Delta I_{б} = I_{б3} - I_{б1}, U_{кэ1} = const \quad (\text{рис. 14, б});$$

$$h_{22э} = \left. \frac{\Delta I_{к}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{б}=const} \quad \text{здесь} \quad \Delta U_{кэ} = U_{кэ3} - U_{кэ2}, I_{б2} = const \quad (\text{рис. 14, б}).$$

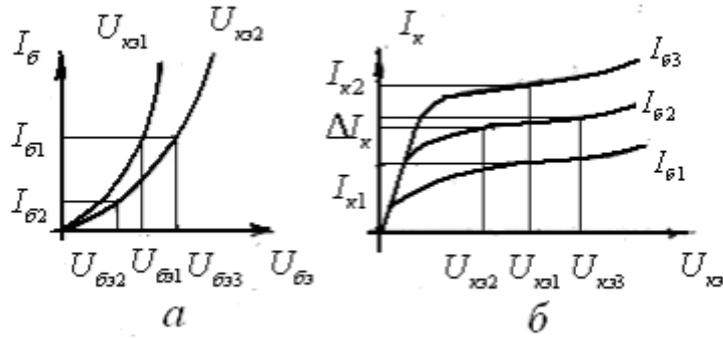


Рис.14

Эквивалентная схема резистивного каскада с общим эмиттером по переменному току приведена на рис. 15. Здесь  $R_{ВХ}$  - сопротивление параллельно включенных  $h_{11э}$  и делителя, обеспечивающего рабочую точку.  $C_2$  - разделительная емкость,  $C_1 = C_{вых} + C_M + C_H$ ,  $C_{вых}$  - выходная емкость транзистора,  $C_M$  - емкость монтажа,  $C_H$  - емкость нагрузки, в качестве нагрузки может выступать следующий каскад многокаскадного усилителя.  $R_2$  - сопротивление нагрузки.

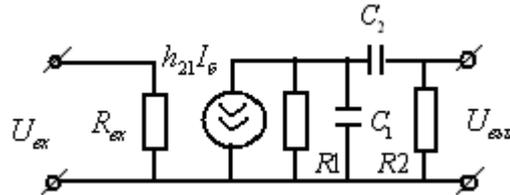


Рис.15

Емкости  $C_1$  и  $C_2$  включены в схему по-разному и будут оказывать влияние на ее работу на разных частотах. В рабочей области усилителя сопротивление  $C_2$  мало по сравнению с  $R_2$ , а сопротивление  $C_1$  велико по сравнению с  $R_1$ ; поэтому они не оказывают влияния на работу усилителя. Эквивалентная схема в полосе частот усиления имеет вид рис.16, а коэффициент усиления определяется выражением  $K_o = h_{21} \frac{R_{экв}}{h_{11э}}$ ,  $R_{экв} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ .

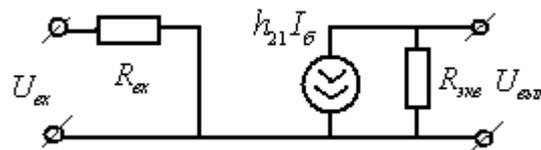


Рис.16

АЧХ на этом участке постоянна, набег фазы равен  $180^\circ$ . В области низких частот эквивалентная схема имеет вид рис.17,а.

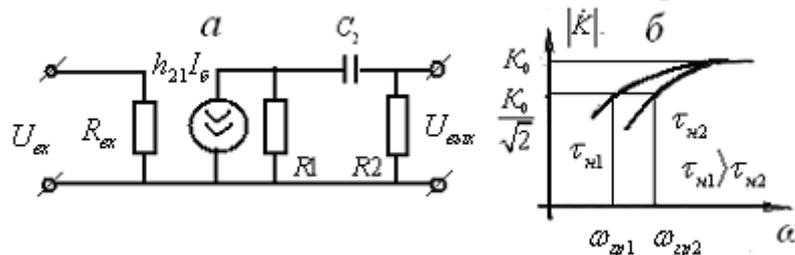


Рис.17

Коэффициент усиления в области низких частот определяется выражением

$$\dot{K}_H = \frac{K_o}{1 + \frac{1}{j\omega C_2(R_1 + R_2)}} = \frac{K_o}{1 + \frac{1}{j\omega \tau_H}}$$

Модуль этого выражения определяет АЧХ, а фаза – ФЧХ каскада:

$$|\dot{K}_H| = K_o / \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega \tau_H}\right)^2}; \quad tg \varphi_H = \frac{1}{\omega \tau_H}$$

АЧХ в области нижних частот приведена на рис.17,б. Спад АЧХ тем больше, чем меньше постоянная времени  $\tau_H$ , определяющая граничную частоту в области низких частот.

