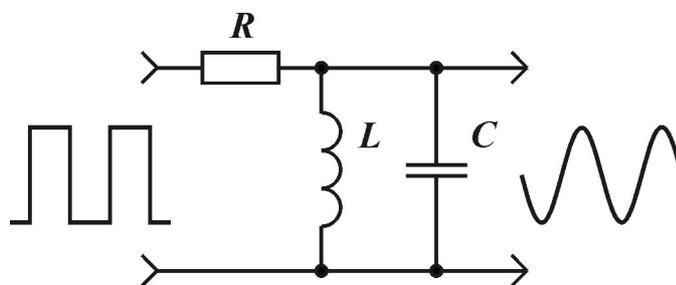


РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

Методические указания к лабораторным работам

Часть 2



Рязань 2017

УДК 621.372 (021)

Радиотехнические цепи и сигналы: методические указания к лабораторным работам, часть I / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.Ю. Линович, Б.И. Филимонов; под ред. Б.И. Филимонова. — Рязань, 2017. — 68 с.

Приведены описания и методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Радиотехнические цепи и сигналы» Описание каждой работы содержит краткие теоретические сведения, рекомендации по подготовке и выполнению домашнего и лабораторного заданий.

Предназначены для студентов дневного отделения, обучающихся по направлению «Радиотехника».

Ил. 15. Табл.4. Библиогр.: 4 назв.

Сигналы, радиотехнические цепи, спектры сигналов, воздействия сигналов на цепи, искажения сигналов

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра ГОР Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой проф. В.В. Витязев)

Радиотехнические цепи и сигналы

Часть I

Составители: Л и н о в и ч Александр Юрьевич
Ф и л и м о н о в Борис Иванович

Редактор М.Е. Цветкова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 29.08.14. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 4,0.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Лабораторная работа № 5

Исследование резонансного усилителя

Цель работы

Исследование и экспериментальное измерение основных параметров и характеристик резонансного усилителя в частотной и временной областях.,

Теоретические сведения

Резонансные усилители (РУ) являются наиболее простыми избирательными усилителями, используемыми для усиления и селекции радиосигналов в относительно узкой полосе частот ($2\Delta f_{0,707} \ll f_0$). Принципиальная схема одного каскада транзисторного РУ представлена на рис. 5.1.

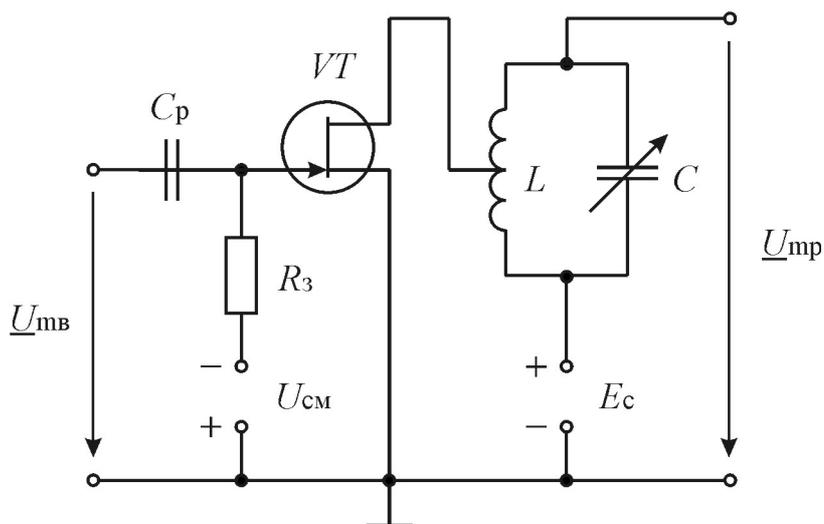


Рис. 5.1 Принципиальная схема каскада резонансного усилителя

Активный элемент — полевой транзистор, режим по постоянному току которого задается $U_{см}$, подключён частично с коэффициентом включения p_1 к контуру LC . Пренебрегая сопротивлениями разделительного C_p и блокировочного конденсатора C_e , ввиду их малости, изобразим упрощённую схему замещения РУ (рис. 5.2), где приняты следующие обозначения:

- S и R_i — крутизна и внутреннее сопротивление транзистора в рабочей точке,
- r — собственное сопротивление потерь колебательного контура.

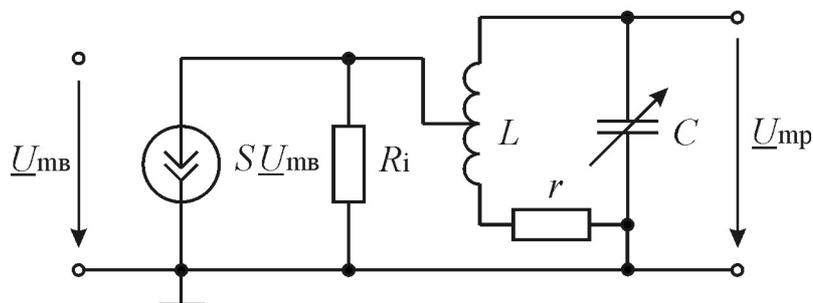


Рис. 5.2 Схема замещения каскада резонансного усилителя

Известны следующие соотношения между основными параметрами параллельного контура:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{--- резонансная частота,}$$

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{--- характеристическое (волновое) сопротивление,}$$

$$Q_k = \frac{\rho}{r} \quad \text{--- добротность.}$$

$$Z_{\text{эп}} = R_{\text{оэ}} = \rho Q_k = \frac{L}{Cr} \quad \text{--- эквивалентное резонансное сопротивление.}$$

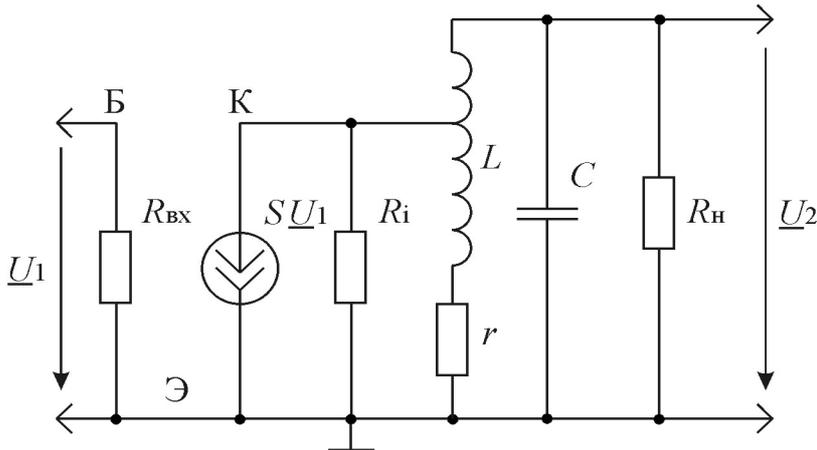


Рис. 5.2. Схема замещения резонансного усилителя

Используя формулы пересчета сопротивлений R_n и R_i в сопротивления, вносимые в контур последовательно, нетрудно показать, что для наиболее распространенного случая $Q_k \gg 1$ комплексный коэффициент передачи РУ будет равен

$$H(\omega) = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| = - \frac{pSZ_{\text{эп}}}{\sqrt{1 + \xi^2(\omega)}}, \quad (5.1)$$

где $Z_{\text{эп}}$ и ξ — эквивалентное резонансное сопротивление и обобщенная расстройка с учетом шунтирующего действия R_i , равные:

$$Z_{\text{эп}} = \rho Q_3,$$

$$\xi = 2 \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} Q_3 = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} Q_3,$$

$$Q_3 = \frac{Q_k}{(1 + p^2 \rho Q_k / R_i + p^2 \rho Q_k / R_n)}.$$

Как следует из (5.1), амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) РУ будет равна

$$H(\omega) = \frac{H(\omega_0)}{\sqrt{1 + \xi^2(\omega)}}, \quad (5.2)$$

где $H(\omega_0) = pS\rho Q_3$ — резонансный коэффициент усиления.

При временном методе исследования линейных цепей используют импульсную характеристику $g(t)$ или переходную $h(t)$, связанные друг с другом соотношением $g(t) = dh(t)/dt$. Применением обратного преобразования Фурье к (5.1) получаем

$$g(t) = \frac{2H(\omega_0)}{\tau_3} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}} \cos(\omega_0 t + \pi),$$

τ_3 — постоянная времени, определяемая через полосу пропускания усилителя $2\Delta\omega_{0,707} = \omega_0/Q_3$ соотношением:

$$\tau_3 = \frac{2}{2\Delta\omega_{0,707}} = \frac{2Q_3}{\omega_0} = \frac{Q_3}{\pi \cdot f_0} = \frac{1}{\pi \cdot 2\Delta f_{0,707}}.$$

Переходная характеристика РУ, чаще всего измеряемая в эксперименте и численно равная отклику устройства при действии на входе скачка (перепада) напряжения с единичной амплитудой, будет равна

$$h(t) = \frac{H(\omega_0)}{Q_3} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}} \sin(\omega_0 t + \pi). \quad (5.3)$$

Таким образом, переходная характеристика РУ имеет характер гармонического напряжения с экспоненциально затухающей огибающей. При осциллографических измерениях быстроту затухания экспоненты (постоянную времени) можно определить по величине подкасательной к огибающей или по времени затухания на уровне e^{-1} . Смотри рис 5.3-5.6.

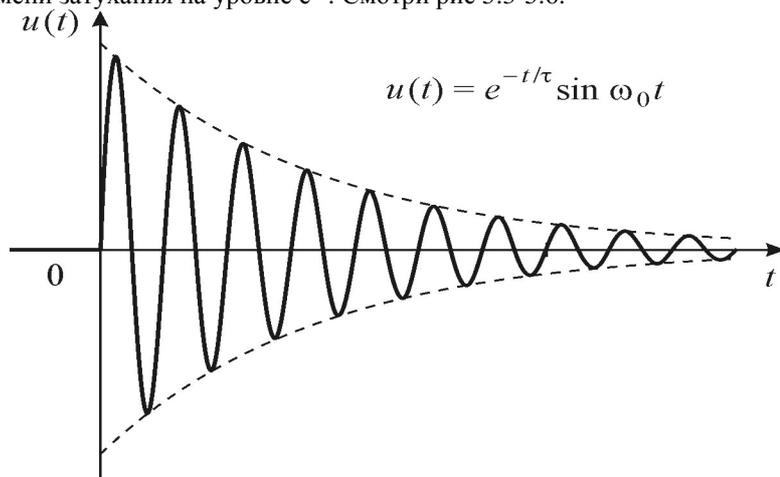


Рис. 5.3 Переходная характеристика резонансного усилителя

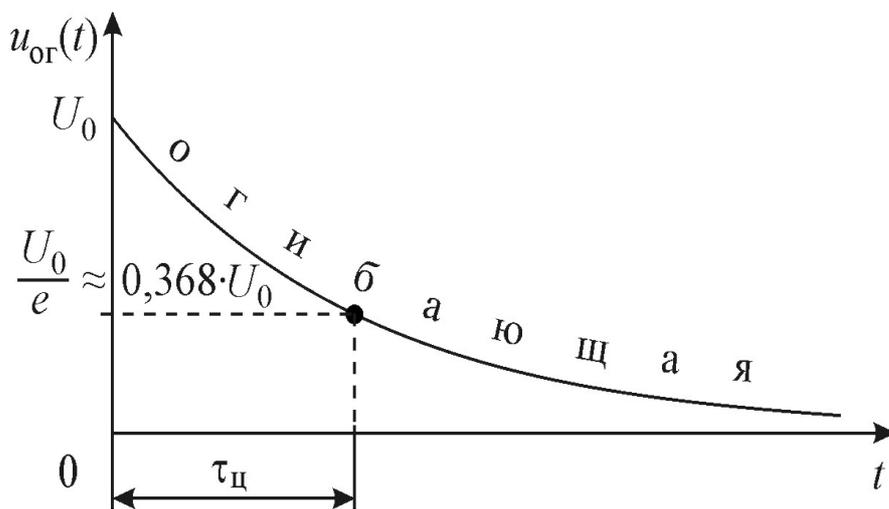


Рис. 5.4 Определение постоянной цепи по уровню $e^{-1}=0,368$

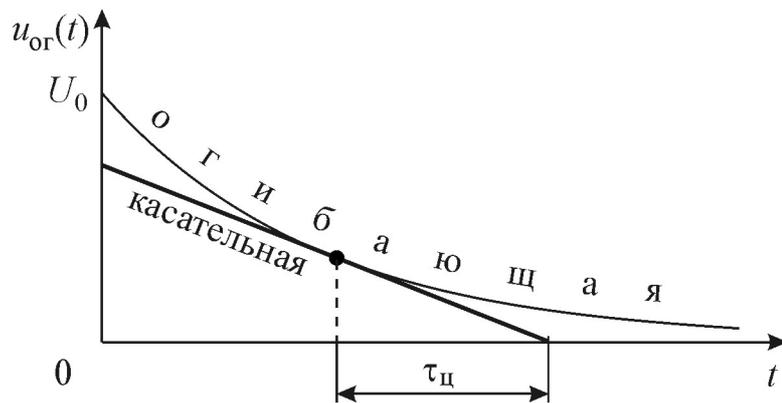


Рис.5.5 Определение постоянной цепи по величине подкасательной

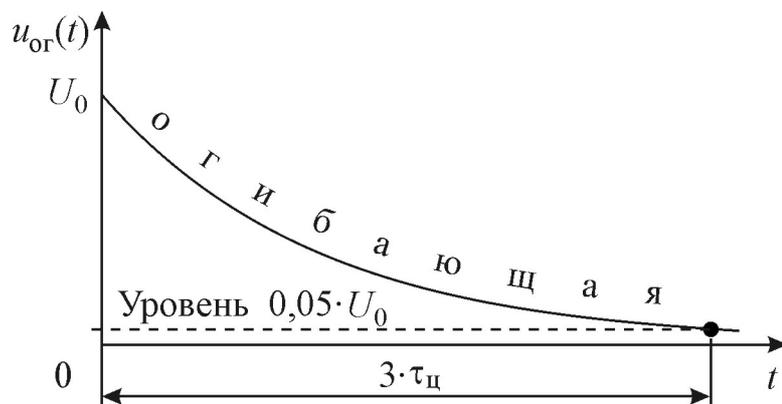


Рис.5.6 Определение постоянной цепи по времени затухания переходного процесса

Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на установке, передняя панель которой приведена на рис. 5.3. Исследуемая схема усилителя собирается с помощью перемычек (смотри лабораторное задание).

