

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

---

**Кафедра основ радиотехники и защиты информации**

**А.А. Илюхин**

# **ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

**ПОСОБИЕ**

**по выполнению лабораторных работ № 5-9**

*для студентов II курса  
специальности 090302  
дневного обучения*

**Москва - 2012**

ББК 6П2.1  
И49

Рецензент проф. Д.Н. Яманов

Илюхин А.А.

И00 Теория электрических цепей: Пособие по выполнению лабораторных работ № 5-9. – М.: МГТУ ГА, 2012. – 32 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Теория электрических цепей» по Учебному плану для студентов II курса специальности 090302 дневного обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 19.04.12 г. и методического совета 19.04.12 г.

Редактор И.В. Вилкова

---

	Подписано в печать 02.07.12 г.	
Печать офсетная	Формат 60x84/16	1,54 уч.-изд. л.
1,86 усл.печ.л.	Заказ № 1476/	Тираж 80 экз.

---

*Московский государственный технический университет ГА*

125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

*Редакционно-издательский отдел*

125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а

© Московский государственный  
технический университет ГА, 2012

## Лабораторная работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

1. **Цель работы** – изучить методику расчёта и экспериментального получения переходной и импульсной характеристик цепи первого порядка.

#### 2. Краткие теоретические сведения

Если резистивно-индуктивную цепь без начального запаса энергии подключить к источнику постоянной ЭДС  $E$  (рис. 1), то ток будет нарастать не скачкообразно, а по экспоненциальному закону (рис. 2)

$$i(t) = I_0 \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \text{ при } t \geq 0,$$

где  $I_0 = \frac{E}{R}$  - установившееся значение тока после коммутации.

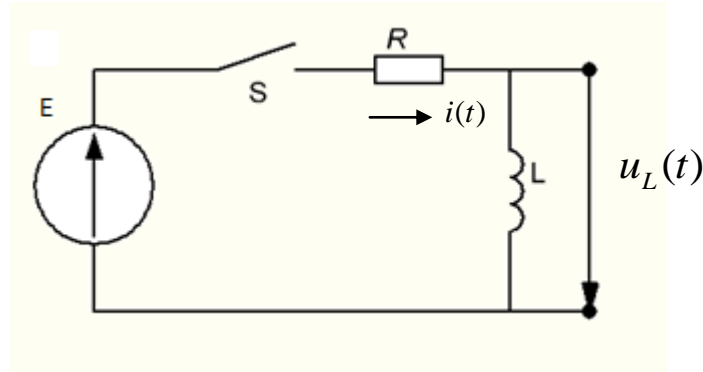


Рис. 1. Принципиальная схема рассматриваемой цепи

Напряжение на индуктивной катушке изменяется скачкообразно (рис. 2)

$$u_L(t) = \begin{cases} Ee^{-\frac{R}{L}t} & \text{при } t \geq 0, \\ 0 & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

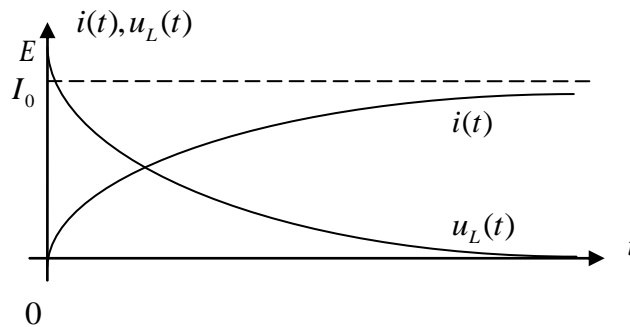


Рис. 2. Графики зависимостей  $i(t)$  и  $u_L(t)$

При подключении резистивно-емкостной цепи без начального запаса энергии к источнику постоянной ЭДС  $E$  (рис. 3) напряжение на конденсаторе  $u_c(t)$  изменяется по экспоненциальному закону, ток вначале претерпевает скачок  $I_0 = \frac{E}{R}$ , а затем убывает по экспоненте (рис. 4)

$$u_c(t) = E \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right), \quad i(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{при } t \geq 0.$$

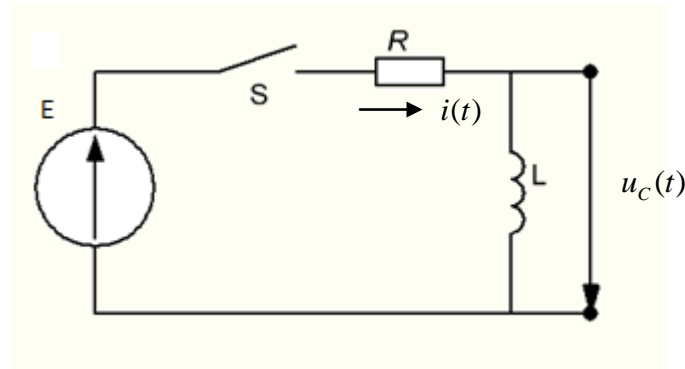


Рис. 3. Принципиальная схема рассматриваемой цепи

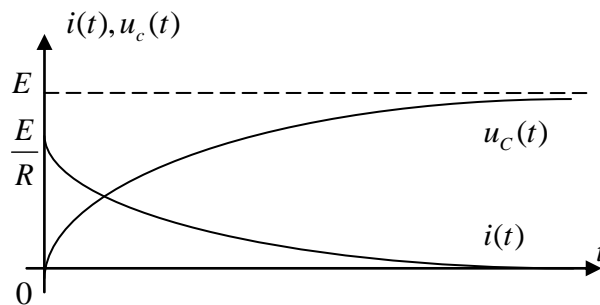


Рис. 4. Графики зависимостей  $i(t)$  и  $u_c(t)$

Постоянной времени цепи  $\theta$  называют время, в течение которого свободная составляющая тока или свободная составляющая напряжения уменьшается в  $e$  раз. В не разветвлённых  $RL$ -цепях  $\theta_{RL} = \frac{L}{R}$ , а в  $RC$ -цепях  $\theta_{RC} = RC$ .

При подключении цепи к источнику постоянной ЭДС  $E$  ток  $i(t)$  (в  $RL$ -цепи) или напряжение  $u_c(t)$  (в  $RC$ -цепи) за время  $t = \theta$  достигают значения, составляющего 0,63 от установившегося значения. Теоретически вынужденное значение тока  $i$  (в  $RL$ -цепи) или напряжения (в  $RC$ -цепи) устанавливаются через бесконечно большое время. Существуют различные критерии практического окончания переходного процесса. За время  $t = 2.3\theta$  напряжение

на конденсаторе (ток в индуктивной катушке) достигает значения  $0,9$  от установившегося значения, через  $t = 3\theta - 0,95$ , а через время  $t = 5\theta$  - более  $0,99$ . Аналогичные процессы происходят и при скачкообразном отключении источника постоянной ЭДС  $E$ .

### 3. Подготовка к работе

3.1. Рассчитать и построить амплитудно-частотную, переходную и импульсную характеристики от напряжения на входе к напряжению на конденсаторе цепи, изображённой на рис.5.

3.2. Рассчитать постоянную времени и полосу пропускания заданной цепи.

3.3. Рассчитать постоянную времени цепи и сопротивление резистора  $R_2'$ , необходимые для получения требуемой полосы пропускания  $\Delta f_{no}$  (остальные параметры цепи прежние).

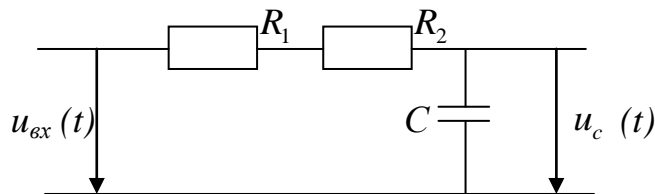


Рис. 5. Электрическая схема исследуемой цепи

3.4. Рассчитать постоянную времени цепи и сопротивление резистора  $R_2''$ , необходимые для получения требуемой реальной длительности переходной характеристики  $t_{no}$  (остальные параметры цепи прежние).

Исходные данные для предварительных расчётов приведены в табл.1.

Таблица 1

Вариант		1	2	3	4	5
Значение сопротивления и емкости элементов цепи	$R_1$ , кОм	10				
	$R_2$ , кОм	40	50	30	20	10
	$C$ , пФ	1200	2200	1500	4700	6800
Требуемая полоса пропускания $\Delta f_{no}$ , кГц		3,5	2,1	4,0	1,0	0,9
Требуемая реальная длительность переходной характеристики (на уровне 90%) $t_{no}$ , мкс		100	170	90	360	400

### 4. Контрольно-измерительная аппаратура

4.1. Генератор сигналов низкой частоты.

4.2. Милливольтметр переменного тока.

4.3. Генератор прямоугольных видеоимпульсов.

4.4. Осциллограф.

## 5. Порядок выполнения лабораторной работы

5.1. Получение амплитудно-частотной (АЧХ) характеристики цепи.

5.1.1. Структурная схема лабораторной установки приведена на рис. 6, принципиальная схема лабораторного макета – на рис. 7.

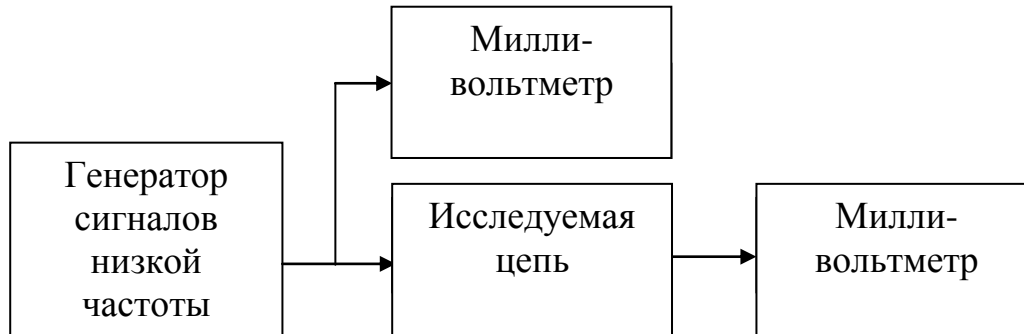


Рис. 6. Структурная схема лабораторной установки

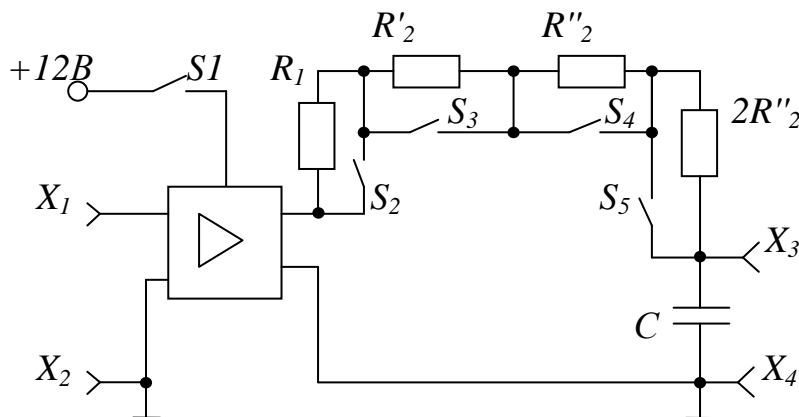


Рис. 7. Принципиальная схема исследуемой цепи

5.1.2. Собрать установку согласно рис. 6. На лабораторном макете произвести коммутацию резисторов таким образом, чтобы в исследуемой цепи присутствовали резисторы  $R_1$  и  $R'_2$  (тумблеры  $S_2$ ,  $S_3$  - в нижнем положении,  $S_4$ ,  $S_5$  - в верхнем положении). После проверки схемы руководителем занятия включить питание контрольно-измерительных приборов и лабораторного макета.