В области высоких частот схема имеет вид рис. 18,а. Здесь

$$\dot{K}_\epsilon = \frac{K_o}{1 + j\omega C_1 R_{\text{экв}}} = \frac{K_o}{1 + j\omega \tau_\epsilon}; \quad \text{АЧХ } |\dot{K}_\epsilon| = \frac{K_o}{1 + (\omega \tau_\epsilon)^2}; \quad tg \varphi_\epsilon = -\omega \tau_\epsilon$$

Спад АЧХ в области верхних частот показан на рис. 18,б. Характеристика падает тем круче, чем больше  $\tau_\epsilon$ . Полоса рабочих частот определяется по спаду АЧХ усилителя в  $\sqrt{2}$  раз. Граничные частоты могут быть определены через постоянные времени  $\omega_H = \frac{1}{\tau_H}$ ;  $\omega_\epsilon = \frac{1}{\tau_\epsilon}$ .

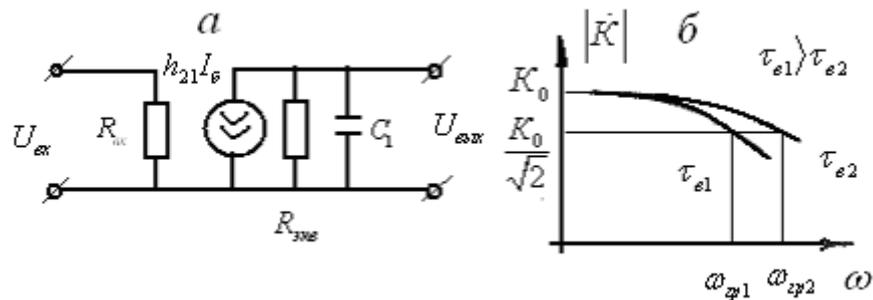


Рис.18

Если в усилительном каскаде вместо резистивной нагрузки используется колебательный контур, то получается избирательный усилитель. Оценка избирательных свойств требует проведения анализа свойств данного усилителя в узкой полосе частот вблизи резонанса. При проведении анализа можно воспользоваться методом, изложенным выше. Эквивалентная схема избирательного усилителя по переменному току представлена на рис.19.

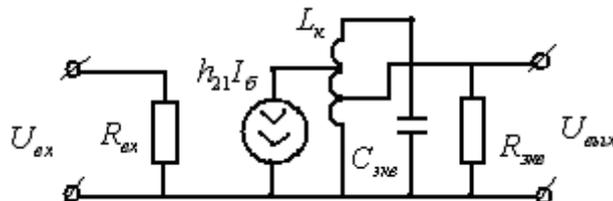


Рис.19

Здесь  $R_{\text{экв}}$  определяется выходным сопротивлением каскада, сопротивлением катушки индуктивности и сопротивлением нагрузки,  $C_{\text{экв}}$  определяется емкостями контура, монтажа, выхода и нагрузки. Как видно из рисунка, частотно-зависимым элементом, входящим в схему, является параллельный колебательный контур, и толь-

ко его свойства будут определять АЧХ и ФЧХ усилителя. Избирательные свойства усилителя сильно зависят от добротности этого контура  $Q_{ЭКВ} = R_{ЭКВ} / \rho$ . Для уменьшения влияния выходного сопротивления транзистора на добротность контура применяют частичное (неполное) включение транзистора к контуру.

### 3. Домашнее задание.

- зарисовать схемы резистивного усилительного каскада, собранного по схеме с общим эмиттером, избирательного усилителя и их эквивалентные схемы;
- записать формулы для определения АЧХ и ФЧХ резистивного усилителя;
- по графикам (рис. 20) определить  $h$  – параметры транзистора;
- рассчитать коэффициент усиления усилителя и постоянные времени на верхних и нижних частотах при  $R_K=200$  Ом,  $C_M=5$  пФ,  $C_2=2$  мкФ, а также граничные частоты.