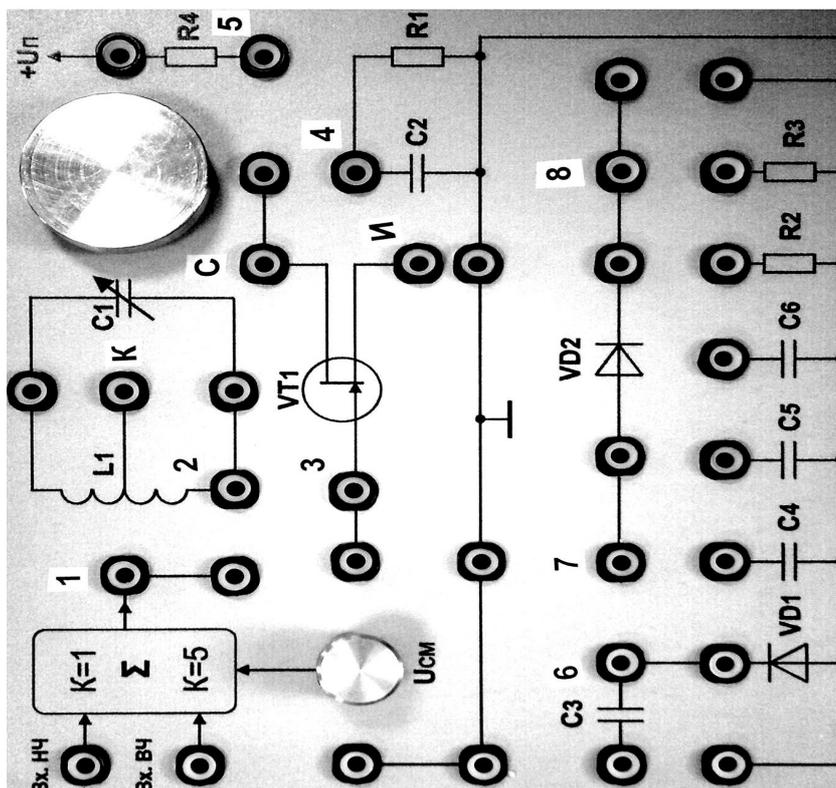


Рис. 5.3. Передняя панель сменного блока

Домашнее задание

Исходные данные для расчётов для всех бригад: $L = 3,4$ мГн, $Q_k = 200$, $p = 0,5$, $S = 1,2$ мА/В, $R_i = 16$ кОм.

Сопротивление нагрузки, равное сопротивлению шунта в лабораторной установке, взять из таблицы заданий.

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_n = R_{ш}$, кОм	4,5	5	5,3	5,6	5,8	6,7	6,9	7,2	7,5	8,4
f_0 , кГц	130	135	140	145	150	155	160	165	170	180

1. Вычислить основные параметры P_U , Q_3 , $2\Delta f_{0,707}$, $H(f_0)$, τ_3 , $\alpha_3 = 1/\tau_3$, при отключённом и включённом резисторе $R_{ш}$.
2. Рассчитать и построить АЧХ $H(f)$ усилителя при отключённом и включённом резисторе $R_{ш}$. При расчёте рекомендуется пользоваться формулой

$$H(f) = \frac{H(f_0)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta f}{\Delta f_{0,707}}\right)^2}},$$

где $\Delta f = f - f_0$. Рекомендуется брать значения Δf в соответствии с выражением $\Delta f = k \cdot \Delta f_{0,707}$, где $k = 0, \pm 0,5, \pm 1, \pm 1,5, \pm 2, \pm 2,5, \pm 3, \pm 3,5$.

3. По результатам расчётов п. 1 в соответствии с формулой (5.3) построить переходную характеристику $h(t)$ усилителя при отключённом и включённом $R_{ш}$. При графическом построении $h(t)$ усилителя рекомендуется вначале построить огибающую переходной характеристики $[H(f_0)/Q_3] \cdot e^{-t/\tau_3}$ до момента времени $t =$

2τ , и потом «вписать» в неё колебание с периодом $T_0 = 1/f_0$. Построение выполнить с указанием масштабов по осям.

Лабораторное задание

1. Получить разрешение преподавателя или лаборанта на выполнение лабораторной работы.
2. Собрать лабораторный макет для проведения эксперимента. Для этого соединить перемычкой гнездо «1» с гнездом «3», гнездо «И» с гнездом «1», гнездо «С» соединить перемычкой с отводом с гнездом «К». Подключить кабелем канал А цифрового генератора сигналов АКПП-3407 к гнезду «Вх. НЧ» («земляной» вывод кабеля соединить с корпусом), соединить кабелем синхронизирующий выход генератора сигналов с синхронизирующим входом цифрового осциллографа, подключить кабелем канал 1 цифрового осциллографа к гнезду «1» («земляной» вывод кабеля соединить с корпусом). подключить кабелем канал 2 цифрового осциллографа к гнезду «С» («земляной» вывод кабеля соединить с корпусом).
Пригласить лаборанта или преподавателя проверить правильность сборки.
3. Включить тумблером сеть макета (при этом переключатель должен находиться в положении «2»). Включить приборы. Кнопка включения питания «0 / I» генератора АКПП-3407 находится на задней его панели слева под шнуром питания; после включения питания начинает мигать кнопка включения рабочего режима, расположенная в левом нижнем углу передней панели генератора, нажатие на которую завершает операцию включения генератора. Кнопка включения питания осциллографа АКПП-4115 находится на верхней стороне корпуса слева.
4. Настроить осциллограф. Прежде всего, необходимо установить стандартные настройки осциллографа («настройки по умолчанию» или «начальные установки»), для этого достаточно нажать кнопку «НАЧ УСТ». Затем нажать кнопку «КАН 1» и выбрать в разделе «Связь входа» экранного меню «КАН1» (расположено по правому краю экрана осциллографа) режим связи канала 1 по переменному току — режим «АС» (такой режим называется также «закрытым входом»). Управление экранным меню осуществляется с помощью кнопок управления, размещённых вдоль правого края экрана осциллографа, напротив соответствующих пунктов экранного меню. Нажав кнопку «КАН2» повторить действия, которые были выполнены для канала 1. Настройки каналов вертикального отклонения символически отображаются в левом нижнем углу экрана. После переключения в режим связи по переменному току значок «СН1---1.00V» должен смениться значком «СН1~1.00V». В правой части этой строки указывается масштаб изображения по вертикали — коэффициент вертикального отклонения. Указанная в данном случае величина «1.00V» означает, что одна клетка экранной сетки соответствует 1 В входного напряжения осциллографа.
Замечание: во всех лабораторных работах входы осциллографа должны быть предварительно переведены в режим работы по переменному току (режим «АС», «закрытый вход»)!
5. Подать на вход резонансного усилителя гармоническое напряжение частотой f_0 и амплитудой 50 мВ/пик. Для этого в режиме «немодулир. сигнал» нажать клавишу «форма» справа от экрана генератора, выбрать «синус», нажать кнопку «возврат», установить частоту f_0 и амплитуду 50 мВ/пик. Активировать канал А генератора. Конденсатором С1 произвести настройку контура в резонанс по максимуму выходного напряжения.
6. **Снять и построить амплитудную характеристику усилителя.** Для этого меняя амплитуду гармонического колебания с шагом 100 мВ от 0 до значения 1,2 Впик, снять зависимость $U_{mp} = f(U_{mv})$. По построенной характеристике определить границы линейного участка и рассчитать коэффициент усиления $H(f_0)$.
7. **Снять и построить АЧХ усилителя.** Для этого установить амплитуду выходного сигнала генератора 100 мВ и изменяя частоту генератора АКПП-3407 от частоты f_0 «вниз» и «вверх» через 1 кГц до тех пор пока амплитуда выходного колебания

уменьшится в два раза снять и построить зависимость амплитуды выходного сигнала усилителя от частоты входного сигнала. По построенной АЧХ определить $2\Delta f_{0,707}$ сравнить с рассчитанной в домашнем задании. По полосе пропускания рассчитать постоянную времени цепи. **Отключить выход канала А от схемы. Для этого нажать кнопку «выход». Светодиод канала А должен погаснуть.**

8. **Снять переходную характеристику резонансного усилителя.** Для этого в режиме «немод. сигнал» подать на вход усилителя прямоугольный импульс длительностью 500 мкс и амплитудой 100 мВ и частотой повторения 1 кГц. **Чтобы получить необходимый сигнал следует нажать клавишу «форма» (справа от экрана генератора), выбрать «прямоугольник», нажать кнопку «возврат», установить частоту 1 кГц, амплитуду 100 мВпик, скважность 50% и активировать выход канала А (нажать кнопку «выход»). Ручкой «горизонт» установить масштаб 25 мкс на клетку и ручками усиление по вертикали и смещение отрегулировать, чтобы изображения сигналов были в центре экрана осциллографа. В режиме остановки развертки (для этого нажать кнопку «пуск/стоп») зарисовать или сфотографировать осциллограммы входного воздействия и переходной характеристики. По осциллограмме на основе рис. 5.3-5.6 определить постоянную времени усилителя. Рассчитать по найденной постоянной времени полосу пропускания усилителя и сравнить полученные результаты с данными полученными в п. 7.**
9. **Подключить к контуру Rш.** Для этого соединить перемычку с двумя выводами с гнездом +U_{пит.} Повторить измерения по пп.5-8.
10. Представить результаты эксперимента преподавателю и только после его разрешения выключить приборы. При выключении сначала отключить работу приборов нажатием кнопок включения-выключения питания и только после этого отключить приборы от сети питания переменного тока напряжением 220 В. Кнопка выключения питания осциллографа АКИП-4115 находится на верхней стороне корпуса слева. Выключая генератор АКИП-3407, следует сначала перевести его из рабочего режима в ждущий режим нажатием кнопки, расположенной в левом нижнем углу передней панели генератора, и только потом отключить питание генератора кнопкой «0 / I», расположенной на его задней панели слева под шнуром питания.
11. Привести в порядок рабочее место.

Содержание отчёта

1. Принципиальная схема резонансного усилителя.
2. Результаты домашних расчётов.
3. Результаты измерений, таблицы и осциллограммы, полученные при выполнении лабораторного задания. Экспериментальные точки отразить на расчетных графиках.
4. Выводы и сравнительная оценка расчетных данных и экспериментальных результатов по каждому пункту выполненного и оформленного лабораторного задания.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение амплитудной характеристики усилителя.
2. Какие параметры можно определить по амплитудной характеристики?
3. Дайте определение АЧХ усилителя.
4. Какие параметры можно определить по АЧХ усилителя?
5. Перечислите основные параметры и характеристики резонансного усилителя.
6. Как влияет подключение нагрузки на основные параметры резонансного усилителя?
7. Дайте определение переходной характеристики усилителя.
8. Какие параметры резонансного усилителя можно определить по переходной характеристики?
9. Как влияет подключение нагрузки на переходную характеристику?
10. Как связаны между собой постоянная времени и полоса пропускания резонансного усилителя?

11. Как влияет сопротивление нагрузки на полосу пропускания и постоянную времени резонансного усилителя?

Библиографический список

1. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. — С. 156 – 158.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1983. — С. 220 – 222.
3. Радиотехнические цепи и сигналы / под ред. К.А. Самойло. М.: Радио и связь, 1982. — С. 198 – 202.
4. Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Форум, 2013. –С.431.