5.1.3. Установить на входе исследуемой цепи напряжение  $U_{\text{вх}} = 1$  В. Изменяя частоту сигнала генератора и поддерживая постоянным его выходное напряжение, для фиксированных значений частоты регистрировать напряжение на конденсаторе. Результаты свести в табл. 2. Отключить питание контрольно-измерительных приборов и лабораторного макета.

Таблица 2

$F, \text{кГц}$	
$U_c, \text{В}$	
$K(F) = U_c / U_{ex}$	

По полученным данным построить амплитудно-частотную характеристику цепи  $K(F)$  и сопоставить её с расчётной. По АЧХ определить полосу пропускания цепи и сравнить её с заданной величиной  $\Delta f_{no}$ .

5.2. Получение переходной и импульсной характеристик цепи.

5.2.1. Структурная схема лабораторной установки приведена на рис. 8. При получении осциллограмм временных характеристик цепи осуществить внешнюю синхронизацию осциллографа синхроимпульсами генератора прямоугольных видеоимпульсов.

5.2.2. Собрать установку согласно рис. 8. На лабораторном макете произвести коммутацию резисторов таким образом, чтобы в исследуемой цепи присутствовали резисторы  $R_1$  и  $R''_2$  (тумблеры  $S_2, S_4$  - в нижнем положении,  $S_3, S_5$  - в верхнем). Выставить на генераторе импульсов следующие параметры входного сигнала для получения осциллограммы переходной характеристики: амплитуда  $U_m = 1 \text{ В}$ , длительность  $t_u = 1 \text{ мс}$ , частота повторения  $F_n = 400 \text{ Гц}$ , полярность положительная. После проверки схемы руководителем занятия включить питание контрольно-измерительных приборов и лабораторного макета.

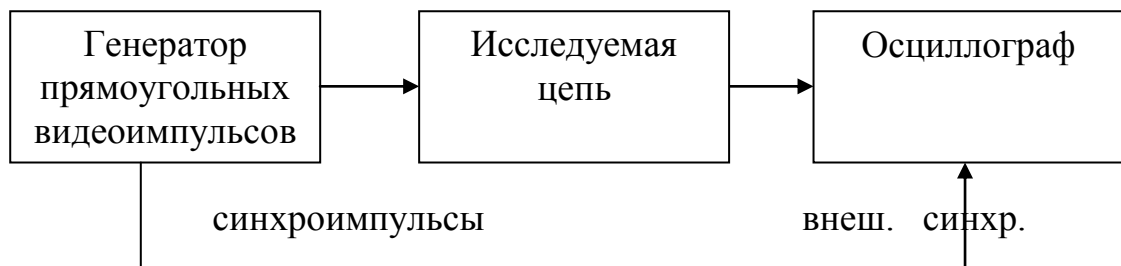


Рис. 8 Структурная схема лабораторной установки

5.2.3. На экране осциллографа наблюдать переходную характеристику цепи. Сравнить полученную характеристику с рассчитанной. Измерить реальную длительность переходного процесса на уровне, составляющем 90% от максимального значения, и сравнить с заданной величиной  $t_{no}$  и с постоянной времени цепи. Зарисовать осциллограмму.

5.2.4. Сопоставить переходную, амплитудно-частотную характеристики цепи и убедиться в выполнении предельный соотношений

$$h(0_+) = K(\infty), \quad h(\infty) = K(0).$$

5.2.5. Заменить резистор  $R''_2$  на резистор  $2R''_2$  (тумблеры  $S_2, S_5$  - в нижнем положении,  $S_3, S_4$  - в верхнем). Измерить реальную длительность переходной

характеристики на уровне 90% от максимального значения и сравнить её с заданной величиной  $t_{no}$ .

5.2.6. Выставить на генераторе импульсов следующие параметры входного сигнала для получения осциллограммы импульсной характеристики цепи: амплитуда  $U_m=10$  В, длительность  $t_u=1$  мкс, частота повторения  $F_n=400$  Гц, полярность – положительная. Заменить резистор  $2R''_2$  на резистор  $R''_2$  (тумблеры  $S_2, S_4$  – в нижнем положении,  $S_3, S_5$  – в верхнем). Наблюдать импульсную характеристику цепи. Сопоставить её с рассчитанной импульсной характеристикой и с переходной характеристикой. Измерить реальную длительность импульсной характеристики на уровне, составляющем 10% от максимального значения. Зарисовать осциллограмму.

## 6. Содержание отчёта

- 6.1. Расчёты и графики, выполненные при подготовке к работе.
- 6.2. Структурные схемы лабораторных установок и принципиальная схема исследуемой цепи.
- 6.3. Таблицы с данными для построения АЧХ.
- 6.4. График измеренной АЧХ и осциллограммы переходной и импульсной характеристик цепи.
- 6.5. Сравнительный анализ результатов расчёта и экспериментальных данных. Выводы о влиянии постоянной времени на реальную длительность переходных процессов в цепи и на избирательные свойства цепи.

## 7. Контрольные вопросы

- 7.1. Сформулируйте определения переходной, импульсной и комплексной частотной характеристик цепи.
- 7.2. Поясните методику экспериментального получения переходной, импульсной и амплитудно-частотной характеристик цепи.
- 7.3. Как зависит реальная длительность переходного процесса в цепи от ее постоянной времени, от ширины полосы пропускания частот?
- 7.4. Какова качественная связь между передаточной и переходной характеристиками цепи? В чем физический смысл предельных соотношений между этими характеристиками?
- 7.5. Приведите пример линейной цепи первого порядка, у которой переходная характеристика содержит дельта-функцию.
- 7.6. Приведите пример линейной цепи первого порядка, у которой импульсная характеристика содержит дельта-функцию.
- 7.7. Как по переходной характеристике рассчитать ее импульсную характеристику?

## Литература

1. Попов В.П. Основы теории цепей. - М.: Высшая школа, 2007.



## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО УСИЛИТЕЛЯ И УМНОЖИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

**1. Цель работы** - исследование нелинейного резонансного усиления и умножения частоты.

#### 2. Краткие теоретические сведения

Рассмотрим транзисторный усилитель (рис. 9) с нагрузкой в виде параллельного колебательного контура.

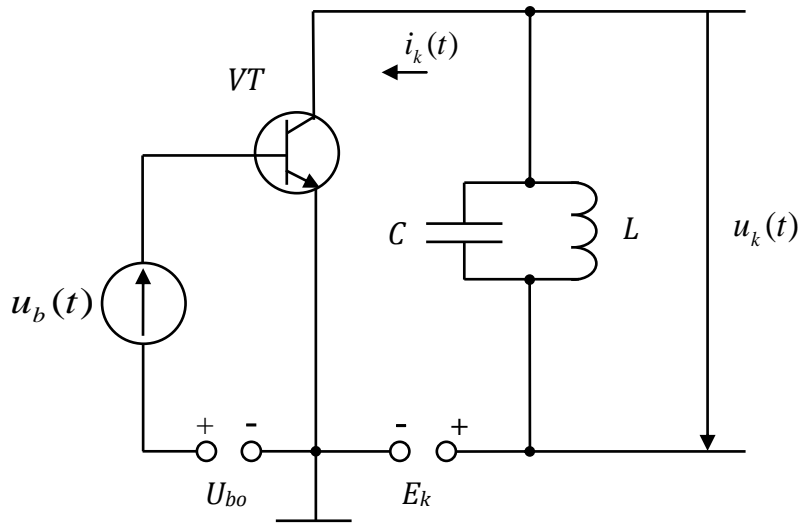


Рис. 9. Принципиальная схема нелинейного резонансного усилителя

На вход усилителя подано напряжение  $u_{bэ} t = U_{b0} + u_b t$ ,  $u_b t = U_{mb} \cos \omega_0 t$ .

Режим работы транзистора показан на рис.10.

Кусочно-линейная аппроксимация характеристики транзистора  $i_k(u_{bэ})$ :

$$i_k(u_{bэ}) = \begin{cases} S(u_{bэ} - U_0) & \text{при } u_{bэ} \geq U_0, \\ 0 & \text{при } u_{bэ} < U_0 \end{cases}$$

позволяет найти амплитуды гармонических составляющих тока как функции угла отсечки  $\theta$

$$I_{mkn} = S U_{mb} \gamma_n(\theta) = I_{max} \alpha_n(\theta),$$

где  $\alpha_n(\theta)$  и  $\gamma_n(\theta)$  - коэффициенты разложения косинусоидального импульса в ряд Фурье, графики зависимостей которых от угла отсечки для  $n = 0, 1, 2, 3$  приведены на рис.11.