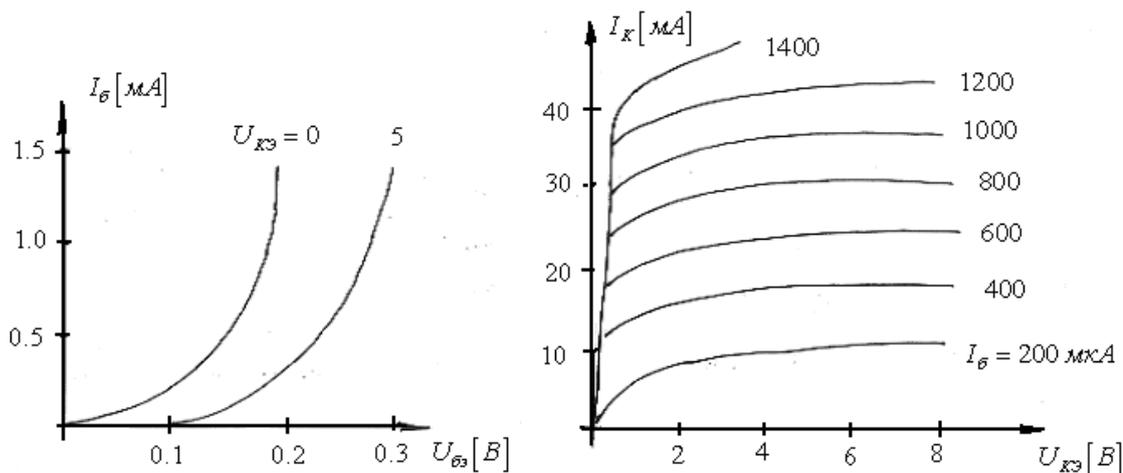


Рис.20

### 4. Порядок выполнения работы.

- 1) включить в коллекторную цепь резистор  $R_K$  (переключатель  $\Pi_1$  - влево); емкость  $C_4$  отключить (переключатель  $\Pi_2$  - вправо);
- 2) подвести в цепи делителя и коллектора усилителя напряжения  $E_0$  и  $E_K$  от отдельных источников питания;
- 3) установить  $E_K = -6$ В и напряжение смещения, соответствующее середине линейного участка, выбранное в предыдущей работе;
- 4) от генератора Г6-46 подать на вход гармонический сигнал с амплитудой, обеспечивающей линейный режим работы;
- 5) снять и построить АЧХ и ФЧХ каскада, определить граничные частоты.
- 6) подключить резонансную нагрузку (переключатель  $\Pi_1$  - вправо); частоту генератора установить равной резонансной, указанной на макете;
- 7) снять и построить АЧХ и ФЧХ избирательного каскада, определить резонансную частоту, полосу пропускания и добротность.

### 5. Содержание отчета

- принципиальные и эквивалентные схемы резистивного и избирательного каскадов;
- рассчитанные  $h$  – параметры, коэффициент усиления, постоянные времени и граничные частоты;
- снятые АЧХ и ФЧХ резистивного каскада;
- определенные экспериментально граничные частоты и коэффициент усиления в полосе частот усиления ;

- снятые АЧХ и ФЧХ избирательного усилителя; параметры каскада.

#### 6. Контрольные вопросы

- какие формулы определяют АЧХ и ФЧХ резистивного каскада в области высоких и низких частот?
- нарисуйте эквивалентную схему резистивного каскада по переменному току;
- как определяются  $h$  – параметры транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, по его статическим характеристикам?
- нарисуйте эквивалентную схему транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером;
- нарисуйте эквивалентную схему по переменному току избирательного усилителя.

## Лабораторная работа №5

### Амплитудная модуляция

#### 1. Цель работы.

Исследование работы амплитудного модулятора. Выбор режима работы транзистора модулятора.

#### 2. Основные сведения.

Амплитудной модуляцией называется процесс управления амплитудой высокочастотного несущего колебания с целью передачи информации. Для амплитудно-модулированных сигналов справедливо выражение  $a(t) = A(t)\sin(\omega_0 t + \varphi)$ . При тональной модуляции  $a(t) = [A_0 + \Delta A \cos(\Omega t + \psi)]\cos(\omega_0 t + \varphi)$ , где  $\omega_0$  - несущая частота АМ-сигнала,  $\Omega$  - частота модуляции, причем  $\frac{\omega}{\Omega} \gg 1$ . Вид амплитудно-модулированного колебания приведен на рис.21,а.

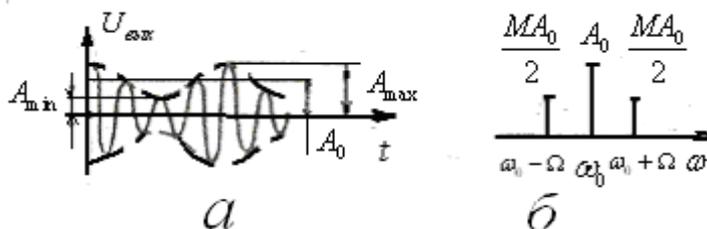


Рис.21

Пунктирная линия носит название огибающей.  $\Delta A = (A_{\max} - A_{\min})/2$  - амплитуда модуляции,  $M = \frac{\Delta A}{A_0}$  - коэффициент глубины модуляции. Для неискаженной передачи информации коэффициент глубины модуляции не должен превышать единицу:  $0 \leq M \leq 1$ .