Лабораторная работа № 6

Прохождение сигналов через резонансный усилитель

Цель работы

Экспериментальное исследование процессов и явлений при прохождении импульсов, радиоимпульсов и АМ-колебаний через резонансный усилитель.

Теоретические сведения

Резонансные усилители (РУ) являются наиболее простыми избирательными усилителями, используемыми для усиления и селекции радиосигналов в относительно узкой полосе частот ($2\Delta f_{0,707} \ll f_0$). Принципиальная схема одного каскада транзисторного РУ представлена на рис. 5.1.

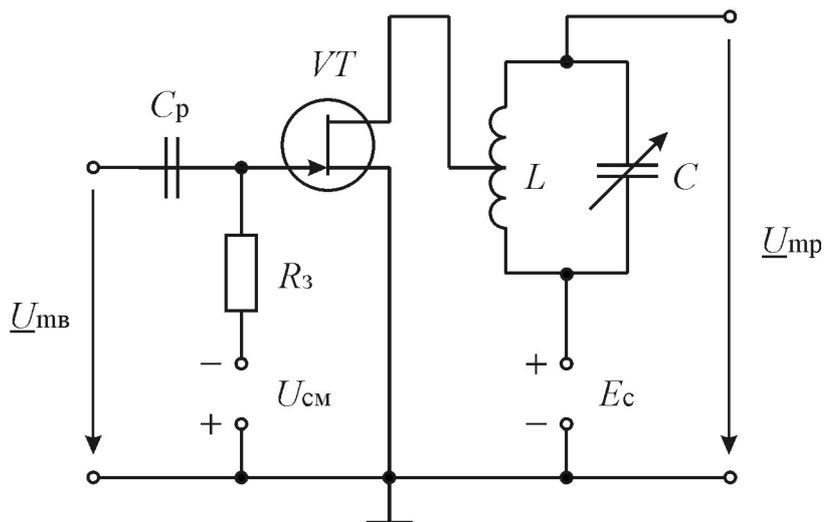


Рис. 5.1 Принципиальная схема каскада резонансного усилителя

Активный элемент — полевой транзистор, режим по постоянному току которого задается $U_{см}$, подключён частично с коэффициентом включения p_1 к контуру LC . Пренебрегая сопротивлениями разделительного C_p и блокировочного конденсатора C_3 ввиду их малости, изобразим упрощённую схему замещения РУ (рис. 5.2), где приняты следующие обозначения:

- S и R_1 — крутизна и внутреннее сопротивление транзистора в рабочей точке,
- r — собственное сопротивление потерь колебательного контура.

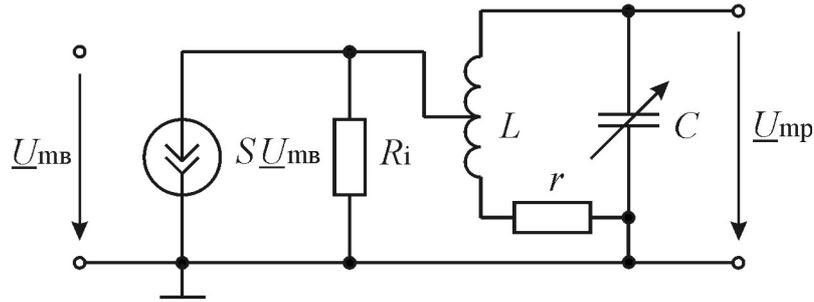


Рис. 5.2 Схема замещения каскада резонансного усилителя

Известны следующие соотношения между основными параметрами параллельного контура:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{--- резонансная частота,}$$

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{--- (характеристическое (волновое) сопротивление,}$$

$$Q_k = \frac{\rho}{r} \quad \text{--- добротность.}$$

$$Z_{\text{эп}} = R_{\text{оэ}} = \rho Q_k = \frac{L}{Cr} \quad \text{--- эквивалентное резонансное сопротивление.}$$

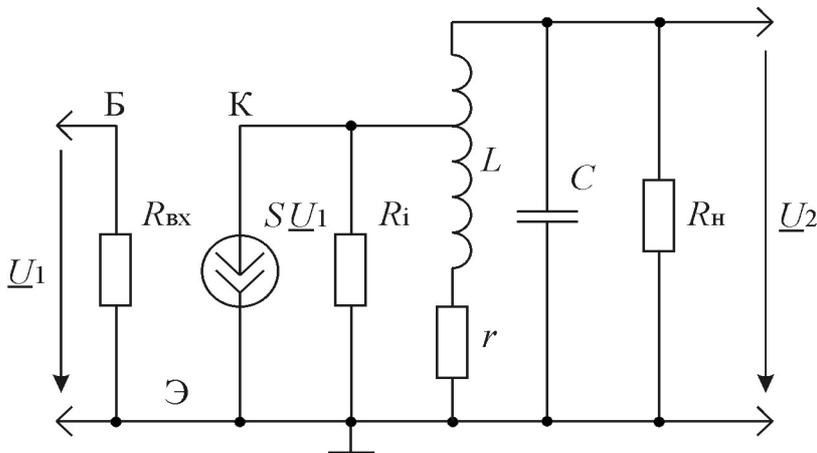


Рис. 5.2. Схема замещения резонансного усилителя

Используя формулы пересчета сопротивлений R_H и R_i в сопротивления, вносимые в контур последовательно, нетрудно показать, что для наиболее распространенного случая $Q_k \gg 1$ комплексный коэффициент передачи РУ будет равен

$$H(\omega) = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{pSZ_{\text{эп}}}{\sqrt{1 + \xi^2(\omega)}}, \quad (5.1)$$

где $Z_{\text{эп}}$ и ξ — эквивалентное резонансное сопротивление и обобщенная расстройка с учетом шунтирующего действия R_i , равные:

$$Z_{\text{эп}} = \rho Q_3,$$

$$\xi = 2 \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} Q_3 = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} Q_3,$$

$$Q_3 = \frac{Q_k}{(1 + p^2 \rho Q_k / Ri + p^2 Q_k \rho / Rn)}.$$

Как следует из (5.1), амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) РУ будет равна

$$H(\omega) = \frac{H(\omega_0)}{\sqrt{1 + \xi^2(\omega)}}, \quad (5.2)$$

где $H(\omega_0) = pS\rho Q_3$ — резонансный коэффициент усиления.

При временном методе исследования линейных цепей используют импульсную характеристику $g(t)$ или переходную $h(t)$, связанные друг с другом соотношением $g(t) = dh(t)/dt$. Применением обратного преобразования Фурье к (5.1) получаем

$$g(t) = \frac{2H(\omega_0)}{\tau_3} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}} \cos(\omega_0 t + \pi),$$

τ_3 — постоянная времени, определяемая через полосу пропускания усилителя $2\Delta\omega_{0,707} = \omega_0/Q_3$ соотношением:

$$\tau_3 = \frac{2}{2\Delta\omega_{0,707}} = \frac{2Q_3}{\omega_0} = \frac{Q_3}{\pi \cdot f_0} = \frac{1}{\pi \cdot 2\Delta f_{0,707}}.$$

Переходная характеристика РУ, чаще всего измеряемая в эксперименте и численно равная отклику устройства при действии на входе скачка (перепеда) напряжения с единичной амплитудой, будет равна

$$h(t) = \frac{H(\omega_0)}{Q_3} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}} \sin(\omega_0 t + \pi). \quad (5.3)$$

Таким образом, переходная характеристика РУ имеет характер гармонического напряжения с экспоненциально затухающей огибающей. При осциллографических измерениях быстроту затухания экспоненты (постоянную времени) можно определить по величине подкасательной к огибающей или по времени затухания на уровне e^{-1} .

При воздействии на РУ радиоимпульса с прямоугольной огибающей длительностью τ_n , амплитудой A_1 и постоянной несущей частотой ω_n :

$$u_1(t) = \begin{cases} A_1 \cos \omega_n t & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_n, \\ 0 & \text{при других } t, \end{cases}$$

напряжение на выходе:

$$u_2(t) = A_2(t) \cos[\omega_n t + \varphi(t)],$$

где огибающая выходного напряжения на интервале $[0, \tau_n]$ определяется соотношением:

$$A_2(t) = A_1 H(\omega_0) \sqrt{\frac{1 - 2e^{-\frac{t}{\tau_3}} \cos \Delta\omega_1 t + e^{-\frac{2t}{\tau_3}}}{1 + (\Delta\omega_1 \tau_3)^2}},$$

где $\Delta\omega_1 = \omega_n - \omega_0$ — абсолютная расстройка.

При совпадении частот вынужденных ω_n и свободных ω_0 колебаний процесс установления огибающей $A_2(t)$ имеет апериодический характер:

$$A_2(t) = A_1 H(\omega_0) \cdot (1 + e^{-t/\tau_3}).$$

Время нарастания колебаний на уровнях 0,1 и 0,9 от установившегося значения равно

$$t_y \approx 2,3\tau_3 = 4,6 \frac{Q_3}{\omega_0} \approx 0,73 \frac{Q_3}{f_0} = \frac{0,73}{2\Delta f_{0,707}}.$$

При расстройке ($\Delta\omega_1 \neq 0$) процесс установления огибающей принимает колебательный характер. Это объясняется биением вынужденных и свободных колебаний в контуре, частоты которых в этом случае не совпадают. Частота биений определяется абсолютной расстройкой $\omega_b = |\Delta\omega_1| = |\omega_n - \omega_0|$. После прекращения действия радиоимпульса в контуре существуют только экспоненциально убывающие свободные колебания, форма которых совпадает с (5.3).

При воздействии непрерывного АМ-радиосигнала с тональной модуляцией

$$u_1(t) = A_1(1 + M_1 \cos \Omega t) \cdot \cos \omega_n t$$

напряжение на выходе резонансного усилителя, настроенного на несущую частоту, т.е. при $\omega_0 = \omega_n$, будет иметь вид

$$u_2(t) = A_1 H(\omega_0) [1 + M_2 \cos(\Omega t - \varphi)] \cdot \cos(\omega_n t + \pi),$$

где

$\Omega = 2\pi F$ — частота модуляции,
 M_1 — коэффициент модуляции входного колебания,

$M_2 = \frac{M_1}{\sqrt{1 + (F/\Delta f_{0,707})^2}}$ — коэффициент модуляции выходного колебания.

Огибающая выходного колебания отличается от огибающей входного колебания:

- 1) глубиной модуляции ($M_2 < M_1$),
- 2) сдвигом по фазе на величину $\varphi = \arctg(F/\Delta f_{0,707})$.

Если частота несущей ω_n не совпадает с центральной частотой усилителя ω_0 , то наблюдаются нелинейные искажения огибающей выходного напряжения. Эти искажения объясняются неравномерной деформацией верхних и нижних боковых частот (полос) АМ-сигнала при неточной настройке усилителя ($\omega_0 \neq \omega_n$).

Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на установке, часть передней панели которой приведена на рис. 5.3.

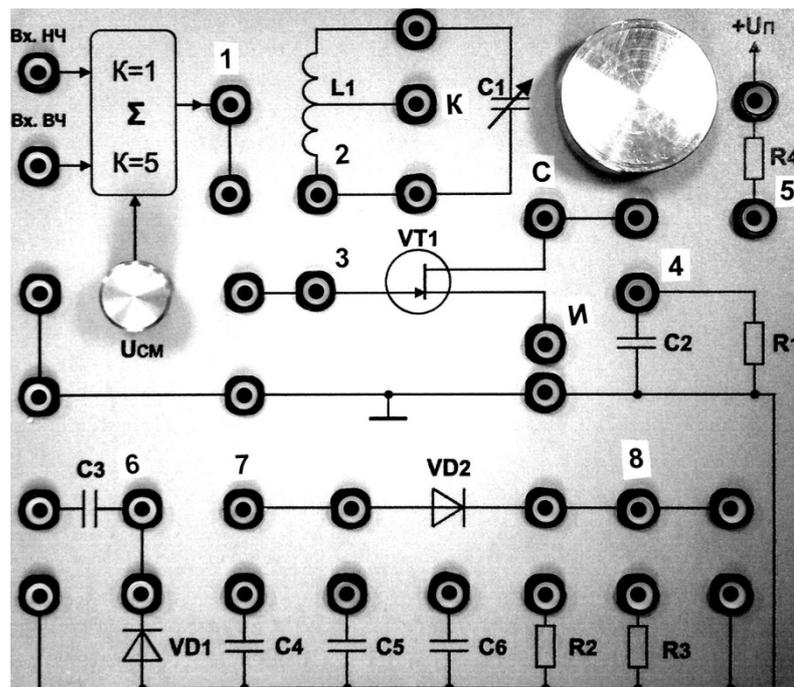


Рис. 5.3. Часть передней панели лабораторного блока

Исследуемая схема резонансного усилителя собирается на лабораторном блоке с помощью перемычек.

Домашнее задание

Исходные данные для расчётов для всех бригад: $L = 3,4$ мГн, $Q_k = 200$, $p = 0,5$, $S = 1,2$ мА/В, $R_i = 16$ кОм.