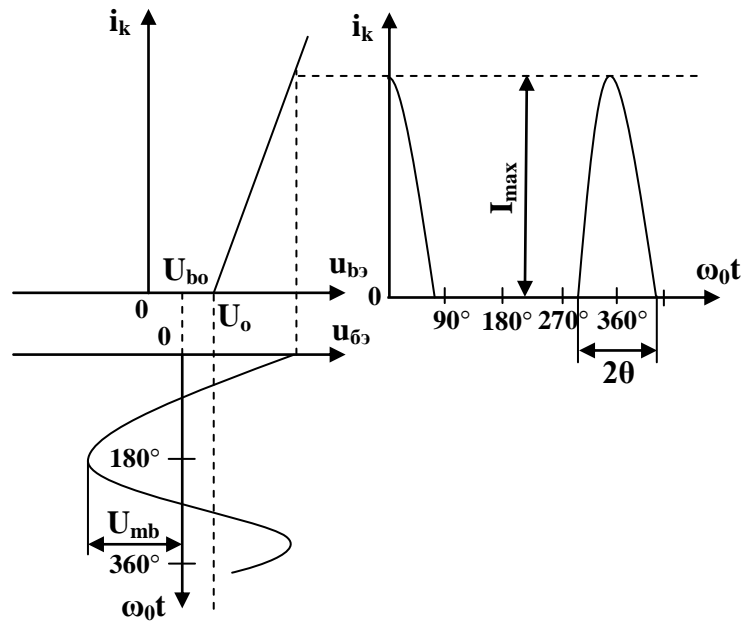


Рис. 10. Графики, поясняющие режим работы нелинейного резонансного усилителя

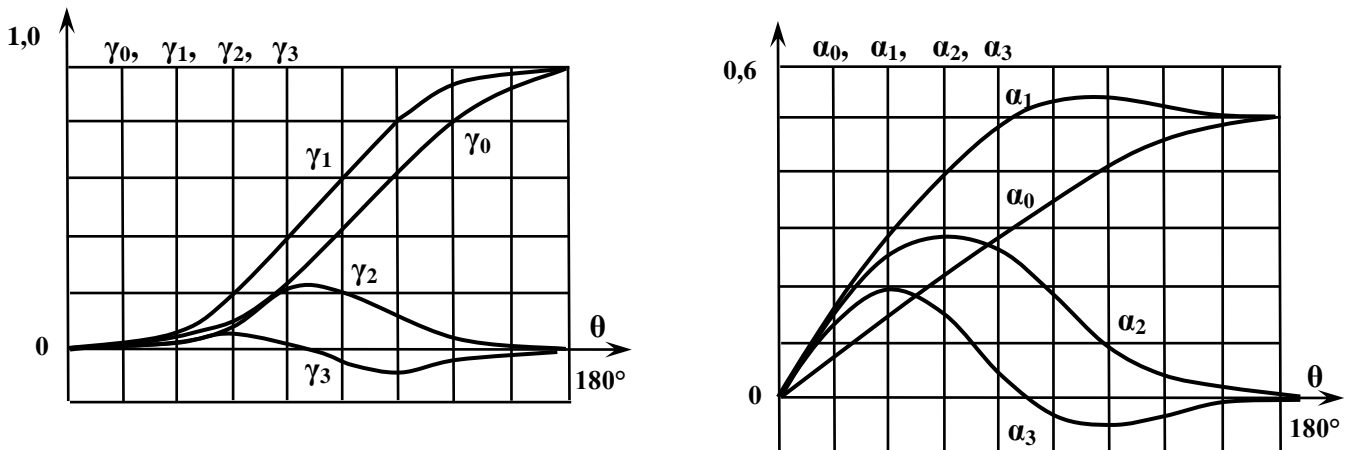


Рис. 11. Графики зависимостей коэффициентов Берга для  $n = 0, 1, 2, 3$

Угол отсечки  $\theta$  находят из соотношения  $\cos\theta = \frac{U_o - U_{bo}}{U_{mb}}$ .

Коэффициенты разложения  $\alpha_n(\theta)$  достигают наибольших значений при углах отсечки  $\theta_{\text{опт}} = \frac{120^\circ}{n}$ , а коэффициенты  $\gamma_n(\theta)$  – при  $\theta'_{\text{опт}} = \frac{180^\circ}{n}$ .

При этом ток, протекающий в коллекторной цепи транзистора

$$i_k t = I_{ko} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{mkn} \cos n \omega_o t,$$

напряжение на коллекторе, если контур настроен на частоту входного напряжения,

$$u_k(t) = E_k - I_{mk1} R_{kp} \cos \omega_o t = E_k - U_{mk1} \cos \omega_o t,$$

где  $R_{kp}$  – сопротивление параллельного контура при резонансе;

$U_{mk1}$  – амплитуда напряжения на контуре при резонансе, создаваемого первой гармоникой коллекторного тока.

Выходное напряжение усилителя можно записать так:  $u_{вых}(t) = I_{mk1} R_{kp} \cos \omega_0 t$ .

Если в схеме резонансного усилителя колебательная система будет настроена на частоту  $n\omega_0$ , то данное устройство может использоваться в качестве умножителя частоты. При этом напряжение на коллекторе транзистора и на выходе умножителя частоты будут иметь соответственно вид:

$$u_k(t) = E_k - I_{mkn} R_{kpn} \cos n\omega_0 t = E_k - U_{mkn} \cos n\omega_0 t,$$

$$u_{вых}(t) = I_{mkn} R_{kpn} \cos n\omega_0 t,$$

где  $R_{kpn}$  – резонансное сопротивление контура на частоте  $n\omega_0$ .

### 3. Подготовка к работе

3.1. Выполнить кусочно-линейную аппроксимацию вольт-амперной характеристики  $i_k(u_{bэ})$  транзистора *KT-315*, которая приведена на рис. 12.

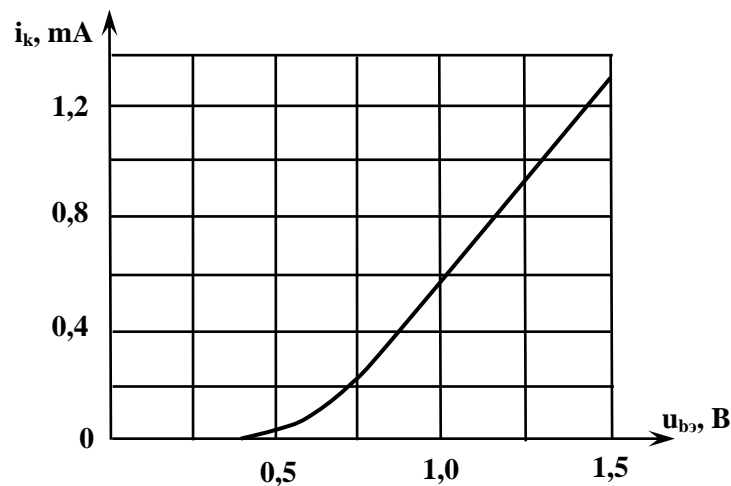


Рис. 12. Вольт-амперная характеристика транзистора

3.2. Используя аппроксимированную вольт-амперную характеристику транзистора, рассчитать значения  $U_{mb}$  нелинейного усилителя, соответствующие заданным значениям угла отсечки и напряжения смещения  $U_{bo}$  для следующих случаев:  $\theta = 180^\circ$ ,  $U_{bo} = 0,8 \text{ В}$ ;  $\theta = 120^\circ$ ,  $U_{bo} = 0,8 \text{ В}$ ;  $\theta = 90^\circ$ ,  $U_{bo} = 0,6 \text{ В}$ ;  $\theta = 60^\circ$ ,  $U_{bo} = 0,4 \text{ В}$ .

### 4. Контрольно-измерительная аппаратура

- 4.1. Генератор высокочастотных колебаний.
- 4.2. Осциллограф.
- 4.3. Милливольтметр переменного тока.
- 4.4. Лабораторная установка.

## 5. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка позволяет выполнять лабораторные работы № 6,8.

В сменном устройстве расположены нелинейный усилитель, нагрузку и режим которого можно изменять, и исследуемый последовательный диодный детектор.

Все органы управления лабораторной установки выведены на переднюю панель. Выбор исследуемой схемы осуществляется тумблером  $T2$ .

При исследовании нелинейного усиления внешнее высокочастотное гармоническое напряжение от генератора высокой частоты подводится к гнездам  $\Gamma1$ . Постоянное напряжение смещения на базе транзистора  $KT-315$  нелинейного усилителя можно изменять потенциометром  $U_{b0}$ . Постоянное напряжение измеряется вольтметром базового устройства.

В цепи эмиттера транзистора включен резистор сопротивлением 620 Ом. Характеристика транзистора  $i_k(u_{bэ})$ , снятая в этом режиме, приведена на рис. 12. С помощью тумблера  $T1$  переключается нагрузка в коллекторной цепи транзистора: в положении «1» включается параллельный колебательный контур, в положении «2» - резистор сопротивлением 1 кОм.

Гнезда  $\Gamma4$  и  $\Gamma5$  лабораторной установки используются для подключения милливольтметра и осциллографа, позволяющих измерять и наблюдать напряжения в различных точках схем. Необходимые для этого коммутации осуществляются с помощью переключателей «Вольтметр» и «Осциллограф».

Переключатель « $C_k$ » позволяет установить заданные значения емкости параллельного контура и его резонансной частоты.

## 6. Порядок выполнения лабораторной работы

6.1. Исследовать резистивный нелинейный усилитель.

6.1.1. Подключить генератор высокочастотных колебаний к гнездам  $\Gamma1$ ,  $Y$  – вход осциллографа – к гнездам  $\Gamma5$ , милливольтметр – к гнездам  $\Gamma4$ .

Установить частоту генератора в соответствии с заданными преподавателем положением переключателя « $C_k$ » и резонансной частотой параллельного контура, установить тумблер  $T2$  в положение «1», тумблер  $T1$  – в положение «2», переключатель «Вольтметр» - в положение « $\Gamma1$ », переключатель «Осциллограф» - в положение «А».

6.1.2. Изменяя выходное напряжение генератора высокой частоты, установить по милливольтметру рассчитанное при подготовке к работе значение амплитуды входного напряжения, соответствующее заданному углу отсечки, при этом учесть, что шкала милливольтметра проградуирована в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ .

Установить по вольтметру базового блока напряжение смещения, обеспечивающее заданный угол отсечки.

6.1.3. Зарисовать осциллограммы напряжения на выходе нелинейного резистивного усилителя при следующих условиях:  $\theta = 180^\circ, U_{bo} = 0,8 \text{ В}$ ;  $\theta = 120^\circ, U_{bo} = 0,8 \text{ В}$ ;  $\theta = 90^\circ, U_{bo} = 0,6 \text{ В}$ ;  $\theta = 60^\circ, U_{bo} = 0,4 \text{ В}$ .

6.2. Исследовать резонансный нелинейный усилитель.