Спектр амплитудно-модулированного колебания при тональной модуляции легко определяется из выражения для  $a(t)$  с помощью тригонометрических преобразований:

$$a(t) = A_0[1 + M \cos \Omega t] \cos \omega t = A_0 \cos \omega t + \frac{MA_0}{2} \cos(\omega + \Omega)t + \frac{MA_0}{2} \cos(\omega - \Omega)t.$$

Первое слагаемое представляет собой несущую, второе - верхнюю боковую частоту, третье - нижнюю боковую частоту. Амплитуды боковых частот одинаковы и равны  $\frac{MA_0}{2}$ . Спектр амплитудно-модулированного колебания при тональной модуляции показан на рис.21,б.

Схема базового амплитудного модулятора приведена на рис.22.

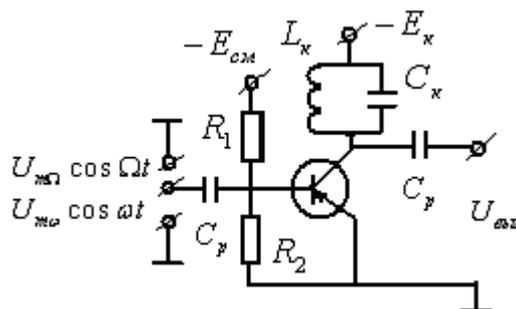


Рис.21

На вход амплитудного модулятора поступают одновременно несущие колебания и управляющий сигнал. Контур настраивается на частоту несущих колебаний.

Рабочая точка  $U_{\delta\omega 0}$  в этом случае выбирается на нижнем нелинейном участке динамической проходной характеристики каскада, где в окрестности рабочей точки ДПХ может быть аппроксимирована полиномом второй степени:

$$I_K = a_0 + a_1 u_{\delta\omega} + a_2 u_{\delta\omega}^2. \quad (1)$$

Величина несущих колебаний  $U_{m,0}$  при этом выбирается достаточно малой, а амплитуда управляющего напряжения  $U_{m,\Omega}$  выбирается такой, чтобы мгновенное значение напряжения  $u_{\delta\omega}(t)$  не выходило за пределы квадратичного участка (см. рис. 23).

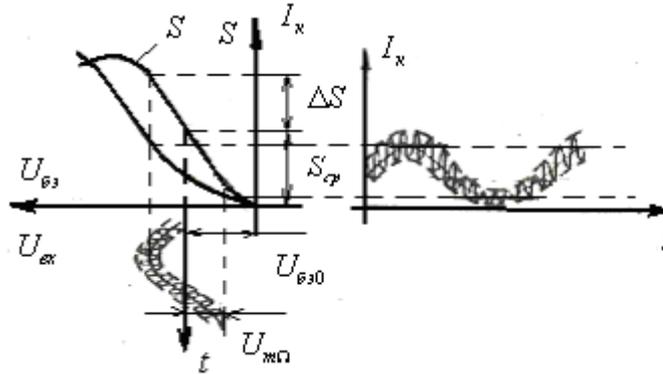


Рис.23

Подставив в (1) выражение для напряжения, действующего на базе транзистора  $u_{\delta\omega}(t) = -U_{\delta\omega 0} + U_{m,0} \sin \omega_0 t + U_{m,\Omega} \sin \Omega t$ , нетрудно убедиться, что его коллекторный ток будет содержать различные спектральные составляющие. Напряжение на контуре будут создавать только те составляющие, которые попадают в полосу пропускания вблизи резонансной частоты контура:

$$\begin{aligned} U_K &= Z_{\kappa,p} (a_1 U_{\omega m} \sin \omega t - 2a_2 U_{\delta\omega 0} U_{\omega m} \sin \omega t + 2a_2 U_{\omega m} U_{\Omega m} \sin \omega t \sin \Omega t) = \\ &= Z_{\kappa,p} U_{\omega m} (a_1 - 2a_2 U_{\delta\omega 0}) * \left[ 1 + \frac{2a_2 U_{\Omega m}}{a_1 - 2a_2 U_{\delta\omega 0}} \sin \Omega t \right] \sin \omega t \end{aligned}$$

Обозначая  $Z_{\kappa,p} \cdot U_{\omega m} (a_1 - 2a_2 U_{\delta\omega 0}) = U_{m,K,0}$  ;  $\frac{2a_2 U_{\Omega m}}{a_1 - 2a_2 U_{\delta\omega 0}} = M$ , получим

$u_K(t) = U_{m,K,0} (1 + M \sin \Omega t) \sin \omega t$ . Таким образом, с контура мы будем снимать амплитудно-модулированное колебание с огибающей, пропорциональной управляющему сигналу.