Сопротивление нагрузки, равное сопротивлению шунта в лабораторной установке, взять из таблицы заданий.

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_H = R_{ш},$ кОм	4,5	5	5,3	5,6	5,8	6,7	6,9	7,2	7,5	8,4
$f_0, \text{кГц}$	180	170	1165	160	155	150	145	140	135	130

4. Вычислить основные параметры РУ $Q_3, 2\Delta f_{0,707}, H(f_0), \tau_3, \alpha_3=1/\tau_3$, при отключённом и включённом резисторе $R_{ш}$.
5. Рассчитать и построить зависимость коэффициента модуляции выходного напряжения РУ при действии тонально модулированного АМ-сигнала с коэффициентом модуляции $M_1 = 0,6$ от величины частоты модуляции F . Пределы изменения частоты F взять от 0 до 16 кГц (не менее 5 значений). Расчёты выполнить для двух случаев: при включённом и выключенном сопротивлении $R_{ш}$. Изобразить также для указанных двух случаев осциллограммы выходного АМ-колебания РУ при частоте модуляции $F = 3$ кГц.
Указание: для облегчения построений и расчетов воспользуйтесь результатами, полученными в пп. 1..
6. По результатам расчётов п. 1 в соответствии с формулой (5.3) построить переходную характеристику $h(t)$ усилителя при отключённом и включённом $R_{ш}$. При графическом построении $h(t)$ рекомендуется вначале построить огибающую переходной характеристики $[H(f_0)/Q_3] \cdot e^{-t/\tau_3}$ до момента времени $t = 2\tau_3$ и потом «вписать» в неё колебание с периодом $T_0 = 1/f_0$. Построение выполнить с указанием масштабов по осям.
7. Рассчитать и построить с указанием масштабов по осям зависимость $A_2(t)$ огибающей выходного напряжения РУ при действии радиоимпульса с амплитудой 1 В и длительностью 1 мс при точной настройке усилителя ($f_0 = f_n$) с включённым и выключенным шунтом. Вычислить время установления огибающей t_y в обоих случаях.

Лабораторное задание

12. Получить разрешение преподавателя или лаборанта на выполнение лабораторной работы.
13. Собрать лабораторный макет для проведения эксперимента. Для этого соединить перемычкой гнездо «1» с гнездом «3», гнездо «И» с гнездом «L», гнездо «С» соединить перемычкой с отводом с гнездом «К». Подключить кабелем канал А цифрового генератора сигналов АКПП-3407 к гнезду «Вх. НЧ» («земляной» вывод кабеля соединить с корпусом), соединить кабелем синхронизирующий выход генератора сигналов с синхронизирующим входом цифрового осциллографа, подключить кабелем канал 1 цифрового осциллографа к гнезду «1» («земляной» вывод кабеля соединить с корпусом). подключить кабелем канал 2 цифрового осциллографа к гнезду «С» («земляной» вывод кабеля соединить с корпусом).
Пригласить лаборанта или преподавателя проверить правильность сборки.
14. Включить тумблером сеть макета (при этом переключатель должен находиться в положении «2»). Включить приборы. Кнопка включения питания «0 / I» генератора АКПП-3407 находится на задней его панели слева под шнуром питания; после включения питания начинает мигать кнопка включения рабочего режима, расположенная в левом нижнем углу передней панели генератора, нажатие на которую завершает операцию включения генератора. Кнопка включения питания осциллографа АКПП-4115 находится на верхней стороне корпуса слева.
15. Настроить осциллограф. Прежде всего, необходимо установить стандартные настройки осциллографа («настройки по умолчанию» или «начальные установки»), для этого достаточно нажать кнопку «НАЧ УСТ». Затем нажать кнопку «КАН 1» и выбрать в разделе «Связь входа» экранного меню «КАН1» (расположено по правому краю экрана осциллографа) режим связи канала 1 по переменному току — режим «АС» (такой режим называется также «закрытым входом»). Управление экранным меню осуществляется с помощью кнопок управления, размещённых вдоль правого края экрана осциллографа, напротив соответствующих пунктов экранного меню.

Нажав кнопку «КАН2» повторить действия, которые были выполнены для канала 1. Настройки каналов вертикального отклонения символически отображаются в левом нижнем углу экрана. После переключения в режим связи по переменному току значок «СН1---1.00V» должен смениться значком «СН1~1.00V». В правой части этой строки указывается масштаб изображения по вертикали — коэффициент вертикального отклонения. Указанная в данном случае величина «1.00V» означает, что одна клетка экранной сетки соответствует 1 В входного напряжения осциллографа.

Замечание: во всех лабораторных работах входы осциллографа должны быть предварительно переведены в режим работы по переменному току (режим «АС», «закрытый вход»)!

16. Подать на вход резонансного усилителя гармоническое напряжение частотой f_0 и амплитудой 200 мВ/пик. Для этого в режиме «немодулир. сигнал» нажать клавишу «форма» справа от экрана генератора, выбрать «синус», нажать кнопку «возврат», установить частоту f_0 и амплитуду 200 мВ/пик. Активировать канал А генератора
17. Измерить основные параметры усилителя, $2\Delta f_{0,707}$, $H(f_0)$.
Для этого меня емкость переменного конденсатора, настроить усилитель в резонанс, рассчитать коэффициент усиления $H(f_0)=U_{mp}/U_{mv}$, изменяя частоту «вверх» и «вниз» до уровня 0.707 от максимального значения напряжения на выходе, определить границы полосы пропускания и рассчитать полосу пропускания и Q .
18. Исследовать прохождение АМ-колебаний через резонансный усилитель при $f_0 = f_n$
Для этого последовательно нажать клавиши «модуляция», «тип модуляции», выбрать «АМ», нажать клавишу «дальше 1 из 2», установить $M=100\%$, частоту модуляции $F=5\text{кГц}$. Регулируя коэффициенты усиления и и смещение каналов 1 и 2 установить, чтобы изображение входного сигнала (желтый цвет) было в верхней половине экрана, а изображение выходного сигнала (синий цвет) было в нижней половине экрана осциллографа. Регулируя скорость развертки ручкой «горизонт» добиться, чтобы на экране отображалось два периода частоты модуляции. Зарисовать или сфотографировать изображения входного и выходного сигналов. Обратит внимание на сдвиг по времени огибающей выходного сигнала относительно огибающей входного сигнала.
19. Измерить зависимость коэффициента модуляции выходного колебания M_2 от частоты модуляции F . Для этого меня частоту модуляции F от 1 кГц до 10 кГц через 1 кГц снять и построить зависимость коэффициента глубины модуляции выходного сигнала от частоты модуляции F .
20. Исследовать спектры входного и выходного сигналов при воздействии тонально-модулированного колебания. Для этого установить частоту модуляции $F=5\text{ кГц}$, сместить изображения сигналов каналов 1 и 2 в верхнюю половину экрана, установить масштаб по горизонтали ручкой «горизонт» 1 мсек/клетку, нажать клавишу «математика» выбрать оператор «БПФ», «источник» канал 1, окно «прямоугольник», растяжка «*5», нажать клавишу «дальше 1 из 2» выбрать «Vmc», дисплей - «плный». Ручкой смещение по горизонтали (обратить внимание, что при вращении ручки в левой нижней части экрана появляется окно, в котором отражается частота центральной линии экрана) добиться, чтобы частота f_0 была на центральной линии. Зарисовать или сфотографировать спектр входного сигнала. Нажать клавишу канала и перейти на канал 2. Зарисовать или сфотографировать спектр выходного сигнала. Отключить математику. Для этого повторно нажать клавишу «математика». Клавиша погаснет.
21. Исследовать прохождение АМ-колебания через резонансный усилитель при $f_n \neq f_0$. Для этого нажать клавишу «дальше 2 из 2». Перейти на первую страницу и установить частоту при $f_n = f_0 + 5\text{ кГц}$. Регулируя коэффициенты усиления и и смещение каналов 1 и 2 установить, чтобы изображение входного сигнала (желтый цвет) было в верхней половине экрана, а изображение выходного сигнала (синий цвет) было в нижней половине экрана осциллографа. Регулируя скорость развертки ручкой «горизонт» добиться, чтобы на экране отображалось два периода частоты модуляции. Зарисовать или сфотографировать осциллограммы входного и выходного сигналов. Установить частоту $f_n = f_0 - 5\text{кГц}$. Зарисовать или сфотографировать осциллограммы входного и выходного сигналов.
22. Исследовать спектры входного и выходного сигналов при неточной настройке усилителя на частоту несущей. Для этого сместить изображения сигналов каналов 1 и 2 в верхнюю половину экрана, установить масштаб по горизонтали ручкой «горизонт» 1 мсек/клетку, нажать клавишу «математика». Ручкой смещение по горизонтали (обратить внимание, что при вращении ручки в левой нижней части экрана появляется окно, в котором отражается частота центральной линии экрана) добиться, чтобы частота f_0 была на центральной линии. Зарисовать или сфотографировать спектр входного сигнала. Нажать клавишу канала и перейти на канал 2. Зарисовать или сфотографировать спектр выходного сигнала. Выключить математику. Для этого нажать клавишу «математика» - клавиша погаснет. Установить частоту $f_n = f_0 + 5\text{ кГц}$. Нажать клавишу «математика». Зарисовать или сфотографировать спектр выходного сигнала. Выключить математику.

23. **Исследовать прохождение прямоугольных радиоимпульсов через резонансный усилитель при $f_0 = f_n$.**
 Для этого установить частоту модуляции (частоту повторения) $F=1$ кГц, нажать клавишу «далее 2 из 2», установить частоту несущего колебания f_0 , нажать клавишу «форма» (внизу экрана генератора), нажать клавишу «форма» (справа от экрана), выбрать «импульс». Регулируя коэффициенты усиления и смещение каналов 1 и 2 установить, чтобы изображение входного сигнала (желтый цвет) было в верхней половине экрана, а изображение выходного сигнала (синий цвет) было в нижней половине экрана осциллографа. Регулируя скорость развертки ручкой «горизонт» добиться, чтобы на экране отображалось период частоты модуляции. Зарисовать или сфотографировать осциллограммы входного и выходного сигналов. По осциллограмме выходного сигнала рассчитать $t_{фр}$, по фронту рассчитать τ , и сравнить с данными домашнего задания.
24. **Исследовать прохождение прямоугольного радиоимпульса через резонансный усилитель при $f_n \neq f_0$.**
 Для этого нажать клавишу «далее 2 из 2». Перейти на первую страницу и установить частоту при $f_n = f_0 + 5$ кГц. Регулируя коэффициенты усиления и смещение каналов 1 и 2 установить, чтобы изображение входного сигнала (желтый цвет) было в верхней половине экрана, а изображение выходного сигнала (синий цвет) было в нижней половине экрана осциллографа. Регулируя скорость развертки ручкой «горизонт» добиться, чтобы на экране отображалось два периода частоты модуляции. Зарисовать или сфотографировать осциллограммы входного и выходного сигналов. Установить частоту $f_n = f_0 - 5$ кГц. Зарисовать или сфотографировать осциллограммы входного и выходного сигналов.
25. **Исследовать спектры входного и выходного сигналов при воздействии прямоугольного радиоимпульса при $f_0 = f_n$.** Для этого сместить изображения сигналов каналов 1 и 2 в верхнюю половину экрана, установить масштаб по горизонтали ручкой «горизонт» 1 мсек/клетку, нажать клавишу «математика». Ручкой смещение по горизонтали (обратить внимание, что при вращении ручки в левой нижней части экрана появляется окно, в котором отражается частота центральной линии экрана) добиться, чтобы частота f_0 была на центральной линии. Зарисовать или сфотографировать спектр входного сигнала. Нажать клавишу канала и перейти на канал 2. Зарисовать или сфотографировать спектр выходного сигнала. Выключить математику. Для этого нажать клавишу «математика» - клавиша погаснет.
26. **Исследовать спектры входного и выходного сигналов при неточной настройке усилителя на частоту несущей.**
 Для этого установить частоту $f_n = f_0 + 5$ кГц. Зарисовать или сфотографировать осциллограммы спектров входного и выходного сигналов. Установить частоту $f_n = f_0 - 5$ кГц. Зарисовать или сфотографировать осциллограммы спектров входного и выходного сигналов.
27. **Подключить к колебательному контуру Rш.** Для этого переключкой с двумя выводами подключить к гнезду 5. Повторить измерения по пп.5- 12.
28. Представить результаты эксперимента преподавателю и только после его разрешения выключить приборы. При выключении сначала отключить работу приборов нажатием кнопок включения-выключения питания и только после этого отключить приборы от сети питания переменного тока напряжением 220 В. Кнопка выключения питания осциллографа АКПП-4115 находится на верхней стороне корпуса слева. Выключая генератор АКПП-3407, следует сначала перевести его из рабочего режима в ждущий режим нажатием кнопки, расположенной в левом нижнем углу передней панели генератора, и только потом отключить питание генератора кнопкой «0 / I», расположенной на его задней панели слева под шнуром питания.
29. Привести в порядок рабочее место.