Установить тумблер  $T1$  в положение «1», включив тем самым параллельный колебательный контур в нагрузочную цепь усилителя.

Используя милливольтметр, установить на выходе генератора высокочастотных колебаний напряжение  $U_b = 0,2 \text{ В}$ . Изменяя напряжение смещения ручкой  $U_{bo}$  от  $0,3 \text{ В}$  до  $1 \text{ В}$  и фиксируя при этом напряжение на контуре (для этого установить переключатель «Вольтметр» в положение «А»), снять зависимость  $U_k(U_{bo})$ .

Одновременно с фиксацией устанавливаемых значений  $U_{bo}$  и получаемых при этом напряжений  $U_k$  измерять угол отсечки  $\theta$  с помощью осциллографа, для чего переключатель «Осциллограф» ставить в положение «А», а тумблер  $T1$  - в положение «2». Результаты измерений свести в табл. 3.

**Таблица 3**

$U_{bo}, \text{ В}$	
$U_k, \text{ В}$	
$\theta, \text{ град}$	

По результатам табл. 3 построить график зависимости  $U_k(U_{bo})$ , сделать вывод о влиянии угла отсечки на выходное напряжение резонансного усилителя.

6.3. Исследовать удвоитель частоты.

6.3.1. Установить тумблер  $T1$  в положение «1», напряжения  $U_{bo} = 0,6 \text{ В}$ ,  $U_b = 0,2 \text{ В}$ . Уменьшая частоту генератора, добиться, чтобы частота второй гармоники тока совпадала с резонансной частотой контура.

6.3.2. Изменяя напряжение смещения  $U_{bo}$  от  $0,3 \text{ В}$  до  $1 \text{ В}$ , снять зависимость выходного напряжения удвоителя частоты  $U_k(U_{bo})$ . При этом (также как в п.6.2) измерять с помощью осциллографа угол отсечки  $\theta$ . Результаты измерений свести в табл. 4.

**Таблица 4**

$U_{bo}, \text{ В}$	
$U_k, \text{ В}$	
$\theta, \text{ град}$	

По результатам табл. 4 построить график зависимости  $U_k(U_{bo})$ , сделав вывод о влиянии угла отсечки на выходное напряжение удвоителя частоты.

6.4. Исследовать утроитель частоты.

Установить напряжение  $U_{bo} = 0,4 \text{ В}$ ,  $U_b = 0,3 \text{ В}$ .

Исследовать утроитель частоты по методике, изложенной в п.6.3, изменяя напряжение  $U_{bo}$  от  $0,2 \text{ В}$  до  $1 \text{ В}$ .

## **7. Содержание отчета**

- 7.1. Принципиальная схема нелинейного резонансного усилителя.
- 7.2. Результаты расчетов, полученные при подготовке к работе.
- 7.3. Осциллограммы напряжений на выходе нелинейного резистивного усилителя при различных углах отсечки.
- 7.4. Графики зависимостей, экспериментально полученных в работе.
- 7.5. Выводы и анализ полученных результатов.

## **8. Контрольные вопросы**

- 8.1. Поясните принцип работы нелинейного резонансного усилителя.
- 8.2. Как зависит угол отсечки коллекторного тока от напряжения смещения и амплитуды напряжения возбуждения?
- 8.3. Как определить амплитуды первой, второй и третьей гармоник коллекторного тока, если известны амплитуда напряжения возбуждения и крутизна аппроксимирующей прямой при кусочно-линейной аппроксимации?
- 8.4. Изобразите временные диаграммы коллекторного тока и напряжения на базе и коллекторе в схемах удвоителя и утроителя частоты.
- 8.5. Каковы энергетические преимущества режима с отсечкой тока по сравнению с линейным?

## **Литература**

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 2005.

## Лабораторная работа № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕНЕРИРОВАНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

1. **Цель работы** – исследование мягкого и жесткого режимов самовозбуждения  $LC$ -автогенератора с трансформаторной обратной связью.

#### 2. Краткие теоретические сведения

Автогенератор – это нелинейное устройство, преобразующее энергию источника питания в энергию колебаний.  $LC$  - автогенератор используется для получения высокочастотных гармонических колебаний. На рис. 13 приведена принципиальная схема  $LC$  - автогенератора с трансформаторной обратной связью.

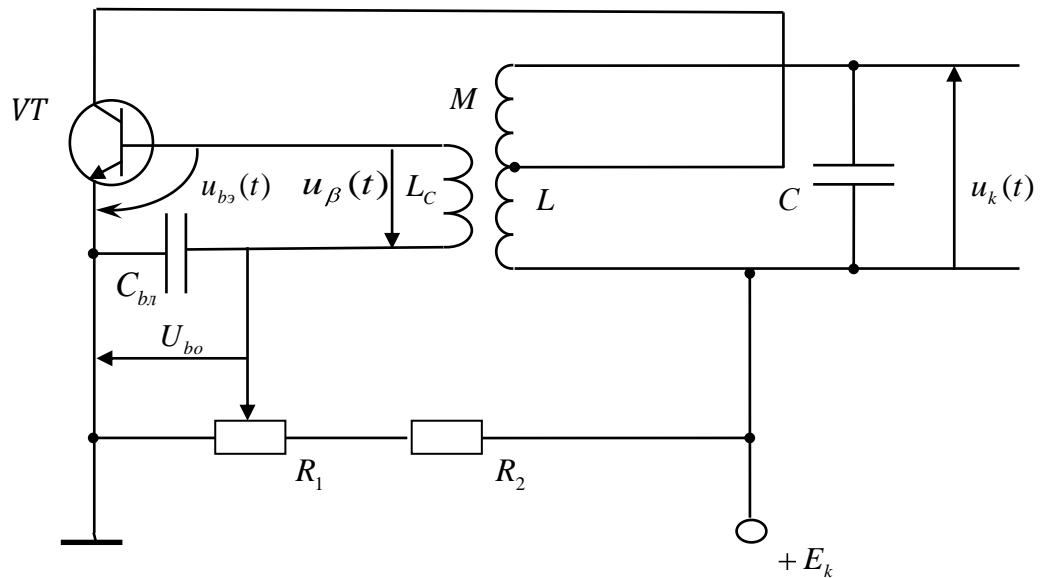


Рис. 13. Принципиальная схема  $LC$  - автогенератора с трансформаторной обратной связью

При анализе условий самовозбуждения автогенератора нелинейностью проходной характеристики транзистора  $i_k(u_{bэ})$  можно пренебречь вследствие малости амплитуды колебаний в начале процесса генерации. В этом случае работа схемы описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2 u_{вых}(t)}{dt^2} + \left( \frac{R}{L} \pm \frac{MS_{диф}}{LC} \right) \frac{du_{вых}(t)}{dt} + \omega_o^2 u_{вых}(t) = 0, \quad (1)$$

где  $M$  – коэффициент взаимной индукции;

$S_{диф}$  – дифференциальная крутизна характеристики транзистора  $i_k(u_{bэ})$  в рабочей точке;

$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – частота собственных колебаний контура без потерь.

При положительной обратной связи, что достигается соответствующим включением катушек  $L_{CB}$  и  $L$ , в выражении (1) выбирается верхний знак. При этом при критическом значении коэффициента взаимоиндукции, который определяется из условия

$$\frac{R}{L} - \frac{M_{кр} S_{диф}}{LC} = 0 \text{ и равен } M_{кр} = \frac{RC}{S_{диф}},$$

схема находится на грани устойчивости и при  $M > M_{кр}$  становится неустойчивой.

Частота и амплитуда колебаний в стационарном режиме автогенератора

определяется из условия  $\dot{S}_{cp} \dot{\beta} \dot{Z}_k = 1$ , (2)

вытекающего из анализа нелинейного дифференциального уравнения, описывающего работу автогенератора в режиме большого сигнала, когда нелинейностью проходной характеристики транзистора  $i_k(u_{bэ})$  пренебречь нельзя.

В выражении (2) обозначено:

$$\dot{S}_{cp} = \frac{\dot{I}_{mk1}}{\dot{U}_{mb}} = S_{cp} e^{j\varphi_s} - \text{комплексная средняя крутизна (крутизна по первой}$$

гармонике) проходной характеристики транзистора;

$\dot{I}_{mk1}$  и  $\dot{U}_{mb}$  – комплексные амплитуды первой гармоники коллекторного тока и напряжения на базе;

$$\dot{\beta} = \frac{\dot{U}_{mb}}{\dot{U}_{mk}} = \frac{j\omega M}{j\omega L + R} = \frac{M}{L} \left(1 - j \frac{R}{\omega L}\right) = \beta e^{j\varphi_\beta} - \text{комплексный коэффициент обратной}$$

связи;

(3)

$\dot{U}_{mk}$  – комплексная амплитуда напряжения на параллельном контуре;

$\dot{Z}_k = Z_k e^{j\varphi_z}$  – комплексное сопротивление параллельного контура.

Из выражения (2) вытекают два условия:

$$- \text{баланс амплитуд } S_{cp} \beta Z_k = 1; \quad (4)$$

$$- \text{баланс фаз } \varphi_s + \varphi_\beta + \varphi_z = n2\pi, n=0,1,2,\dots \quad (5)$$

Если не учитывать инерционности транзистора, то можно принять  $\varphi_s \approx 0$ .

При высокой добротности контура, учитывая, что  $R/\omega L \ll 1$ , из (3) имеем

$$\dot{\beta} \approx \beta = \frac{M}{L}, \quad \varphi_\beta \approx 0.$$

При этом из (5), полагая  $n = 0$ , получаем  $\varphi_z \approx 0$ , откуда следует, что

$$\dot{Z}_k \approx Z_k = R_{кр},$$

где  $R_{кр}$  – резонансное сопротивление контура, а также, что частота генерации совпадает с резонансной частотой контура  $\omega_r = \omega_p$ . Баланс амплитуд (4) имеет место в точке пересечения колебательной характеристики



$I_{mk1}(U_{mb}) = S_{cp}(U_{mb}) U_{mb}$  и прямой обратной связи  $I_{mk1oc}(U_{mb}) = \frac{U_{mb}}{\beta R_{kp}}$ .

В зависимости от выбора рабочей точки  $U_{bo}$  на проходной характеристике транзистора возможны мягкий и жесткий режимы возбуждения автогенератора. При мягком режиме, когда рабочая точка выбирается на линейном участке проходной характеристики транзистора, кроме точки  $U_{mb} = 0$  имеется одна точка пересечения колебательной характеристики с прямой обратной связи, которая соответствует устойчивым стационарным колебаниям с амплитудой  $U_{mb cr}$  (рис. 14).