Работу базового амплитудного модулятора можно интерпретировать как работу резонансного усилителя, коэффициент усиления которого меняется во времени под действием управляющего напряжения. Поскольку мы работаем на квадратичном участке динамической проходной характеристики, изменение крутизны на нем линейно (см. график  $S(u_{\delta\omega})$  на рис. 23). Соответственно изменяются коэффициент усиления каскада и амплитуда колебаний коллекторного тока с несущей частотой. На контуре при этом выделяется амплитудно-модулированное колебание.

Одной из основных характеристик модулятора является статическая модуляционная характеристика (СМХ). По существу она характеризует изменение крутизны динамической проходной характеристики на частоте несущих колебаний при изменении напряжения смещения. Практически удобнее определять СМХ как зависимость коэффициента усиления несущих колебаний от напряжения смещения:

$$K(U_{\delta\omega}) = \frac{U_{m,вых}}{U_{m,0}} = S(U_{\delta\omega}) Z_{\kappa,p}.$$

При этом амплитуда входных высокочастотных колебаний должна оставаться малой и постоянной. Типичный вид статической модуляционной характеристики приведен на рис. 24,а. Рабочим здесь является линейный участок, совпадающий с квадратичным участком динамической проходной характеристики. По ней (рис. 24,а) определяется рабочее напряжение смещения  $U_{\text{бэ},0}$ , соответствующее середине линейного участка, максимальная амплитуда управляющего напряжения  $U_{m,\Omega}$  и коэффициент глубины модуляции  $M = \frac{\Delta K}{K_{cp}}$ .

Динамическая модуляционная характеристика  $M(\Omega)$  показывает влияние на процесс модуляции частотных свойств контура. Эта зависимость показана на рис. 24,б. При ее снятии модулятор должен работать на линейном участке СМХ. С увеличением частоты управляющего напряжения боковые составляющие удаляются от несущей и выходят за полосу пропускания контура, что приводит к снижению коэффициента глубины модуляции.

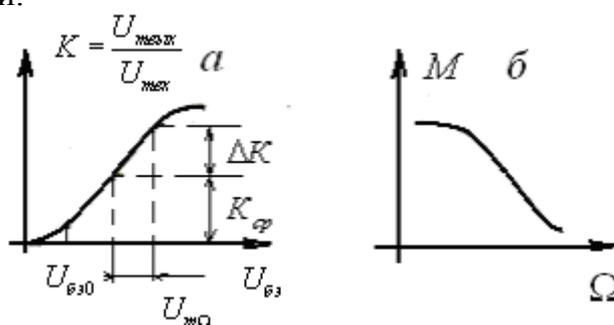


Рис.24

### 3. Домашнее задание.

- на динамической проходной характеристике, полученной в работе №3, выделить нижний нелинейный участок и перестроить его в большем масштабе;
- построить график зависимости крутизны от напряжения смещения  $S(U_{\text{бэ}})$ ;
- по графику определить  $U_{\text{бэ},0}$ , предельно допустимую амплитуду управляющего напряжения и коэффициент глубины модуляции;
- для выбранного режима нарисовать график  $i_k(t)$ .

### 4. Порядок выполнения работы.

1) включить в коллекторную цепь транзистора контур (переключатель  $\Pi_1$  - вправо); емкость  $C_4$  должна быть отключена (переключатель  $\Pi_2$  - вправо); подвести к схеме напряжение питания  $E_K = -6\text{В}$  и установить напряжение смещения, обеспечивающее работу каскада в линейном режиме (данные из предыдущих работ);

2) от генератора Г4-102 подать на вход  $I$  модулятора напряжение с  $U_{m,\Omega} = 10\text{ мВ}$  и настроиться в резонанс, фиксируя выходное напряжение с помощью осциллографа;

3) меняя напряжение смещения в пределах нижнего нелинейного участка динамической проходной характеристики, снять зависимость  $K(U_{\text{бэ}}) = \frac{U_{m,\text{вых}}}{U_{m,\omega}} = S(U_{\text{бэ}})Z_{к,р}$  - статическую модуляционную характеристику;

4) построить снятую зависимость, определить по ней  $U_{\text{бэ},0}$ ,  $U_{\Omega m}$  и максимальный коэффициент глубины модуляции;

5) установить на базе  $U_{\delta\omega_0}$ ; подать дополнительно на вход 2 управляющее напряжение от генератора Г6-46 с амплитудой  $U_{\Omega m}$  и частотой  $\Omega = 10^{-2} \div 10^{-3} \omega_0$ ; ( $U_{\Omega m}$  проконтролировать с помощью осциллографа);

6) проконтролировать с помощью осциллографа наличие амплитудно-модулированных колебаний на выходе модулятора;

7) зафиксировать данные оптимального режима работы модулятора  $U_{\delta\omega_0}$ ,  $U_{\Omega m}$ ,  $M$ , зарисовать осциллограммы;

8) установить напряжение смещения в область нижнего нелинейного участка статической модуляционной характеристики, снять осциллограмму на выходе;

9) включить в качестве нагрузки транзистора резистор  $R_K$  и зарисовать осциллограммы напряжений на его базе и коллекторе при работе на линейном и нижнем участках статической модуляционной характеристики.