Содержание отчёта

5. Принципиальная схема резонансного усилителя.
6. Результаты домашних расчётов.
7. Результаты измерений, таблицы и осциллограммы, полученные при выполнении лабораторного задания. Экспериментальные точки отразить на расчетных графиках.
8. Выводы и сравнительная оценка расчетных данных и экспериментальных результатов по каждому пункту выполненного и оформленного лабораторного задания.

Контрольные вопросы

12. Почему возникают искажения радиоимпульса на выходе резонансного усилителя?
13. Как зависит время установления переднего фронта радиоимпульса от добротности контура?
14. Почему возникают биения на огибающей радиоимпульса при неточной настройке контура в резонанс с несущей частотой?
15. Как изменяется спектр радиоимпульса с прямоугольной огибающей при прохождении через резонансный усилитель? При каких условиях радиоимпульс проходит через резонансный усилитель с малыми искажениями?

16. Как влияет $R_{ш}$ на искажения радиоимпульса при прохождении через резонансный усилитель?
17. Почему происходит уменьшение глубины модуляции АМ-колебания при прохождении через резонансный усилитель? Возможно ли увеличение глубины модуляции при прохождении АМ-колебания через избирательную цепь?
18. Какие искажения наблюдаются при прохождении АМ-колебаний и как они оцениваются?
19. Как зависит глубина модуляции на выходе резонансного усилителя от частоты модуляции и добротности?
20. Как изменяются спектральные и векторные диаграммы АМ-колебаний при тональной модуляции при прохождении через резонансный усилитель?
21. Какие искажения наблюдаются при прохождении АМ-колебаний через резонансный усилитель при несовпадении несущей и резонансной частот?

Библиографический список

1. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. — С. 156 – 158, 188 – 195.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1983. — С. 267 – 271, 283 – 290.
3. Радиотехнические цепи и сигналы / под ред. К.А. Самойло. М.: Радио и связь, 1982. — С. 198 – 202.
4. Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Форум, 2013. –С.431.

Лабораторная работа № 7

Преобразование гармонических сигналов в нелинейном усилителе

Цель работы

Исследование нелинейного транзисторного каскада с резистивной и избирательной нагрузками, режимов нелинейного резонансного усиления, умножения частоты.

Теоретические сведения

Основные виды радиотехнических преобразований сигналов осуществляются в нелинейных цепях и устройствах. Типичным нелинейным элементом является полевой транзистор, работающий в диапазоне сравнительно низких частот.

На рис. 7.1 приведена проходная вольтамперная характеристика транзистора, аппроксимированная двумя отрезками прямых, что весьма удобно при больших амплитудах воздействующего сигнала.

Таким образом:

$$i_c(t) = \begin{cases} S(u_3(t) - U_n) & \text{при } u_3 \geq U_n, \\ 0 & \text{при } u_3 < U_n. \end{cases} \quad (7.1)$$

На этом же рисунке показана форма тока стока транзистора при напряжении на затворе:

$$u_3(t) = U_0 + U_{3m} \cos \omega_n t. \quad (7.2)$$

Нелинейный режим работы транзистора приводит к отсечке тока стока, угол отсечки θ может быть найден из соотношения:

$$\cos \theta = \frac{U_n - U_0}{U_{3m}}. \quad (7.3)$$

Постоянная составляющая и амплитуды гармоник тока вычисляются по формулам:

$$I_{c0}(\theta) = S U_{3m} \gamma_0(\theta) \text{ и } I_{c,n}(\theta) = S U_{3m} \gamma_n(\theta). \quad (7.4)$$

Значения функции угла отсечки (функции Берга) по первой гармонике $\gamma_1(\theta)$ могут быть найдены из табл. 7.1.

Таблица 7.1

$\theta, ^\circ$	$\gamma_1(\theta)$						
0	0,000	50	0,121	100	0,610	150	0,971
10	0,001	60	0,196	110	0,713	160	0,991
20	0,009	70	0,287	120	0,804	170	0,999
30	0,029	80	0,390	130	0,879	180	1,000

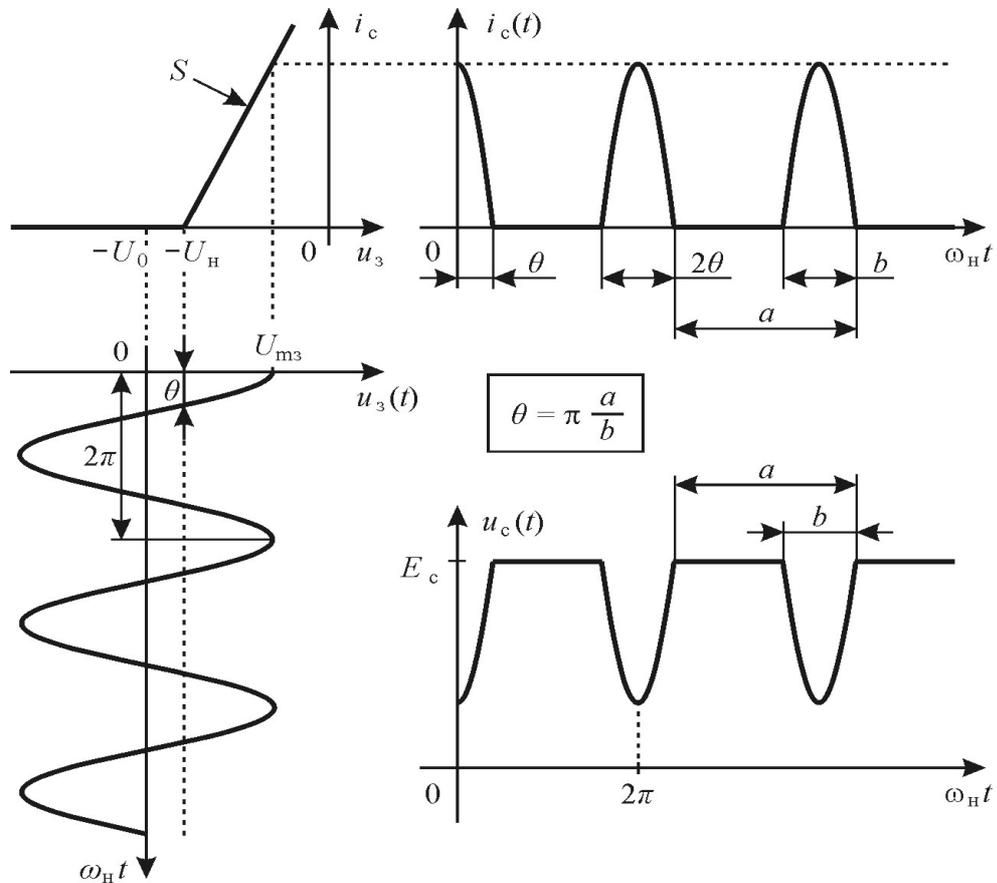


Рис. 7.1 Графики, поясняющие работу транзистора в нелинейном режиме с резистивной нагрузкой.

При анализе нелинейных цепей методом угла отсечки удобно пользоваться параметром, называемым средней крутизной по n -й гармонике:

$$S_{cp,n}(\theta) = \frac{I_{c,n}(\theta)}{U_{зм}} = S\gamma_n(\theta). \quad (7.5)$$

Максимум $S_{cp,n}(\theta)$ достигается при угле отсечки, равном $\theta_{opt} = 180^\circ/n$. Для первых трёх гармоник максимальные значения средней крутизны принимают следующие значения: $\gamma_1(180^\circ) = 1$, $\gamma_2(90^\circ) = 0,21$, $\gamma_3(60^\circ) = 0,07$.

Зависимость амплитуды первой гармоники тока стока от амплитуды напряжения на базе $U_{зм}$ при постоянном напряжении смещения U_0 называется колебательной характеристикой транзистора:

$$I_{c1}(U_{зм}) \Big|_{U_0 = const} = SU_{зм}\gamma_1(\theta) = U_{зм}S_{cp}(\theta), \quad (7.6)$$

где $S_{cp}(\theta) \equiv S_{cp,1}(\theta)$ — средняя крутизна по первой гармонике.

Принципиальная схема нелинейного резонансного усилителя приведена на рис. 7.2. Амплитуда выходного напряжения на резонансной частоте f_0 :

$$U_{mp} = I_{c1}pZ_{эп} = S_{cp}U_{зм}pZ_{эп}, \quad (7.8)$$

где

$$p = \frac{L_2}{L_k} \quad \text{— коэффициент включения контура,}$$

$$Z_{\text{эр}} = Q \sqrt{\frac{L_{\text{к}}}{C_{\text{к}}}} \quad \text{— эквивалентное резонансное сопротивление контура при полном включении,}$$

$$Q \quad \text{— добротность контура,}$$

$$L_{\text{к}} = L_1 + L_2 \quad \text{— индуктивность контура,}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{\text{к}} C_{\text{к}}}} \quad \text{— резонансная частота настройки контура.}$$

При этом не учитывается реакция стоковой нагрузки ($R_c \gg \gg p^2 Z_{\text{эр}}$). Тогда колебательная характеристика транзистора $I_{c1} = I_{c1}(U_{\text{зм}})$ и колебательная характеристика усилителя $U_{\text{мп}} = U_{\text{мп}}(U_{\text{зм}})$ совпадают с точностью до постоянного множителя.

Коэффициент усиления нелинейного резонансного усилителя на резонансной частоте

$$H_0 = H(f_0) = \frac{U_{\text{мп}}}{U_{\text{зм}}} = S_{\text{ср}} p Z_{\text{эр}}. \quad (7.9)$$

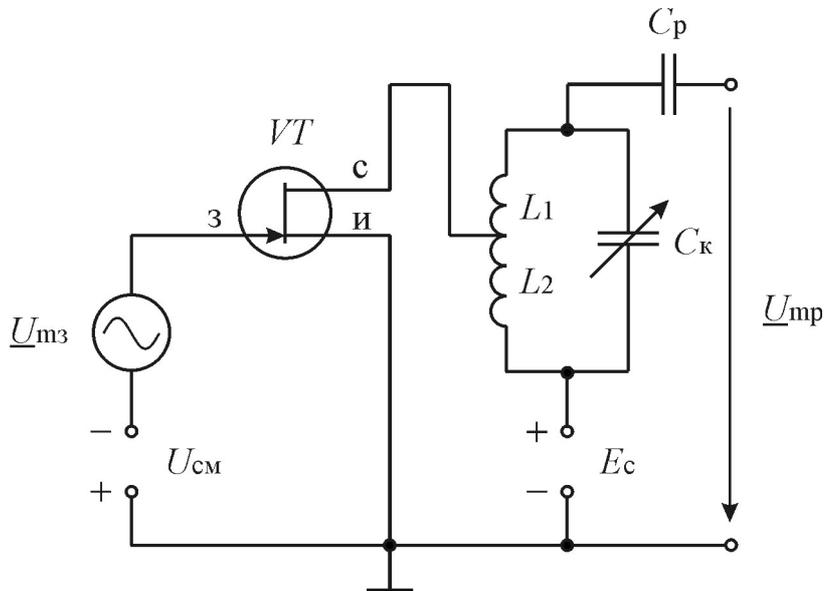


Рис. 7.2. Принципиальная схема нелинейного усилителя

Коэффициент усиления усилителя, работающего в режиме умножения частоты:

$$H_{0,n} = S_{\text{ср},n} p Z_{\text{эр}}, \quad (7.10)$$

где $n = 2, 3, 4, \dots$ — коэффициент умножения частоты. При этом частота входного колебания равна f_0 / n .

Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на установке, часть передней панели которой приведена на рис. 7.3.

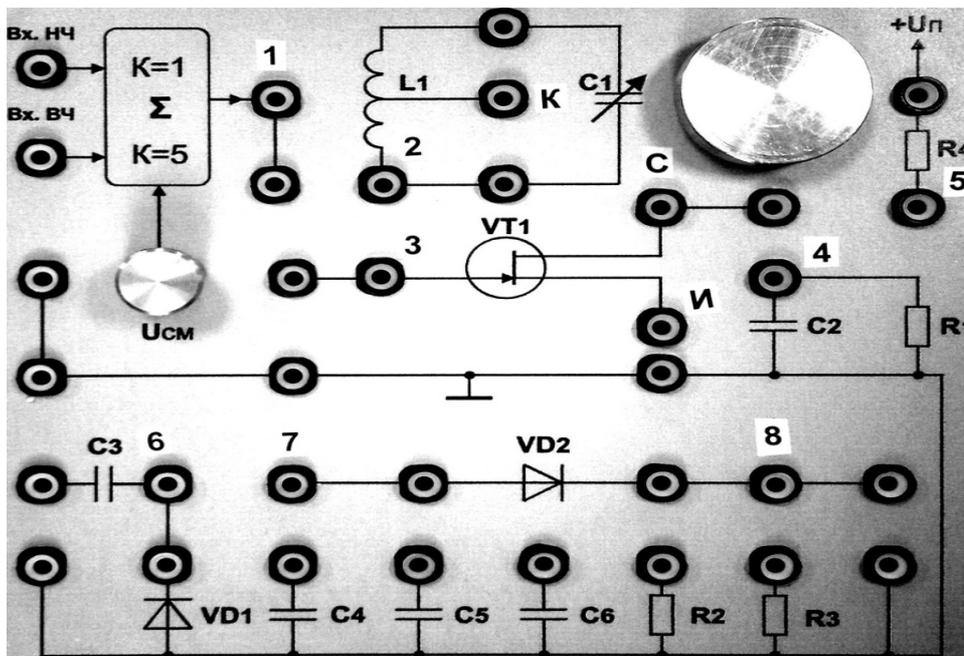


Рис. 7.3. Часть передней панели лабораторного макета

Исследуемые схемы - резистивный усилитель для изучения формы тока транзистора и резонансный усилитель собираются путем соединения перемычками соответствующих гнезд. При анализе нелинейного усилителя гармоническое напряжение от генератора АК ИП-3407 подводится к гнездам «Вх. НЧ».