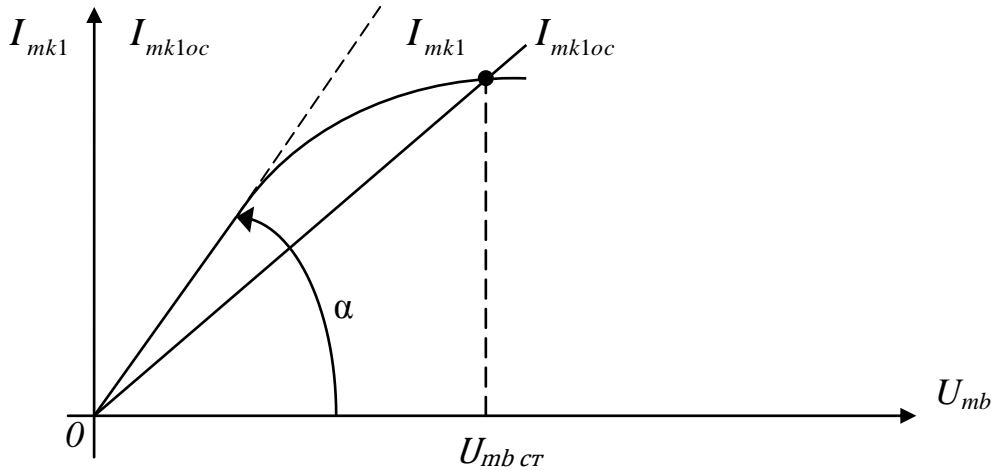


Рис. 14. К определению мягкого режима

При мягком режиме возникновение и срыв колебаний происходит при одном и том же критическом значении коэффициента обратной связи, которое определяется углом наклона касательной к колебательной характеристике в точке

$$U_{mb=0} \quad \beta_{kp} = \frac{M_{kp}}{L} = \frac{1}{R_{kptg\alpha}}. \quad (6)$$

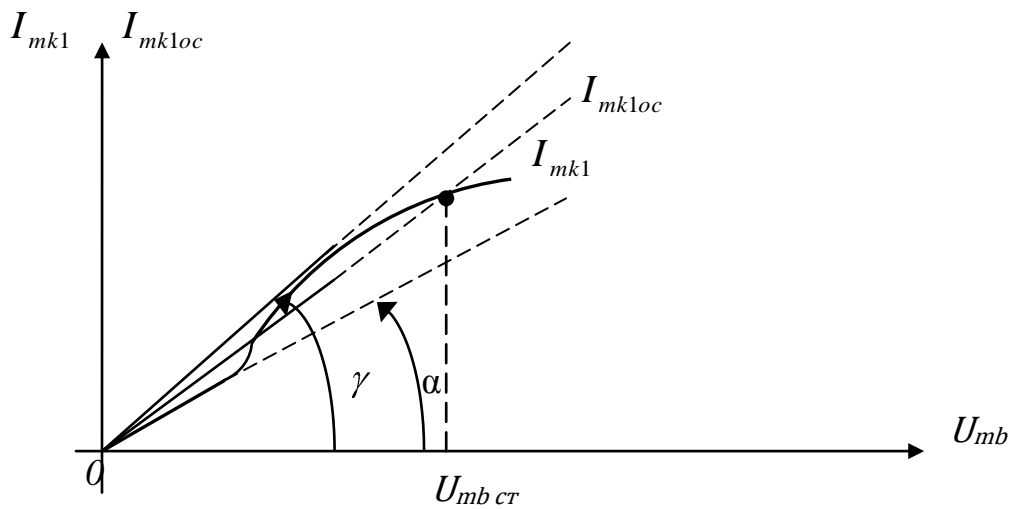


Рис. 15. К определению жесткого режима

При жестком режиме кроме точки  $U_{mb}=0$  имеется две точки пересечения колебательной характеристики с прямой обратной связи (рис.15).

Устойчивым колебаниям с амплитудой  $U_{mb\ cr}$  соответствует точка, для которой крутизна колебательной характеристики меньше крутизны прямой обратной связи. При жестком режиме возникновение колебаний происходит при  $\beta_{кр.}$  и  $M_{кр.}$ , определяемых (6), а срыв колебаний при  $\beta = \frac{M}{L} = \frac{1}{R_{кр}tg\gamma}$ .

### 3. Контрольно-измерительная аппаратура

- 3.1. Генератор высокочастотных колебаний.
- 3.2. Милливольтметры переменного тока.
- 3.3. Лабораторная установка.

### 4. Описание лабораторной установки

В сменном устройстве находятся транзисторный  $LC$  - автогенератор с трансформаторной обратной связью и ряд вспомогательных устройств, позволяющих исследовать работу автогенератора. Необходимые для этого коммутации осуществляются переключателем  $S1$ , имеющим четыре положения: «*ОС выкл.*», «*ОС вкл.*», «*Синхр.*», «*Нестая.*». При разомкнутой обратной связи (положение «*ОС выкл.*») можно снимать колебательную характеристику автогенератора. В положении «*ОС вкл.*» может быть проведено исследование автогенератора в стационарном режиме. В положении «*Синхр.*» можно исследовать автогенератор при внешнем воздействии, которое подается через вспомогательный трансформатор. При исследовании автогенератора в нестационарном режиме (положение «*Нестая.*») цепь коллектора транзистора подключается к генератору прямоугольных импульсов.

Ручкой « $U_{смещ.}$  Грубо Точно» можно плавно изменять напряжение смещения, которое измеряется вольтметром базового устройства. В установке значение коэффициента обратной связи изменяется за счет перемещения катушки связи  $L_{св.}$  ручкой « $M$ ». Гнезда  $G1$  используются для подключения генератора высокочастотных колебаний, гнезда  $G2$  – для измерения напряжения генератора высокочастотных колебаний с помощью внешнего милливольтметра. К гнездам  $G3$  и  $G4$  подводятся соответственно переменное напряжение с коллектора транзистора и напряжение обратной связи. Гнезда  $G5$  используются для подключения генератора прямоугольных видеоимпульсов.

### 5. Порядок выполнения работы

5.1. Снять колебательные характеристики автогенератора при разомкнутой обратной связи для двух смещений  $U_{bo}=0,7$  В,  $U_{bo}=0,5$  В.

5.1.1. Собрать схему исследования. Установить переключатель « $S1$ » в положение «*ОС выкл.*». Подключить к гнездам  $G1$  генератор высокочастотных колебаний, к гнездам  $G2$  и  $G3$  – милливольтметры.

5.1.2. Настроить схему в резонанс изменением частоты генератора, предварительно установив смещение  $U_{bo}=0,7$  В и  $U_b=0,1$  В.

Снять зависимость  $U_k(U_b)$  при заданных значениях напряжения смещения, изменяя напряжение возбуждения  $U_b$  от 0 до 0,5 В. Результаты измерений свести в табл. 5.

Таблица 5

$U_b, \text{ В}$		
$U_k, \text{ В}$	$U_{bo} = 0,7 \text{ В}$	
	$U_{bo} = 0,5 \text{ В}$	

Построить кривые зависимости  $U_k(U_b)$ .

5.2. Определить экспериментально коэффициенты обратной связи, соответствующие различным расстояниям между катушками.

5.2.1. Установить  $U_{bo}=0,7$ В,  $U_b=0,1$ В, измерить напряжение на контуре  $U_k$ .

5.2.2. Отключить милливольтметр от гнезд  $\Gamma 2$  и подключить к гнездам  $\Gamma 4$ .

Изменяя расстояние между катушками  $l$ , фиксировать напряжение обратной связи  $U_\beta$ .

Рассчитать значения коэффициента обратной связи, соответствующие различным расстояниям между катушками  $l$  по формуле  $\beta = \frac{U_\beta}{U_k}$ .

Результаты измерений и расчетов свести в табл. 6.

Таблица 6

$l, \text{ см}$	
$U_\beta, \text{ В}$	
$\beta$	

Построить график зависимости  $\beta(l)$ .

5.3. На графике колебательных характеристик построить семейство прямых обратной связи, соответствующих различным значениям коэффициента обратной связи  $\beta$ .

Используя колебательные характеристики и прямые обратной связи, построить зависимость  $U_k(\beta)$  для жесткого и мягкого режимов самовозбуждения.

5.4. Снять зависимость напряжения  $U_k(\beta)$ , генерируемых колебаний от коэффициента обратной связи при  $U_{bo} = 0,7$  В,  $U_b = 0,5$  В.

5.4.1. Перевести переключатель  $SI$  в положение «*ОС* *вкл.*», отключить милливольтметр, подключенный к гнездам  $\Gamma 4$ .

5.4.2. Снять зависимость  $U_k(l)$ , фиксируя напряжение на контуре автогенератора (гнезда ГЗ) при уменьшении и увеличении расстояния между катушками. Заметить расстояния, соответствующие возникновению и срыву колебаний в автогенераторе.

Результаты измерений свести в табл. 7.

**Таблица 7**

$l, \text{ см}$		
$U_k, \text{ В}$	$U_{bo} = 0,7 \text{ В}$	
	$U_{bo} = 0,5 \text{ В}$	

5.4.3. Построить зависимость  $U_k(\beta)$ , пользуясь графиком  $\beta(l)$ , полученным в п. 5.2.2. Сравнить графики зависимости  $U_k(\beta)$ , построенные в данном пункте и в п. 5.3.

## 6. Содержание отчета

- 6.1. Принципиальная схема автогенератора.
- 6.2. Таблицы, графики, полученные при выполнении лабораторного задания.
- 6.3. Сравнение и анализ данных расчета и эксперимента, выводы по работе.

## 7. Контрольные вопросы

- 7.1. Дайте определение колебательной характеристики автогенератора.
- 7.2. Чем определяется режим самовозбуждения автогенератора?
- 7.3. Приведите колебательные характеристики для мягкого и жесткого режимов самовозбуждения.
- 7.4. Как определяется амплитуда генерируемых колебаний по колебательной характеристике?
- 7.5. Поясните зависимость амплитуды генерируемых колебаний от коэффициента обратной связи при мягком и жестком режимах самовозбуждения.

## Литература

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 2005.

## Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ И АМПЛИТУДНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

1. **Цель работы** – исследование физических процессов при амплитудной модуляции смещением и при детектировании амплитудно-модулированных колебаний диодным детектором.