#### 5. Содержание отчета.

- принципиальная схема амплитудного модулятора, построенные нижний нелинейный участок динамической проходной характеристики и зависимость крутизны от напряжения смещения, зависимость  $i_k(t)$ , определенные графически  $U_{\delta\omega_0}$ ,  $U_{m,\Omega}$ ,  $M$ ;

- снятая статическая модуляционная характеристика  $U_{\delta\omega_0}$ ,  $U_{\Omega m}$ ,  $M$ ;

- осциллограммы напряжения на выходе модулятора при включенном контуре;

- осциллограммы напряжения на выходе модулятора при включенном резисторе.

#### 6. Контрольные вопросы.

- как работает базовый амплитудный модулятор?

- какие основные характеристики модулятора вы знаете?

- как определяется максимальное управляющее напряжение, рабочее смещение и предельный коэффициент глубины модуляции по статической модуляционной характеристике?

- как выглядит спектр амплитудно-модулированного колебания?

## Лабораторная работа №6

### Амплитудный демодулятор (детектор)

#### 1. Цель работы.

Исследование работы амплитудного демодулятора

#### 2. Основные сведения.

Процесс амплитудного детектирования заключается в выделении из амплитудно-модулированных колебаний управляющего сигнала. Процесс этот нелинейный, поскольку сопровождается преобразованием спектра: из высокочастотного сигнала получается низкочастотный, пропорциональный спектру огибающей входного АМ-колебания. На выходе форма сигнала совпадает с управляющим сигналом (см.рис. 25).

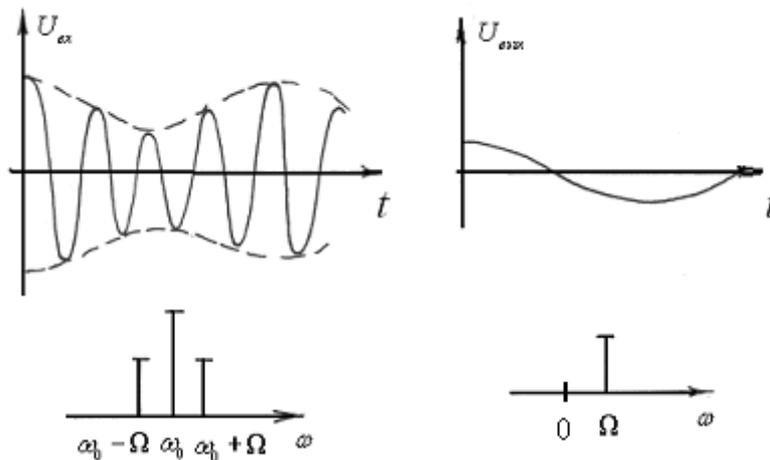


Рис.25

Схема коллекторного амплитудного демодулятора приведена на рис. 26. Он собран на усилительном каскаде с общим эмиттером, нагрузкой которого является RC-фильтр на элементах  $R_k$ ,  $C_k$ .

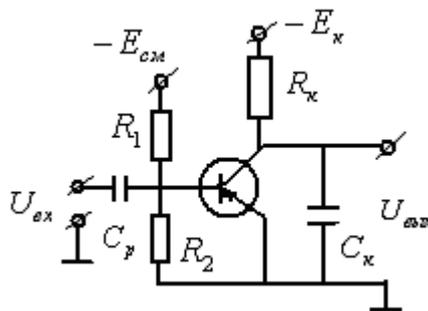


Рис.26

Поскольку на входе демодулятора действует амплитудно-модулированный сигнал с большой амплитудой, его динамическая проходная характеристика хорошо аппроксимируется линейно-ломаной кривой (рис. 27). Напряжение смещения устанавливается на уровне отсечки тока.