Постоянное напряжение смещения на затвор транзистора нелинейного усилителя можно изменять потенциометром « $U_{см}$ ». Постоянное напряжение измеряется цифровым осциллографом АК ИП-4115 при открытом входе (DC), измеряя с помощью масштаба смещение по вертикали нулевой линии.

Домашнее задание

Исходные данные для расчётов для всех бригад: $L = 3,4$ мГн, $Q_k = 200$, $p = 0,5$, $S = 1,2$ мА/В, $R_i = 16$ кОм. $U_n = -1,2$ В

Резонансную частоту взять из таблицы заданий.

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_0 , кГц	130	135	140	145	150	155	160	165	170	180

1. Изобразить форму $i_c(t)$ для углов отсечки $\theta = 0, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ$.
2. Рассчитать и построить на одном графике колебательные характеристики усилителя $U_{см}(U_{зм})$ для двух значений $U_0 = -1, -1.2$ В. Значения $U_{зм}$ брать в интервале от 0 до 1,5 В через 0,3 В. При расчётах необходимо учитывать, что если $|(U_n - U_0) / U_{зм}| \geq 1$, то транзистор либо закрыт, либо работает в линейном режиме.
3. По построенным колебательным характеристикам определить коэффициенты усиления резонансного усилителя H_0 для амплитуды $U_{зм} = 500$ мВ.

Лабораторное задание

1. Собрать схему для изучения формы и спектра тока транзистора при разных значениях напряжения $U_{см}$. Для этого перемычками соединить гнезда «1» и «3», гнезда «И» и корпус, гнезда «С» и «5». Подключить канал А генератора сигналов АК ИП-3407 к гнездам «Вх. НЧ» и корпус, вход канала 1 осциллографа АК ИП-4115 к гнездам «3» и корпус, а вход канала 2 к гнездам «С» и корпус. Получить разрешение преподавателя или лаборанта на выполнение лабораторной работы.
2. Включить приборы. Кнопка включения питания «0 / I» генератора АК ИП-3407 находится на задней его панели слева под шнуром питания; после включения питания начинает мигать кнопка включения рабочего режима, расположенная в левом нижнем углу передней панели генератора, нажатие на которую завершает операцию включения генератора. Кнопка включения питания осциллографа АК ИП-4115 находится на верхней стороне корпуса слева. Включить питание лабораторного макета (тумблер вверху справа).
3. Настроить осциллограф. Прежде всего, необходимо установить стандартные настройки осциллографа («настройки по умолчанию» или «начальные установки»), для этого достаточно нажать кнопку

«НАЧ УСТ». Затем нажать кнопку «КАН 1» и выбрать в разделе «Связь входа» экранного меню «КАН1» (расположено по правому краю экрана осциллографа) режим связи канала 1 по постоянному току — режим «ДС» (такой режим называется также «открытым входом»). Управление экранным меню осуществляется с помощью кнопок управления, размещённых вдоль правого края экрана осциллографа, напротив соответствующих пунктов экранного меню. Настройки каналов вертикального отклонения символически отображаются в левом нижнем углу экрана. После переключения в режим связи по постоянному току на экране должен появиться значок «CH1---1.00V». В правой части этой строки указывается масштаб изображения по вертикали — коэффициент вертикального отклонения. Указанная в данном случае величина «1.00V» означает, что одна клетка экранной сетки соответствует 1 В входного напряжения осциллографа. Аналогично настроить осциллограф по КАН2, с тем отличием, что режим связи установить - «АС».

4. Установить на генераторе АКПП-3407 гармоническое напряжение с частотой f_0 и амплитудой 500 мВпик. Для этого с помощью клавиш меню (внизу экрана) установить f_0 , кГц и амплитуду 500 мВпик.
5. Установить напряжение смещения $U_0 = -0,8$ В. Для этого по каналу КАН1 выбрать в разделе «Связь входа» экранного меню «земля», ручкой смещение по вертикали совместить нулевую линию с одной из горизонтальных линий экрана, заметить выбранную линию. Перейти, нажимая клавишу «Связь входа», в режим «ДС», и ручкой $U_{см}$ (лаб. макет) с помощью масштаба по КАН1 установить нулевую линию в положение соответствующее напряжению смещения $U_0 = -0,8$ В. Подать с генератора АКПП-3407 установленное гармоническое колебание, нажав клавишу «Выход» канала А (клавиша «выход» должна загореться).
6. Получить и зарисовать (сфотографировать) осциллограммы напряжений на входе транзистора $u_3(t)$ и напряжения на стоке транзистора $u_c(t)$ при резистивной нагрузке. Для этого регулируя ручками смещение по вертикали каналов 1 и 2 и ручкой «горизонт» установить, чтобы изображение по каналу 1 было в верхней, а изображение по каналу 2 в нижней части экрана и на экране отображалось два, три периода колебаний. Измерить угол отсечки в соответствии с рис. 7.1 при заданном значении U_0 . Зарисовать или сфотографировать полученные осциллограммы.
7. Пронаблюдать спектры и измерить частоту спектральных компонент напряжений $u_3(t)$ и $u_c(t)$. Для этого ручкой «горизонт» установить масштаб по горизонтали 500 мкс/клетку, нажать клавишу «математика», выбрать оператор «БПФ», окно «прямоугольник», перейти на стр. 2, выбрать шкалу-Vrms, дисплей – «полный» и по очереди переключаясь на канал 1 и канал 2, подводя спектральные пики ручкой смещение по горизонтали под курсор (расположен сверху в центре экрана), измерить частоту спектральных пиков. Зарисовать или сфотографировать спектры колебаний $u_3(t)$ и $u_c(t)$. Для получения изображений колебания и его спектра следует изображение по другому каналу погасить, нажав соответствующую кнопку «вход» (кнопка должна погаснуть).
8. Нажать клавишу «выход» канала А (клавиша «выход» должна погаснуть). Повторить п.п. 5-7 для напряжений $U_0 = -1$ В; $U_0 = -1,2$ В; $U_0 = -1,4$ В. Спектры наблюдать при растяжке БПФ «1x»
9. **Предъявить полученные результаты преподавателю и после их утверждения выключить питание лабораторного макета (тумблер вверх макета справа). Красный светодиод должен погаснуть.**
10. Собрать схему для изучения процессов нелинейного усиления и умножения частоты. Для этого переключку отключить от гнезда «5» и подключить к гнезду «К» и вход осциллографа КАН2 подключить к гнезду «2». **Пригласить для проверки преподавателя или лаборанта и получить разрешение на продолжение выполнения лабораторной работы.** Включить тумблером питание макета (красный светодиод должен загореться).
11. Исследовать процесс нелинейного резонансного усиления. Для этого изменением емкости переменного конденсатора настроить усилитель в резонанс. Ручкой «горизонт» получить на экране осциллографа два, три периода колебаний.
12. Снять и построить колебательную характеристику при $U_0 = -1,2$ В, изменяя амплитуду напряжения с генератора АКПП-3407 от 0 до 1,5 В через 250 мВ. Рассчитать коэффициент усиления при амплитуде входного сигнала 500 мВ.
13. Исследовать спектры колебаний $u_3(t)$ и $u_c(t)$. Для этого ручкой «горизонт» установить масштаб по горизонтали 500 мкс/клетку, нажать клавишу «математика» и по очереди переключаясь на канал 1 и канал 2, подводя спектральные пики ручкой смещение по горизонтали под курсор (расположен сверху в центре экрана), измерить частоту спектральных пиков. Зарисовать или сфотографировать спектры колебаний $u_3(t)$ и $u_c(t)$. Для получения изображений колебания и его спектра следует изображение по другому каналу погасить, нажав соответствующую кнопку «вход» (кнопка должна погаснуть).
14. Повторить п.п. 12, 13 для $U_0 = -1,4$ В.
15. Исследовать режим удвоения частоты. Для этого установить на выходе генератора АКПП-3407 частоту $f_0/2$, амплитуду 500 мВпик и меняя частоту выходного сигнала генератора на десятые доли кГц, настроить усилитель в резонанс. Ручкой «горизонт» установить масштаб, чтобы на экране осциллографа отображалось два, три периода колебаний, установить соответствующими ручками удобные масштабы изображений по вертикали. Зарисовать или сфотографировать осциллограммы $u_3(t)$ и $u_c(t)$.

16. Исследовать спектры колебаний $u_3(t)$ и $u_c(t)$. Для этого ручкой «горизонт» установить масштаб по горизонтали 500 мкс/клетку, нажать клавишу «математика» и по очереди переключаясь на канал 1 и канал 2, подводя спектральные пики ручкой смещение по горизонтали под курсор (расположен вверху в центре экрана), измерить частоту спектральных пиков. Зарисовать или сфотографировать спектры колебаний $u_3(t)$ и $u_c(t)$. Для получения изображений колебания и его спектра следует изображение по другому каналу погасить, нажав соответствующую кнопку «вход» (кнопка должна погаснуть).
17. Исследовать режим утроения частоты. Для этого установить на выходе генератора АКПП-3407 частоту $f_0/3$, амплитуду 500 мВпик и меняя частоту выходного сигнала генератора на десятые доли кГц, настроить усилитель в резонанс. Ручкой «горизонт» установить масштаб, чтобы на экране осциллографа отображалось два, три периода колебаний, установить соответствующими ручками удобные масштабы изображений по вертикали. Зарисовать или сфотографировать осциллограммы $u_3(t)$ и $u_c(t)$.
18. Повторить п.16.
19. Предъявить полученные результаты преподавателю и после их утверждения и привести в порядок рабочее место.

Содержание отчета

1. Принципиальная схема нелинейного резонансного усилителя.
2. Результаты выполнения домашнего задания.
3. Осциллограммы, спектры и графики, полученные при выполнении лабораторного задания.
4. Краткие выводы, сравнение теоретических и экспериментальных результатов, анализ причин возможных расхождений.

Контрольные вопросы

1. Как зависит угол отсечки коллекторного тока от напряжения смещения и амплитуды входного напряжения?
2. Изобразить временные диаграммы коллекторного тока и напряжения на контуре нелинейного резонансного усилителя. Чем объясняются имеющиеся отличия?
3. Как определить амплитуды первой, второй и третьей гармоник тока стока транзистора, если известны амплитуда напряжения на входе и крутизна аппроксимирующей прямой при кусочно-линейной аппроксимации?
4. От чего зависит КПД нелинейного резонансного усилителя?
5. Для чего в усилителе используется нелинейный режим работы транзистора?
6. Как определяется коэффициент усиления нелинейного резонансного усилителя?
7. Как изменяется колебательная характеристика при изменении: а) U_0 , б) $Z_{эп}$?
8. Чем отличаются временные диаграммы тока стока и напряжений на затворе и стоке в схемах удвоителя и утроителя частоты?
9. Объясните причину искажений при удвоении частоты и при утроении частоты.
10. Как изменяются искажения выходного сигнала усилителя при переходах из режима усиления к режимам умножения частоты?
11. Что дает применение колебательного контура в усилителе, который работает в нелинейном режиме?

Библиографический список

1. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986. — С. 74 – 81, 231 – 235.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1988. — С. 270-278.
3. Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Форум, 2013. –С.431.

Лабораторная работа № 8

Изучение процессов получения и детектирования амплитудно-модулированных колебаний в нелинейном усилителе

Цель работы

Исследование процессов получения и детектирования сигналов с амплитудной модуляцией.

Теоретические сведения

Основные виды радиотехнических преобразований сигналов осуществляются в нелинейных цепях и устройствах. Типичным нелинейным элементом является полевой транзистор.

На рис. 8.1 приведена проходная вольтамперная характеристика транзистора, аппроксимированная двумя отрезками прямых, что весьма удобно при больших амплитудах воздействующего сигнала.