#### 2. Краткие теоретические сведения

Для получения *АМ* - колебаний при модуляции смещением к входу модулируемого усилителя, схема которого приведена на рис. 16, подводятся постоянное напряжение смещения  $U_{bo}$ , определяющее рабочую точку; низкочастотный модулирующий сигнал  $u_{нч}(t)$ , управляющий изменением средней крутизны нелинейного элемента-транзистора; высокочастотное колебание  $u_{вч}(t)$  с амплитудой  $U_{mb}$  и частотой  $\omega_o = \omega_p$ , для которого нелинейный элемент может рассматриваться как усилитель с переменным параметром  $S_{cp}$ , управляемым модулирующим напряжением.

Режим работы транзистора при получении гармонической модуляции смещением показан на рис. 17 .

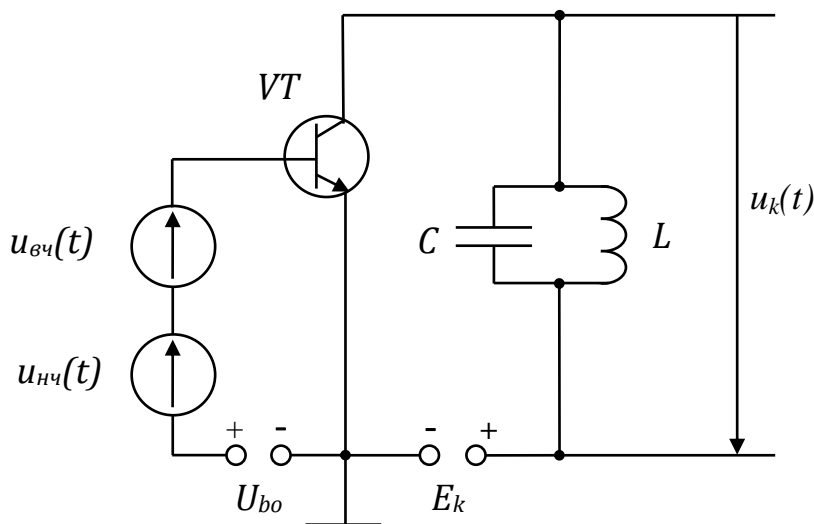


Рис. 16. Принципиальная схема транзисторного модулируемого усилителя с модуляцией смещением

Для оценки качества воспроизведения модулирующего сигнала огибающей *АМ* - колебания удобно пользоваться статическими и динамическими модуляционными характеристиками.

Статическая модуляционная характеристика представляет собой зависимость первой гармоники коллекторного тока  $I_{mk1}$  или напряжения на

контуре  $U_{mk} = I_{mk1} R_{kp}$  от модулирующего фактора, например, напряжения смещения  $U_{bo}$  при постоянной амплитуде высокочастотных колебаний  $U_{mb}$ .

Методика расчёта статической модуляционной характеристики при кусочно-линейно аппроксимации характеристики нелинейного элемента следующая: присваивая смещению на базе  $U_{bo}$  различные значения от  $U_o - U_{mb}$  до  $U_o + U_{mb}$ , вычисляют

$$I_{mk1} = S U_{mb} \gamma_1 \theta = S U_{mb} \frac{1}{\pi} (\theta - \sin\theta \cos\theta),$$

где  $S$  – крутизна линейно-растущего участка аппроксимирующей функции;  
 $\gamma_1 \theta$  – коэффициент разложения косинусоидального импульса в ряд Фурье.

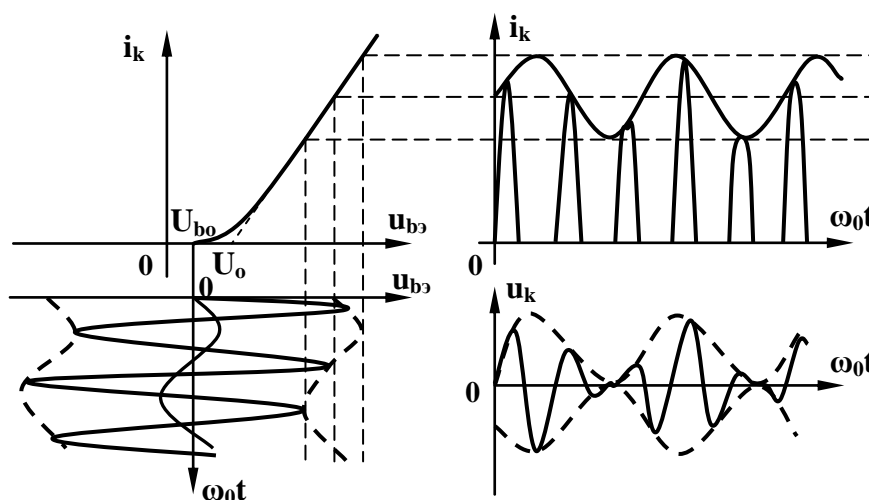


Рис.17. Графики, поясняющие режим работы транзистора при получении гармонической модуляции смещением

Статическая модуляционная характеристика используется для выбора режима модулируемого усилителя. Рабочую точку нелинейного элемента выбирают на середине линейного участка этой характеристики. По статической модуляционной характеристике можно определить коэффициент нелинейных искажений огибающей  $AM$ -колебаний.

Динамическая модуляционная характеристика показывает зависимость коэффициента модуляции напряжения на контуре  $M$  от амплитуды модулирующего напряжения  $U_{m\Omega}$ .

Детектирование – это процесс, обратный модуляции: при детектировании  $AM$ -колебаний восстанавливается низкочастотный сигнал, управляющий амплитудой высокочастотных колебаний. Детектор должен содержать нелинейный преобразователь, осуществляющий трансформацию спектра сигнала, и фильтр нижних частот, выделяющий низкочастотные компоненты. Принципиальная схема исследуемого диодного детектора дана на рис. 18.

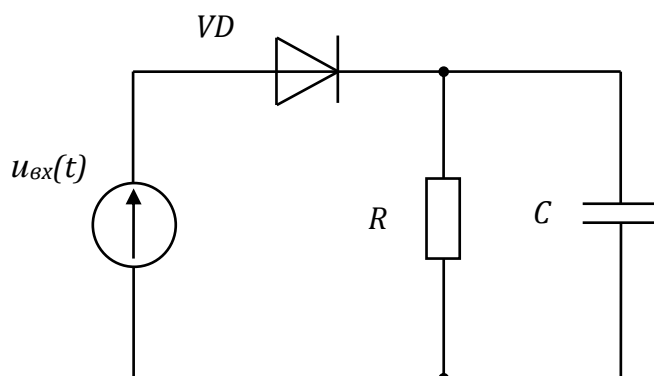


Рис. 18. Принципиальная схема исследуемого диодного детектора

Постоянная времени  $\theta_{RC} = RC$  фильтра нижних частот выбирается так, чтобы обеспечить неискажённое воспроизведение огибающей  $AM$ -колебаний и необходимое сглаживание высокочастотных пульсаций

$$\frac{2\pi}{\omega_0} \leq RC \leq \frac{2\pi}{\Omega},$$

где  $\omega_0$  - несущая частота  $AM$ -колебаний;

$\Omega$  - наивысшая частота в спектре модулирующего сигнала.

Важными характеристиками амплитудных детекторов являются характеристики детектирования, под которыми подразумевают зависимости постоянной составляющей тока  $I_D$  или постоянного напряжения на выходе детектора  $U_D = I_D R$  от амплитуды высокочастотных колебаний. Режим работы диодного детектора определяется амплитудой высокочастотных колебаний: для слабых сигналов, наибольшая амплитуда которых не превосходит 0,1 – 0,2 В, имеет место квадратичное детектирование; для сильных сигналов, амплитуда которых не менее 1 В, режим детектирования линейный. При детектировании слабых сигналов можно считать, что вольт-амперная характеристика диода приближённо аппроксимируется степенным полиномом  $i(u) = a_0 + a_1 u + a_2 u^2$ . В этом случае характеристика детектирования имеет квадратичный характер

$$I_D = \frac{a_2 \cdot U_m^2}{2},$$

где  $U_m$  - амплитуда высокочастотных колебаний.

При квадратичном детектировании колебаний, амплитуда которых изменяется по закону  $U_m t = U_{m0}(1 + M \cos \Omega t)$ , возникают нелинейные искажения, на выходе детектора появляется колебание с частотой  $2\Omega$  и амплитудой  $\frac{a_2 M^2}{4} U_{m0}^2$ .

При анализе работы диодного детектора в режиме сильных сигналов применяется кусочно-линейная аппроксимация вольт-амперной характеристики диода

$$i_u = \begin{cases} Su & \text{при } u > 0 \\ 0 & \text{при } u < 0 \end{cases}$$

В этом случае увеличение амплитуды колебаний вызывает увеличение выходного напряжения  $U_D$ , причём угол отсечки  $\theta$  остаётся величиной постоянной, зависящей только от параметров схемы

$$\theta = \frac{3\pi}{SR},$$

характеристика детектирования линейна  $U_D = U_m \cos\theta$ , коэффициент передачи детектора  $K_D = \frac{U_D}{U_m} = \cos\theta$ , а выходное сопротивление линейного диодного детектора по первой гармонике  $R_{\text{вх1}} = \frac{R}{2}$ .

### 3. Подготовка к работе

3.1. Рассчитать и построить статическую модуляционную характеристику транзисторного усилителя с базовой модуляцией смещением при действии на входе высокочастотного колебания с частотой  $f_o = f_p$  и амплитудой  $U_{mb} = 0,4$  В. Использовать кусочно-линейную аппроксимацию, изображённую на рис. 12, характеристики транзистора.

3.2. Рассчитать и построить по статической модуляционной характеристике зависимость коэффициента модуляции напряжения на контуре от амплитуды модулирующего напряжения, выбрав рабочую точку на середине линейного участка статической модуляционной характеристики.

3.3. Оценить значение емкости нагрузки, при которой возможно неискажённое детектирование АМ - колебаний с частотой модуляции  $F = 400$  Гц и несущей частотой  $f_o = f_p$ , принять  $R = 20$  кОм.