В этом случае ток, протекающий в выходной цепи, представляет собой последовательность импульсов косинусоидальной формы, следующих друг за другом с частотой несущей. Угол отсечки постоянен и равен  $90^\circ$ . Амплитуда импульсов выходного тока меняется по закону огибающей (см. рис. 27):

$$I_{k,\max}(t) = SU_{вх,ср}(1 + M \cos \Omega t).$$

При анализе работы демодулятора нас интересует поведение постоянной и низкочастотной составляющих в спектре последовательности косинусоидальных импульсов тока на его выходе. При использовании коэффициентов Берга они определяются выражением  $I_{\kappa,0}(t) = \alpha_o I_{\kappa,\max}(t)$ . Для угла  $\theta = 90^\circ$   $\alpha_o = \frac{1}{\pi}$ , и

$$I_{\kappa,0}(t) = \frac{SU_{\text{вх,ср}}}{\pi} + \frac{SMU_{\text{вх,ср}}}{\pi} \cos \Omega t.$$

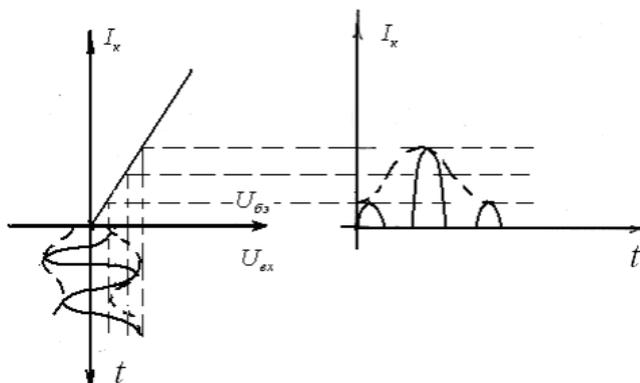


Рис.27

Отсюда видно, что между формой низкочастотной составляющей выходного тока демодулятора и огибающей амплитудно-модулированного сигнала в этом случае существует линейная зависимость. Такой демодулятор называется линейным.

Фильтр низких частот, включенный на выходе демодулятора, выделяет из всего спектра выходного тока только постоянную и низкочастотную составляющие. При этом его параметры должны удовлетворять неравенству  $\frac{1}{\Omega} \gg RC \gg \frac{1}{\omega_0}$ .

Одной из основных характеристик амплитудного демодулятора является его статическая детекторная характеристика (СДХ), которая представляет собой зависимость постоянной составляющей коллекторного тока от амплитуды входного несущего сигнала  $I_{\kappa,0}(U_{m,\omega,\text{вх}})$ . СДХ снимается при постоянном напряжении смещения  $U_{\text{бэ},0}$  и при условии, что глубина модуляции входных колебаний  $M=0$ . Практически удобнее измерять не ток, а напряжение на коллекторе транзистора. При этом  $U_{\kappa\varepsilon 0} = E_{\kappa} - I_{\kappa 0} R_{\kappa}$ . Типичный вид такой СДХ приведен на рис. 28,а.

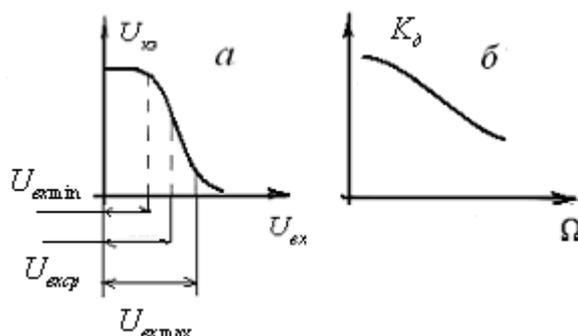


Рис.28

Рабочим является линейный участок статической детекторной характеристики, в пределах которого медленно меняющаяся составляющая тока коллектора изменяется пропорционально амплитуде входного сигнала. Зная его, можно определить пре-

дельно допустимый коэффициент глубины модуляции  $M = \frac{\Delta U_{\text{ex}}}{U_{\text{вхсп}}}$  где

$$\Delta U_{\text{ex}} = \frac{U_{\text{exmax}} - U_{\text{exmin}}}{2}, \text{ и коэффициент передачи демодулятора } K_{\text{д}} = \frac{U_{\text{m,вых}}}{MU_{\text{вхсп}}}.$$

Второй важной характеристикой амплитудного детектора является динамическая детекторная характеристика, показывающая влияние фильтра нижних частот на коэффициент передачи демодулятора. Она представляет собой зависимость коэффициента передачи демодулятора от частоты модуляции  $K_{\text{д}}(\Omega)$ . Типичная динамическая детекторная характеристика приведена на рис. 28,б. С ростом частоты управляющего сигнала емкость начинает оказывать шунтирующее действие на низкочастотную составляющую коллекторного тока, что снижает выходное напряжение и коэффициент передачи демодулятора.