Таким образом:

$$i_c(t) = \begin{cases} S(u_3(t) - U_n) & \text{при } u_3 \geq U_n, \\ 0 & \text{при } u_3 < U_n. \end{cases} \quad (8.1)$$

На этом же рисунке показана форма тока стока транзистора при напряжении на затворе:

$$u_3(t) = U_0 + U_{3m} \cos \omega_n t. \quad (8.2)$$

Нелинейный режим работы транзистора приводит к отсечке тока стока, угол отсечки θ может быть найден из соотношения:

$$\cos \theta = \frac{U_n - U_0}{U_{3m}}. \quad (8.3)$$

Постоянная составляющая и амплитуды гармоник тока вычисляются по формулам:

$$I_{c0}(\theta) = S U_{3m} \gamma_0(\theta) \text{ и } I_{c,n}(\theta) = S U_{3m} \gamma_n(\theta). \quad (8.4)$$

Значения функции угла отсечки (функции Берга) по первой гармонике $\gamma_1(\theta)$ могут быть найдены из табл. 8.1.

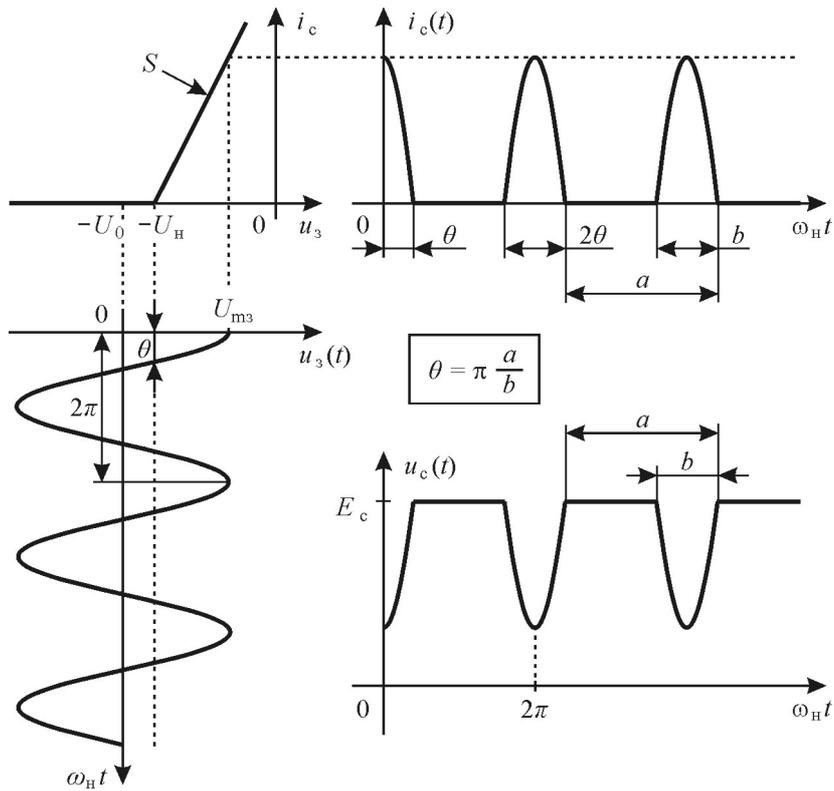


Рис. 8.1. Графики, поясняющие работу транзистора в нелинейном режиме с резистивной нагрузкой

Таблица 8.1

$\theta, ^\circ$	$\gamma_1(\theta)$						
0	0,000	50	0,121	100	0,610	150	0,971
10	0,001	60	0,196	110	0,713	160	0,991
20	0,009	70	0,287	120	0,804	170	0,999
30	0,029	80	0,390	130	0,879	180	1,000
40	0,065	90	0,500	140	0,935		

При анализе нелинейных цепей методом угла отсечки удобно пользоваться параметром, называемым средней крутизной по n -й гармонике:

$$S_{\text{ср},n}(\theta) = \frac{I_{\text{с},n}(\theta)}{U_{\text{зм}}} = S\gamma_n(\theta). \quad (8.5)$$

Для первых трёх гармоник максимальные значения средней крутизны принимают следующие значения: $\gamma_1(180^\circ) = 1$, $\gamma_2(90^\circ) = 0,21$, $\gamma_3(60^\circ) = 0,07$.

Зависимость амплитуды $I_{\text{с}1}$ от напряжения смещения на затворе U_0 при постоянной амплитуде возбуждения $U_{\text{зм}}$ называется статической модуляционной характеристикой:

$$I_{\text{с}1}(U_0) \Big|_{U_{\text{зм}} = \text{const}} = SU_{\text{зм}}\gamma_1(\theta). \quad (8.6)$$

Принципиальная схема амплитудного модулятора на основе нелинейного резонансного усилителя приведена на рис. 8.2.

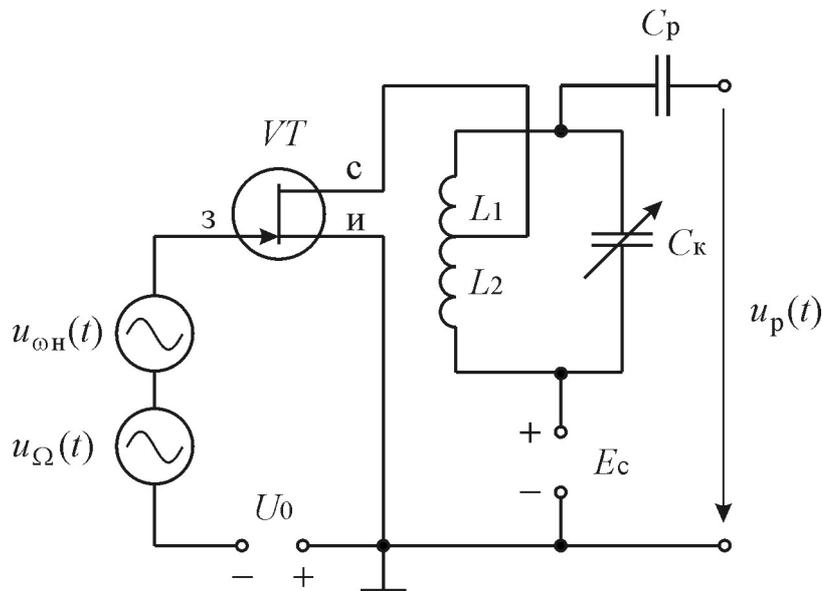


Рис. 8.2 Принципиальная схема амплитудного модулятора

Для получения АМ-колебания при модуляции смещением на вход нелинейного резонансного усилителя (рис. 8.2) подаётся: а) постоянное напряжение смещения U_0 , определяющее рабочую точку, б) низкочастотный модулирующий сигнал $u_{\Omega}(t)$ с амплитудой $U_{\Omega m}$, управляющий изменением средней крутизны нелинейного элемента — транзистора, в) высокочастотное колебание $u_{\omega}(t)$ с амплитудой $U_{\omega m}$ и частотой $\omega_H = \omega_0$, для которого транзистор может рассматриваться как элемент с переменным параметром S_{cp} , управляемым модулирующим напряжением. Режим работы транзистора при получении гармонической модуляции смещением показан на рис. 8.4.

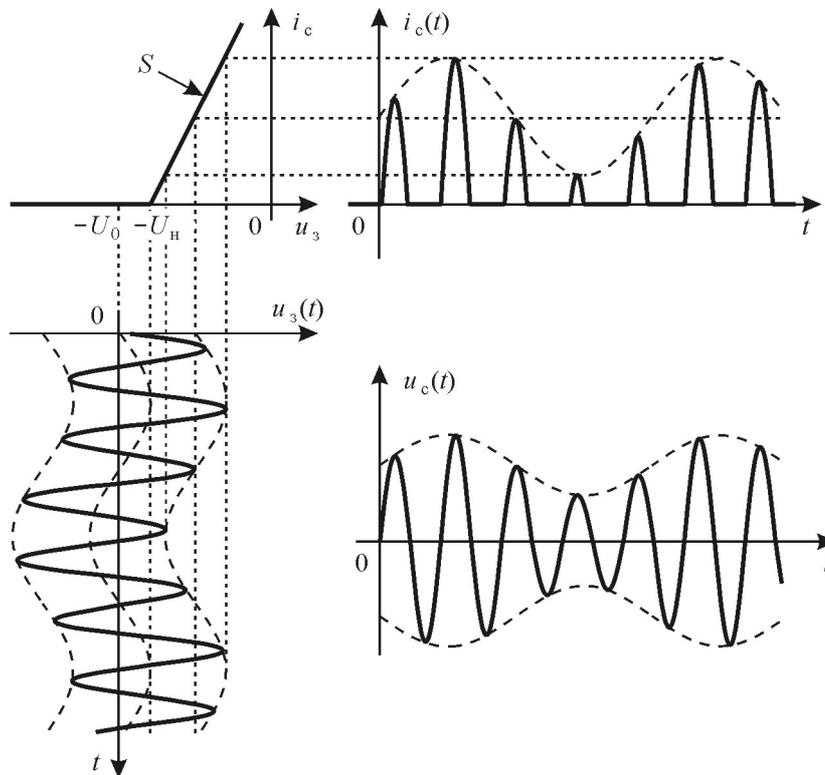


Рис. 8.3. Графики, поясняющие режим работы транзисторного усилителя при получении гармонической модуляции смещением

Для выбора режима работы и для оценки качества модуляции удобно использовать статическую модуляционную характеристику, которую снимают при $U_{\Omega m} = 0$. Её можно рассчитать, используя метод угла отсечки, по формулам (8.3), (8.5) и (8.6). Полученная характеристика используется для выбора режима

работы модулятора. Рабочую точку U_0 нелинейного элемента выбирают на середине линейного участка этой характеристики. С помощью статической модуляционной характеристики можно определить амплитуду модулирующего напряжения, для получения АМК с заданным коэффициентом глубины модуляции M , определить диапазон изменения модулирующего напряжения, при котором искажения при модуляции будут на приемлемом уровне.

Детектирование колебаний заключается в выделении сигнала, который содержится в модулированном высокочастотном колебании. Детектирование является процессом обратным модуляции. На вход амплитудного детектора подается модулированное колебание, которое содержит только высокочастотные составляющие: несущее колебание и колебания боковых частот. На выходе же выделяется напряжение с низкочастотным спектром передаваемого сообщения. Следовательно, амплитудное детектирование всегда сопровождается трансформацией спектра и может быть реализовано в нелинейных цепях.

Схема простейшего диодного амплитудного детектора приведена на рис. 8.4. Элементы R и C образуют фильтр, который позволяет при правильно выбранных параметрах получить на выходе неискаженное низкочастотное колебание. Для этого необходимо выполнить условия

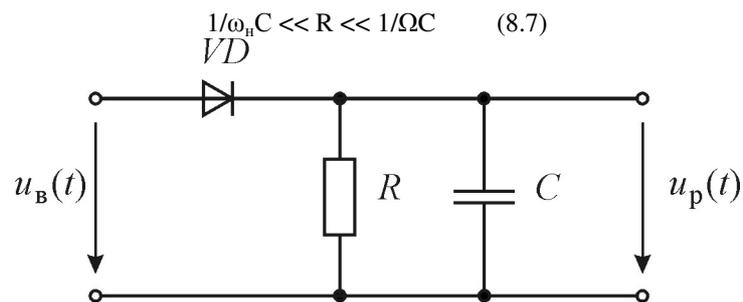


Рис. 8.4 Диодный амплитудный детектор

При невыполнении левой части неравенства на выходе детектора появляются высокочастотные компоненты (в осциллограмме выходного напряжения появляется «размытость»), а при невыполнении правой части неравенства в выходном напряжении детектора появляются нелинейные искажения (рис. 8.5).

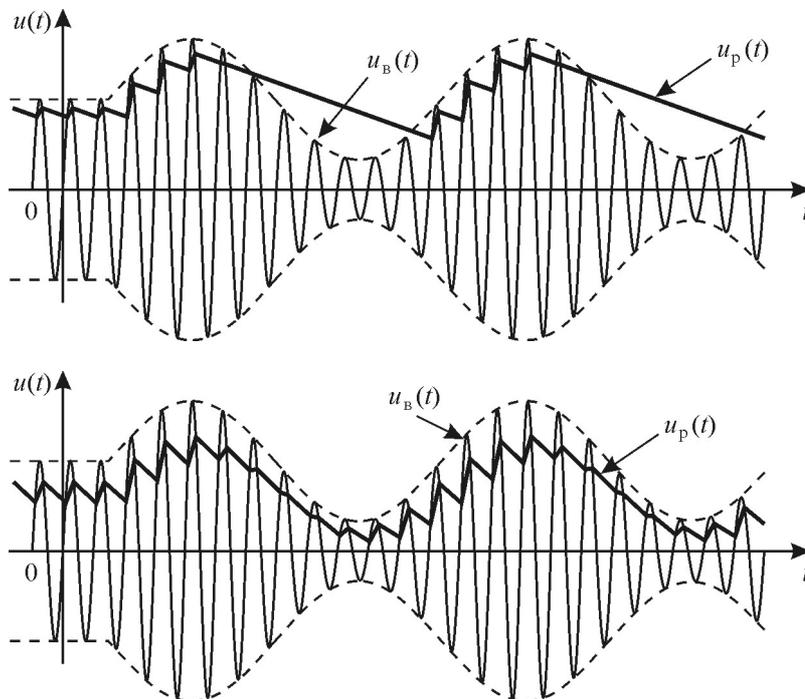


Рис. 8.5 Сигнал на входе и выходе диодного амплитудного детектора при невыполнении и выполнении условия 8.7.

Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на установке, часть передней панели которой приведена на рис. 8.6.

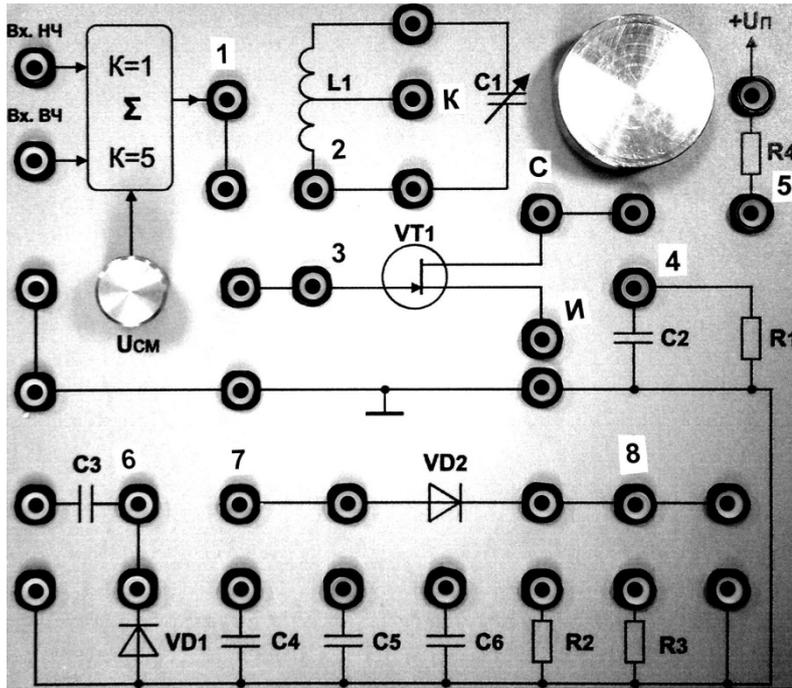


Рис. 8.6. Часть передней панели лабораторного макета

Исследуемые схемы – амплитудный модулятор и амплитудный детектор собираются путем соединения перемычками соответствующих гнезд. При анализе амплитудного модулятора несущее гармоническое колебание от генератора АКПП-3407 подводится к гнездам «Вх. Вч.», а низкочастотное управляющее колебание к гнезду «Вх. НЧ»

Постоянное напряжение смещения на затвор транзистора можно изменять потенциометром «U_{см}». Постоянное напряжение измеряется цифровым осциллографом АКПП-4115 при открытом входе (DC), измеряя с помощью масштаба смещение по вертикали нулевой линии. Выход модулятора (гнездо «2») внутри лабораторного макета соединено со входом амплитудного детектора (гнездо «7»).

Домашнее задание

Исходные данные для расчётов для всех бригад: $L = 3,4$ мГн, $Q_k = 200$, $p = 0,5$, $S = 1,2$ мА/В, $R_i = 16$ кОм. $U_{п} = -1,2$ В

Резонансную частоту взять из таблицы заданий.

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_0 , кГц	130	135	140	145	150	155	160	165	170	180
M %	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35
F кГц	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
U_m мВ	100	110	120	130	140	150	160	170	185	200

1. Нарисовать форму напряжения на затворе транзистора и на выходе модулятора.
2. Рассчитать и построить по формулам 8.3-8.5 статическую модуляционную характеристику. При расчете напряжение U_0 задавать в диапазоне $U_{п} \pm U_m$.
3. По статической модуляционной характеристике определить амплитуду модулирующего напряжения $U_{\Omega m}$ для получения заданного коэффициента глубины модуляции M.
4. Нарисовать форму напряжения на выходе амплитудного детектора при подаче на вход детектора тонально модулированного АМК при правильно выбранным параметрам фильтра.

Лабораторное задание

20. Собрать схему для исследования амплитудного модулятора. Для этого перемычками соединить гнезда «1» и «3», гнезда «И» и корпус, гнезда «С» и «К». Подключить канал А генератора сигналов АКПП-3407 к гнездам «Вх. ВЧ» и корпус, выход канала В к гнездам «Вх.Нч» и корпус, вход канала 1 осциллографа АКПП-4115 к гнездам «3» и корпус, а вход канала 2 к гнездам «2» и корпус. Получить разрешение преподавателя или лаборанта на выполнение лабораторной работы.

21. Включить приборы. Кнопка включения питания «0 / I» генератора АКИП-3407 находится на задней его панели слева под шнуром питания; после включения питания начинает мигать кнопка включения рабочего режима, расположенная в левом нижнем углу передней панели генератора, нажатие на которую завершает операцию включения генератора. Кнопка включения питания осциллографа АКИП-4115 находится на верхней стороне корпуса слева. Включить питание лабораторного макета (тумблер вверх справа).
22. Настроить осциллограф. Прежде всего, необходимо установить стандартные настройки осциллографа («настройки по умолчанию» или «начальные установки»), для этого достаточно нажать кнопку «НАЧ УСТ». Затем нажать кнопку «КАН 1» и выбрать в разделе «Связь входа» экранного меню «КАН1» (расположено по правому краю экрана осциллографа) режим связи канала 1 по постоянному току — режим «ДС» (такой режим называется также «открытым входом»). Управление экранным меню осуществляется с помощью кнопок управления, размещённых вдоль правого края экрана осциллографа, напротив соответствующих пунктов экранного меню. Настройки каналов вертикального отклонения символически отображаются в левом нижнем углу экрана. После переключения в режим связи по постоянному току на экране должен появиться значок «СН1---1.00V». В правой части этой строки указывается масштаб изображения по вертикали — коэффициент вертикального отклонения. Указанная в данном случае величина «1.00V» означает, что одна клетка экранной сетки соответствует 1 В входного напряжения осциллографа. Аналогично настроить осциллограф по КАН2, с тем отличием, что режим связи установить - «АС».
23. Установить на генераторе АКИП-3407 по каналу А гармоническое напряжение с частотой f_0 и амплитудой U_m . Для этого с помощью клавиш меню (внизу экрана) установить f_0 , кГц и заданную амплитуду U_m .
24. Установить напряжение смещения $U_0 = -0,8$ В. Для этого по каналу КАН1 выбрать в разделе «Связь входа» экранного меню «земля», ручкой смещение по вертикали совместить нулевую линию с одной из горизонтальных линий экрана, заметить выбранную линию. Перейти, нажимая клавишу «Связь входа», в режим «ДС», и ручкой $U_{см}$ (лаб. макет) с помощью масштаба по КАН1 установить нулевую линию в положение соответствующее напряжению смещения $U_0 = -0,8$ В. Подать с генератора АКИП-3407 установленное гармоническое колебание, нажав клавишу «Выход» канала А (клавиша «выход» должна загореться).
25. Изменяя ёмкость конденсатора С1, настроить контур модулятора в резонанс.
26. Снять по пяти, шести точкам и построить статическую модуляционную характеристику, изменяя U_0 в диапазоне $U_n \pm U_m$. Рекомендуется каждый раз при установке напряжения U_0 отключать выход канала А (клавиша «выход» должна быть погашена). По построенной статической модуляционной характеристике определить амплитуду модулирующего напряжения $U_{\Omega m}$ для получения заданного коэффициента глубины модуляции М. Сравнить полученное значение со значением, найденном в домашнем задании.
27. Подать на гнездо «Вх. НЧ» модулирующее напряжение частотой F и амплитудой $U_{\Omega m}$, найденной при выполнении п.7. Для этого на генераторе АКИП-3407 по каналу В установить гармоническое напряжение частотой F и амплитудой $U_{\Omega m}$, найденной при выполнении п.7, и нажать клавишу «Выход» канала В (клавиша «выход» должна загореться). Ручкой «горизонт» установить масштаб по горизонтали, чтобы на экране осциллографа размещалось два, три периода модулирующего напряжения. Ручками «смещение» канала 1 и 2, регулируя усиление по каналам 1 и 2 установить, чтобы изображение по каналу 1 было в верхней части экрана, а изображение по каналу 2 – в нижней половине. Зарисовать или сфотографировать изображение колебаний на экране. Измерить коэффициент глубины модуляции М $((A-B)/(A+B))$ и сравнить с требуемым.
28. Исследовать структуру спектров на входе и выходе модулятора. Для этого ручкой «горизонт» установить масштаб по горизонтали 500 мкс/клетку, нажать клавишу «математика», выбрать оператор «БПФ», окно «прямоугольник», перейти на стр. 2, выбрать шкалу V_{rms} , дисплей – «полный» и по очереди переключаясь на канал 1 и канал 2, подводя спектральные пики ручкой смещение по горизонтали под курсор (расположен сверху в центре экрана), измерить частоту спектральных пиков. Зарисовать или сфотографировать спектры колебаний $u_3(t)$ и $u_c(t)$. Для получения изображений колебания и его спектра следует изображение по другому каналу погасить, нажав соответствующую кнопку «вход» (кнопка должна погаснуть). Спектры наблюдать при растяжке БПФ «1х».
29. Повторить пункты 8. 9 подав на гнездо «Вх. НЧ» модулирующее напряжение частотой 2F и амплитудой $U_{\Omega m}$, найденной при выполнении п.7. После выполнения п.9 установить частоту модулирующего напряжения F.
30. Собрать схему детектора АМК. Для этого двойной перемычкой соединить гнездо резистора R2 с гнездом конденсатора С6 и гнездом «8», канал1 осциллографа подключить к гнезду «8».
31. Исследовать процесс детектирования АМК. Ручкой «горизонт» установить масштаб по горизонтали, чтобы на экране осциллографа размещалось два, три периода модулирующего напряжения. Ручками «смещение» канала 1 и 2, регулируя усиление по каналам 1 и 2 установить, чтобы изображение по каналу 2 было в верхней части экрана, а изображение по каналу 1 – в нижней половине. Зарисовать или сфотографировать изображение колебаний на экране.

32. Исследовать структуру спектров на входе и выходе детектора. Для этого ручкой «горизонт» установить масштаб по горизонтали 500 мкс/клетку, нажать клавишу «математика», выбрать оператор «БПФ», окно «прямоугольник», перейти на стр. 2, выбрать шкалу-Vrms, дисплей – «полный» и по очереди переключаясь на канал 1 и канал 2, подводя спектральные пики ручкой смещение по горизонтали под курсор (расположен сверху в центре экрана), измерить частоту спектральных пиков. Зарисовать или сфотографировать спектры колебаний на входе и выходе детектора. Для получения изображений колебания и его спектра следует изображение по другому каналу погасить, нажав соответствующую кнопку «вход» (кнопка должна погаснуть). Спектры наблюдать при растяжке БПФ «1x».
33. Исследовать процесс детектирования АМК при маленькой емкости фильтра RC. Для этого отключить провод двойной переключки от гнезда конденсатора С6. Повторить пп.12,13.
34. Исследовать процесс детектирования АМК при большой емкости фильтра RC. Для этого подключить провод двойной переключки к гнезду конденсатора С5. Повторить пп.12,13.

Содержание отчета

5. Принципиальные схемы амплитудного модулятора и детектора.
6. Результаты выполнения домашнего задания.
7. Осциллограммы и графики, полученные при выполнении лабораторного задания.
8. Краткие выводы, сравнение теоретических и экспериментальных результатов, анализ причин возможных расхождений.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются осциллограммы напряжений на затворе и стоке транзистора модулятора при тональной модуляции?
2. Чем отличаются спектры напряжений на затворе и стоке транзистора модулятора при тональной модуляции?
3. Объясните назначение транзистора и колебательного контура в амплитудном модуляторе.
4. Как получаются амплитудно-модулированные колебания при модуляции смещением?
5. Что такое статическая модуляционная характеристика? Каково её назначение?
6. Как выбирается рабочий режим модулятора? Почему режим работы транзистора модулятора должен быть нелинейным?
7. Можно ли при модуляции смещением получить $M = 100\%$ без искажения огибающей АМ-колебаний?
8. Как влияет на выходное напряжение модулятора изменение напряжения смещения?
9. Как выбирается полоса пропускания контура модулятора?
10. Как влияет на выходное напряжение модулятора изменение частоты модуляции?
11. Объясните назначение диода и цепи RC в амплитудном детекторе.
12. Как выбираются параметры цепи RC детектора?
13. Чем отличаются спектры входного и выходного сигналов амплитудного детектора?

Библиографический список

1. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986. — С. 74 – 81, 231 – 235, 255 – 257, 242-247.
2. Аскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1988. — С. 103 – 114, 332 – 342, 289-290.
3. Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Форум, 2013. –С.431.