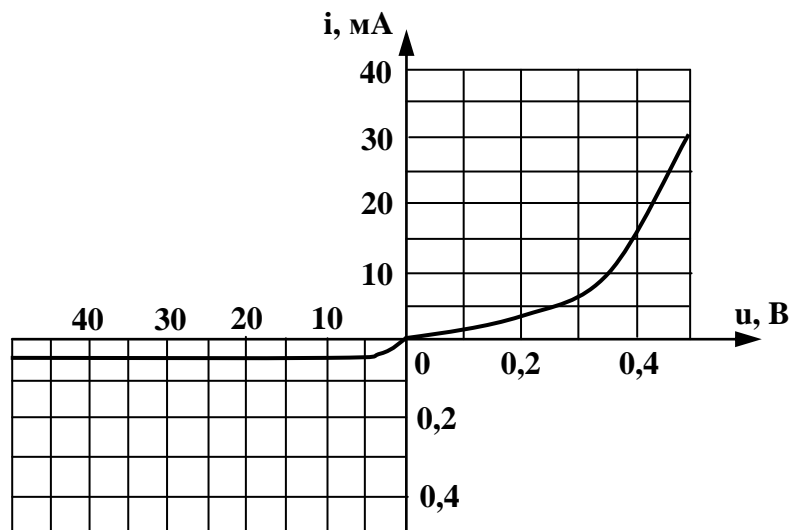


Рис. 19. Вольт - амперная характеристика полупроводникового диода



3.4. Выполнить кусочно-линейную аппроксимацию вольт-амперной характеристики полупроводникового диода, изображённой на рис.19.

3.5. Определить коэффициент передачи диодного детектора в режиме линейного детектирования.

3.6. Рассчитать входное сопротивление последовательного диодного детектора, если  $R = 20$  кОм.

#### 4. Контрольно-измерительная аппаратура

4.1. Генератор высокочастотных колебаний.

4.2. Генератор низкочастотных колебаний.

4.3. Осциллограф.

4.4. Милливольтметр переменного тока.

4.5. Лабораторная установка.

#### 5. Порядок выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа №8 выполняется на той же лабораторной установке, что и работа №6.

5.1. Снять статическую модуляционную характеристику транзисторного усилителя с модуляцией смещением при действии на входе высокочастотного колебания с частотой  $f_o = f_p$  и амплитудой  $U_{mb} = 0,4$ В.

5.1.1. Подключить генератор высокочастотных колебаний к гнездам Г1, генератор низкочастотных колебаний к гнездам Г2, вход осциллографа – к гнездам Г5, милливольтметр – к гнездам Г4.

Установить тумблеры Г1 и Г2 в положение «1», переключатели «Вольтметр» и «Осциллограф» - в положение «А».

Переключателем «Ск» выставить значение емкости контура, принятое в лабораторной работе № 6.

Установить выходное напряжение генератора низкочастотных колебаний равным нулю.

5.1.2. Изменяя частоту генератора при  $U_{bo} = 0,8$  В и  $U_{mb} = 0,4$  В, добиться совпадения частоты высокочастотных колебаний с резонансной частотой контура, фиксируя частоту по максимуму напряжения на контуре.

Снять зависимость  $U_k$  от  $U_{bo}$  при заданной амплитуде высокочастотных колебаний.

Результаты измерений занести в табл. 8.

**Таблица 8**

$U_{bo}, \text{В}$	
$U_k, \text{В}$	

По результатам табл. 8 построить статическую модуляционную характеристику, сравнить ее с расчётной характеристикой.

6.2. Снять динамическую модуляционную характеристику - зависимость коэффициента модуляции напряжения на контуре  $M$  от значения модулирующего напряжения  $U_{\Omega}$  при  $f_o = f_p$ , частоте модуляции  $F=1$  кГц и амплитуде высокочастотного колебания  $U_{mb} = 0,4$ В, выбрав рабочую точку на середине линейного участка статической модуляционной характеристики.

6.2.1. Установить необходимое смещение, частоту модуляции, амплитуду и частоту высокочастотных колебаний.

Перевести переключатель «Вольтметр» в положение «Г2».

6.2.2. Изменяя значение модулирующего напряжения, снять зависимость  $M$  от  $U_{\Omega}$ . Коэффициент модуляции измерять по осциллограмме напряжения на контуре, определив максимальный  $2U_{mkmax}$  и минимальный  $2U_{mkmin}$  размеры осциллограммы и вычислив

$$M = \frac{2U_{mkmax} - 2U_{mkmin}}{2U_{mkmax} + 2U_{mkmin}}.$$

Результаты измерений занести в табл. 9.

Таблица 9

$U_{\Omega}, \text{В}$	
$M, \%$	

По результатам табл. 9 построить динамическую модуляционную характеристику.

6.3. Заменяв контур резистором  $R=1$  кОм, зарисовать осциллограмму напряжения на коллекторе  $u_k t = i_k t R$  при  $f_o = f_p$ , частоте модуляции  $F=1$  кГц, амплитуде высокочастотных колебаний  $U_{mb} = 0,5$  В и значении модулирующего напряжения, соответствующем  $M=50$  %.

При исследовании процесса амплитудного детектирования амплитудно-модулированное напряжение с несущей частотой  $f_o$ , равной резонансной частоте контура  $f_p$  во входной цепи детектора, следует подавать на гнезда ГЗ. С помощью тумблера ТЗ к колебательному контуру подключается либо детектор (положение «1»), либо резистор с эквивалентным сопротивлением замещения детектора  $R_3$  (положение «2»). Значение сопротивления  $R_3$  изменяется переключателем « $R_3$  кОм». Резистор  $R_3$  подключается к контуру при измерении входного сопротивления детектора. Тумблеры Т4 и Т5 позволяют изменять сопротивление и ёмкость нагрузки детектора.

6.4. Снять зависимость низкочастотного напряжения на выходе детектора от напряжения несущей на входе детектора (на контуре)  $U_o$  при постоянной глубине модуляции  $M=30$  %, модулирующей частоте  $F=400$  Гц и несущей частоте  $f_o = f_p$  для случая  $R = R_1, C = C_1$ .

6.4.1. Подключить генератор высокочастотных колебаний к гнездам  $\Gamma 3$ , милливольтметр - к гнездам  $\Gamma 4$ ,  $Y$  - вход осциллографа - к гнездам  $\Gamma 5$ . Установить тумблеры  $T1$ ,  $T2$  и  $T3$  в положения «1», «2» и «1» соответственно, позволяющие исследовать диодный детектор; переключатель « $C_k$ » поставить в положение, которое было выбрано в работе № 6, тумблеры  $T4$  и  $T5$  – в положения, соответствующие нагрузке диода, переключатели «Вольтметр» и «Осциллограф» - в положение «Б», позволяющее наблюдать напряжение на выходе детектора.

6.4.2. Получить на входе детектора  $AM$  - сигнал с параметрами  $f_o = f_p$ ,  $F=400$  Гц,  $M=30$  % и  $U_o = 0,3$  В, использовать внутреннюю модуляцию генератора высокочастотных колебаний. Изменяя частоту генератора, добиться резонанса в контуре. Изменяя напряжение на входе детектора с помощью выходного аттенюатора генератора, снять зависимость  $U_{\text{вых}}$  от  $U_o$ .

Результаты измерений свести в табл. 10.

**Таблица 10**

$U_o, \text{В}$	
$U_{\text{вых}}, \text{В}$	

По результатам табл.10 построить графики зависимости  $U_{\text{вых}}$  от  $U_o$ .

6.5. Снять зависимость низкочастотного напряжения на выходе детектора от коэффициента модуляции на входе при  $U_o = 1$  В для случая  $R = R_1, C = C_1$ . Коэффициент модуляции напряжения на входе детектора устанавливать с помощью переключателя модуляции генератора высокочастотных колебаний.

Результаты измерений свести в табл. 11.

**Таблица 11**

$M, \%$	
$U_{\text{вых}}, \text{В}$	

По результатам табл. 11 построить графики зависимости  $U_{\text{вых}}$  от  $M$ .

6.6. Измерить входное сопротивление последовательного диодного детектора методом замещения для значения сопротивления нагрузки  $R = R_1$ .

На входе детектора в точке  $A$  установить немодулированное напряжение  $U_o = 0,5$  В. Подключить эквивалент входного сопротивления детектора  $R_э$ , переводя тумблер  $T3$  в положение «2», подобрать величину  $R_э$  так, чтобы напряжение в точке  $A$  было бы равно первоначальному выставленному значению.

## **7. Содержание отчёта**

- 7.1. Принципиальные схемы амплитудных модулятора и детектора.
- 7.2. Результаты расчётов, полученных при подготовке к работе.
- 7.3. Графики статических и динамических модуляционных характеристик, полученных расчётным путём и экспериментально.
- 7.4. Результаты экспериментального исследования в виде таблиц и графиков.
- 7.5. Выводы и оценки полученных результатов.

## **8. Контрольные вопросы**

- 8.1. Поясните физические процессы при амплитудных модуляции и детектировании.
- 8.2. Дайте определение статической модуляционной характеристики.
- 8.3. Чем следует руководствоваться при выборе рабочей точки модулируемого усилителя?
- 8.4. Поясните назначение всех элементов схемы диодного детектора.
- 8.5. Чем определяется значение входного сопротивления диодного детектора?
- 8.6. Дайте определение детекторной характеристики.
- 8.7. Чем следует руководствоваться при выборе параметров нагрузки диодного детектора?

## **Литература**

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 2005.

## Лабораторная работа № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ

1. **Цель работы** – изучение основных закономерностей преобразования частоты.

#### 2. Краткие теоретические сведения

На нелинейный элемент исследуемого преобразователя действуют два напряжения: от генератора  $u_{\Gamma} t = U_{m\Gamma} \cos(\omega_{\Gamma} t + \varphi_{\Gamma})$ , от источника сигнала  $u_c t = U_{mc}(t) \cos(\omega_c t + \varphi_c)$ . Предполагается, что сигнал представляет собой АМ - колебание. Если режим работы преобразователя выбран так, что вольт-амперная характеристика транзистора  $i_k u_{bэ}$  квадратичная (малая амплитуда гетеродина), то преобразователь при достаточно слабом сигнале можно рассматривать как линейное параметрическое устройство, крутизна которого изменяется пропорционально гетеродинному напряжению по закону

$$S t = S_o [1 + m_{\Gamma} \cos(\omega_{\Gamma} t + \varphi_{\Gamma})],$$

где  $S_o$  - крутизна характеристики в рабочей точке;

$m_{\Gamma} < 1$  - постоянный коэффициент, пропорциональный амплитуде гетеродина.