### 3. Домашнее задание.

- нарисовать схему линейного коллекторного демодулятора;  
- провести линейно-ломаную аппроксимацию динамической проходной характеристики, полученной в лабораторной работе № 3; выбрать напряжение смещения  $U_{\text{бэо}}$ , обеспечивающее  $\theta = 90^\circ$ ;

- построить статическую детекторную характеристику  $I_{\text{к,о}}(U_{\text{m,ex}})$ , определить предельно допустимый коэффициент глубины амплитудной модуляции входных колебаний и максимальный коэффициент передачи демодулятора  $K_{\text{д}}$ ;

- рассчитать необходимые значения емкости фильтра для частот несущих колебаний  $f_0 = 500$  кГц и частоты модуляции  $F = 10$  кГц.

### 4. Порядок выполнения работы.

1) подвести к схеме напряжения питания  $E_{\text{к}} = -6\text{В}$  и  $E_{\text{б}}$ , установить напряжение смещения, соответствующее отсечке коллекторного тока  $90^\circ$ , и подключить к выходу усилителя RC-фильтр нижних частот (включить  $C_4$ );

2) подключить к входу схемы генератор Г4-102, а к выходу цифровой вольтметр и снять статическую детекторную характеристику  $U_{\text{кэ,о}}(U_{\text{m,ex}})$ ;

3) построить снятую характеристику, выделить на ней линейный участок;

4) определить  $U_{\text{вхсп}}$ ,  $U_{\text{exmax}}$ ,  $U_{\text{exmin}}$ , предельно допустимый коэффициент глубины модуляции  $M_{\text{max}}$  и коэффициент передачи демодулятора;

5) подать на вход амплитудного демодулятора амплитудно-модулированное колебание с  $M = M_{\text{max}}$ ;

6) подключив на выход осциллограф С1-55, снять осциллограммы при наличии нелинейных искажений и после подбора оптимальных параметров амплитудно-модулированного входного сигнала;

7) зафиксировать новые, оптимальные  $U_{\text{вхсп}}$  и  $M_{\text{max}}$ ;

8) отключить конденсатор фильтра  $C_4$  и снять осциллограмму выходного напряжения;

### 5. Содержание отчета.

- принципиальная схема демодулятора, результаты аппроксимации динамической проходной характеристики и статическая детекторная характеристика;

- определенные теоретически  $U_{\text{вхсп}}$ ,  $M_{\text{max}}$ ,  $K_{\text{д}}$ ,  $C$ ;

- снятая экспериментально статическая детекторная характеристика и определенные по ней  $U_{\text{вхсп}}$ ,  $M_{\text{max}}$ ,  $K_{\text{д}}$ ;

- оптимальные  $U_{вхр}$ ,  $M_{max}$ ,  $K_d$ ;

- снятые осциллограммы.

#### 6. Контрольные вопросы.

- какие процессы протекают в линейном коллекторном демодуляторе?

- какова роль фильтра в амплитудном демодуляторе и как подбираются его параметры?

- что такое статическая детекторная характеристика?

- какие параметры определяются по статической детекторной характеристике?

- объяснить зависимость коэффициента передачи детектора от частоты огибающей входного сигнала.

## Оглавление

Описание измерительных приборов, используемых при проведении данного цикла лабораторных работ.....	3
Лабораторная работа №.1. Анализ $RC$ -цепей.....	6
Лабораторная работа №.2. Исследование колебательных контуров.....	10
Лабораторная работа №.3. Исследование каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером в режиме линейного усиления на фиксированной частоте.....	14
Лабораторная работа №.4. Исследование работы усилительного каскада с общим эмиттером в режиме линейного усиления в полосе частот при различных нагрузках.....	18
Лабораторная работа №.5. Амплитудная модуляция.....	23
Лабораторная работа №.6. Амплитудный демодулятор.....	27

Утверждено на заседании кафедры радиоэлектроники.  
Протокол № 7 от 13 февраля 2007 г.

Учебное издание

Методические указания к лабораторным работам по курсам  
«Электротехника и электроника» и «Электроника и схемотехника»  
для студентов групп МС-21, МС-22, ЗИ-51, ЗИ-52

Составители: МУХИН Сергей Владимирович  
АНДРЕЕВСКАЯ Татьяна Михайловна

Редактор Е.С.Резникова  
Технический редактор О.Г.Завьялова

Подписано в печать 7.06.2007                      Формат 60x84/16.  
Бумага офсетная №2. Ризография. Усл.печ. 2,0. Уч.-изд.л. 1,9  
Изд.№ 74    Тираж 100 экз.    Заказ - 154                      Бесплатно  
Московский государственный институт электроники и математики.  
109028, Москва, Б.Трехсвятительский пер.,3/12.  
Отдел оперативной полиграфии Московского государственного института  
электроники и математики.  
113054, Москва, ул. М.Пионерская,12.