В этом случае ток в коллекторной цепи транзистора  $i_k t = S t u_c t = S_o [1 + m_{\Gamma} \cos(\omega_{\Gamma} t + \varphi_{\Gamma})] U_{mc} t \cos(\omega_c t + \varphi_c) = S_o U_{mc}(t) \cos(\omega_c t + \varphi_c) + \frac{m_{\Gamma} S_o}{2} U_{mc}(t) \cos[\omega_c + \omega_{\Gamma} t + \varphi_c + \varphi_{\Gamma}] + \frac{m_{\Gamma} S_o}{2} U_{mc}(t) \cos[\omega_c - \omega_{\Gamma} t + \varphi_c - \varphi_{\Gamma}]$ .

Избирательный фильтр, настроенный на промежуточную частоту  $\omega_{\Pi} = \omega_c - \omega_{\Gamma}$  или  $\omega_{\Pi} = \omega_c + \omega_{\Gamma}$ , выделит соответствующие колебания. Закон изменения амплитуды сигнала переносится на колебание с промежуточной частотой без искажений. Если зависимость  $i_k(u_{bэ})$  нельзя считать квадратичной (большая амплитуда напряжения гетеродина), а необходимо аппроксимировать полином  $i_k(u_{bэ}) = a_0 + a_1 u_{bэ} + a_2 u_{bэ}^2 + \dots + a_k u_{bэ}^k$ , то в составе коллекторного тока при достаточно сильном сигнале появляются комбинационные колебания с частотами  $\omega_k = \pm n\omega_c \pm m\omega_{\Gamma}$ , где  $n$  и  $m$  – целые положительные числа. Амплитуды комбинационных колебаний содержат степени  $u_c t$  выше первой, то есть процесс преобразования при  $\omega_{\Pi} = \omega_k$  сопровождается искажениями огибающей сигнала.

#### 3. Подготовка к работе

3.1. Привести характеристику транзистора  $i_k(u_{bэ})$ , изображённую на рис. 20. Под графиком этой характеристики изобразить зависимость крутизны от напряжения на базе, сохраняя тот же масштаб по оси абсцисс.

3.2. Определить частоты сигнала, при которых напряжение на выходе преобразователя достигает максимума, если заданы частота фильтра

промежуточной частоты  $f_{\Pi}$  и частота гетеродина  $f_{\Gamma}$ . Выполнить расчёт частот при достаточно слабом сигнале для двух случаев: амплитуда гетеродина малая

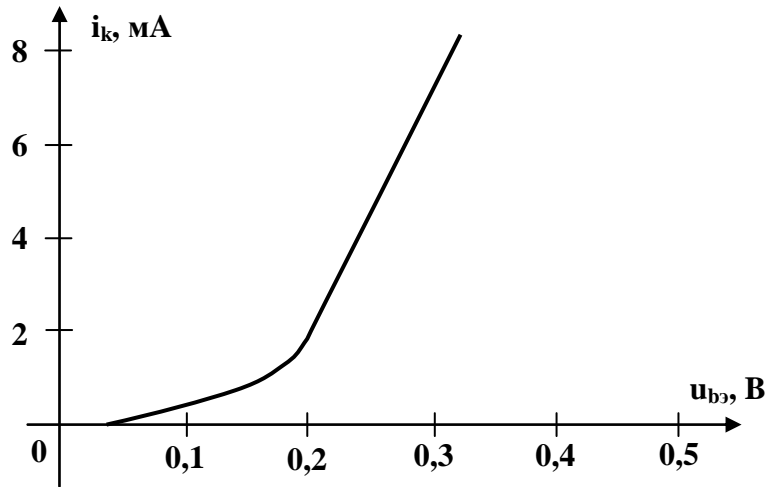


Рис. 20. График характеристики транзистора  $i_k(u_{бэ})$

и большая. Отметить найденные значения частот сигнала на шкале частот.

3.3. Изобразить зависимость  $U_{\text{вых}}(U_{bo})$  в режиме преобразования частоты, то есть при одновременной подаче на вход  $u_c t$  и  $u_{\Gamma} t$  и  $f_c = f_{\Gamma} \pm f_{\Pi}$ .

#### 4. Контрольно-измерительная аппаратура

- 4.1. Генератор высокочастотных колебаний.
- 4.2. Осциллограф.
- 4.3. Милливольтметр переменного тока.
- 4.4. Лабораторная установка.

#### 5. Описание лабораторной установки

В сменном устройстве лабораторной установки находятся нелинейный элемент-транзистор, гетеродин, генерирующий колебания с частотой  $f_{\Gamma}$ , фильтр промежуточной частоты, настроенный на частоту  $f_{\Pi}$ , фильтр нижних частот, органы коммутации и регулировки. Режим работы транзистора по постоянному току можно регулировать с помощью потенциометра «Смещение», изменяющего напряжение смещения на базе транзистора. Это напряжение измеряется вольтметром базового устройства.

Сигнал от генератора высокочастотных колебаний следует подводить к гнездам  $\Gamma 1$ . Контроль амплитуды этого сигнала осуществлять с помощью милливольтметра, подключённого к гнездам  $\Gamma 2$ . При включённом гетеродине амплитуду колебания с частотой гетеродина можно изменять скачкообразно с помощью тумблера, имеющего два положения – «Большая» и «Малая». Милливольтметр и электронный осциллограф следует подключать к гнездам  $\Gamma 3$  и  $\Gamma 4$ , которые с помощью переключателя «Выход» соединяются с выходом преобразователя, детектора и гетеродина.

## 6. Порядок выполнения лабораторной работы

6.1. Снять зависимость напряжения на выходе преобразователя от напряжения смещения  $U_{\text{ВЫХ}}(U_{bo})$  в режиме прямого прохождения при  $U_c = 10$  мВ,  $f_c = f_n$  и выключенном гетеродине.

6.1.1. Подготовить приборы и установку к исследованию. Подключить калиброванный выход генератора к гнездам Г1, милливольтметр и осциллограф к гнездам Г3 и Г4. Выставить  $U_c = 10$  мВ с помощью регулировок выхода генератора, установить переключатель «Выход» в положение «Преобраз.», выключить гетеродин, установить смещение  $U_{bo} = 0,5$  В.

6.1.2. Изменяя частоту генератора, настроиться в резонанс на частоту  $f_n$  по максимуму напряжения на выходе преобразователя. Уменьшая  $U_{bo}$ , снять зависимости  $U_{\text{ВЫХ}}(U_{bo})$ . Результаты измерений свести в табл. 12.

Таблица 12

$U_{bo}, \text{В}$	
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$	

Построить график снятой зависимости.

6.2. Выбрав рабочую точку на середине линейного участка зависимости  $U_{\text{ВЫХ}}(U_{bo})$ , установив и сохраняя постоянным смещение  $U_{bo}$ , соответствующее выбранной рабочей точке, снять зависимость напряжения на выходе преобразователя от частоты сигнала при  $U_c = 10$  мВ, заносая в табл. 13 значения напряжения на выходе преобразователя в максимумах и частоты максимумов. Выполнить измерения для двух случаев: амплитуды гетеродина малая и большая. Включить гетеродин. Синхронизацию гетеродина выключить. Переключатель «Фаза» установить в положение «0». Установить требуемую амплитуду гетеродина и смещение, выбранное ранее. При снятии зависимости  $U_{\text{ВЫХ}}(f_c)$  изменять частоту сигнала до 1 МГц.

Таблица 13

$f_c, \text{кГц}$	
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$	

По результатам табл. 13 построить график зависимости  $U_{\text{ВЫХ}}(f_c)$ .

6.3. Зарисовать осциллограммы АМ - напряжения на выходе преобразователя на частоте сигнала:

$$f_c = f_r + f_n \quad \text{или} \quad f_c = f_r - f_n,$$

$$f_c = 3f_r + f_n \quad \text{или} \quad f_c = 3f_r - f_n$$

при  $U_c = 10$  мВ,  $M=30$  %,  $F=400$  Гц, большой амплитуде гетеродина и смещении, выбранном и установленном в п.6.2 задания.

6.4. Снять зависимость  $U_{\text{ВЫХ}}(U_{bo})$  при большой амплитуде гетеродина.

Результаты измерений свести в табл. 14

Таблица 14

$U_{bo}, \text{В}$	
$U_{\text{вых}}, \text{В}$	

По результатам табл. 14 построить график зависимости  $U_{\text{вых}}(U_{bo})$ .

Рассчитать и построить зависимость коэффициента преобразования от смещения  $K_{\text{пр}}(U_{bo})$ , используя результаты табл. 14.

### 7. Содержание отчёта

7.1. Принципиальная схема преобразователя.

7.2. Результаты расчётов и построений, выполненных при подготовке к работе.

7.3. Таблицы, графики и осциллограммы, полученные при выполнении лабораторного задания.

7.4. Сравнение и анализ данных расчёта и эксперимента, краткие выводы по работе.

### 8. Контрольные вопросы

8.1. При каких условиях можно рассматривать преобразователь как линейное параметрическое устройство?

8.2. Изобразить и объяснить зависимость крутизны характеристики транзистора  $i_k(u_{bэ})$  как функции от напряжения на базе  $S(u_{bэ})$ .

8.3. Какие колебания принято называть комбинационными?

8.4. Какие комбинационные колебания на выходе преобразователя частоты возможны при малой и большой амплитудах гетеродина?

8.5. Объясните назначение фильтра промежуточной частоты в схеме преобразователя частоты.

8.6. Каково аналитическое выражение функции, аппроксимирующей вольт-амперную характеристику транзистора в интервале напряжений, где крутизна является линейной функцией напряжения?

8.7. Как изменятся результаты, полученные при выполнении п.6.4 задания, если увеличить частоту гетеродина на 50 кГц, частоту настройки ФПЧ на 50 кГц,  $f_2$  и  $f_n$  на 50 кГц?

8.8. Почему при преобразовании частоты стремятся выделить колебания с частотами  $f_r \pm f_c$  ?

8.9. Каковы причины возможного появления искажений колебаний на выходе преобразователя частоты?

### Литература

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 2005.



**СОДЕРЖАНИЕ**

Лабораторная работа № 5. Исследование переходных процессов в цепях первого порядка.....	3
Лабораторная работа № 6. Исследование нелинейного резонансного усилителя и умножителя частоты.....	9
Лабораторная работа № 7. Исследование процесса генерирования гармонических колебаний.....	15
Лабораторная работа № 8. Исследование процессов амплитудной модуляции и амплитудного детектирования сигналов.....	21
Лабораторная работа № 9. Исследование процесса преобразования частоты.....	29