

**№ 4585**

**621.37**

**Р 154**

# **РАДИОТЕХНИКА**

**Методические указания**

**НОВОСИБИРСК  
2016**

# РАДИОТЕХНИКА

Методические указания к проведению лабораторных работ  
для студентов факультета радиотехники и электроники  
направления 11.03.04 – Электроника и нанoeлектроника,  
профиль «Электронные приборы и устройства», а также  
факультета автоматики направления 10.03.01 – Информационная  
безопасность; профили «Безопасность компьютерных систем»,  
«Комплексная защита объектов информатизации»  
и специальности 10.05.03 – Информационная безопасность  
автоматизированных систем

ББК 32.841-01я7  
УДК 621.372 (076.5)  
Р154

Составители:

*В.М. Меренков, А.Н. Яковлев*

Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.К. Макуха*

Работа подготовлена на кафедре  
теоретических основ радиотехники

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2016

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Методические указания содержат описание шести лабораторных работ по всем основным разделам курсов «Радиотехника». Они могут быть использованы при изучении таких дисциплин, как «Радиотехнические цепи и сигналы», «Основы радиотехники», «Теоретические основы радиотехники», «Основы теории цепей и сигналов» и других, включающих в свою программу основы теории преобразований сигналов в линейных и нелинейных радиотехнических цепях.

Каждая работа состоит из индивидуализированных в пределах одного рабочего места предварительного (домашнего) и практического (лабораторного) заданий, а также теоретических сведений в объеме, необходимом для выполнения этих заданий. Важно, что сделанные студентами дома теоретические расчёты затем проверяются и анализируются в лаборатории при выполнении практического задания. В конце каждой работы приведены контрольные вопросы.

Экспериментальная часть лабораторных работ представляет собой компьютерную модель реальных радиотехнических схем и устройств, построенных в профессиональной и образовательной среде схемотехнического проектирования «Multisim-10».

Работы № 1, 2, 6 подготовлены В.М. Меренковым. Работы № 3, 4, 5 – совместно с А.Н. Яковлевым.

Авторы благодарят рецензента заведующего кафедрой ЭП НГТУ профессора В.К. Макуху за сделанные критические замечания.

# **Лабораторная работа № 1**

## **ФИЛЬТРЫ НИЖНИХ И ВЕРХНИХ ЧАСТОТ. ПОЛОСОВЫЕ ФИЛЬТРЫ**

### **1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Исследование частотных и переходных характеристик  $RC$ -фильтров верхних и нижних частот, а также полосовых  $RLC$ -фильтров.

### **1.2. $RC$ -ФИЛЬТРЫ НИЖНИХ И ВЕРХНИХ ЧАСТОТ**

#### **1.2.1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО УСТРОЙСТВА**

Виртуальная лабораторная установка собрана в среде «Multisim» (рис. 1.1). Она включает в себя две  $RC$ -цепочки. Та, у которой напряжение снимается с ёмкости, может использоваться как фильтр нижних частот (ФНЧ), та, у которой с сопротивления, – как фильтр верхних частот (ФВЧ).

Ключом "Кл1" с помощью ключа "Кл2" (ФНЧ-ФВЧ) на вход исследуемой схемы подаётся либо гармоническое напряжение от источника "V1", либо последовательность прямоугольных импульсов положительной полярности от источника "V2".

Ключом "Кл3" к выходу исследуемой схемы подключается индикаторный блок, состоящий из осциллографа "XSC1" и построителя частотных характеристик (плоттера Боде) "ХВР1".

*Действующие* значения входного и выходного напряжения измеряются вольтметрами:  $U_{\text{вх}}$ ,  $U_{\text{вых}}$ .

Параметры фильтров для каждого рабочего места даны в табл. 1.1.

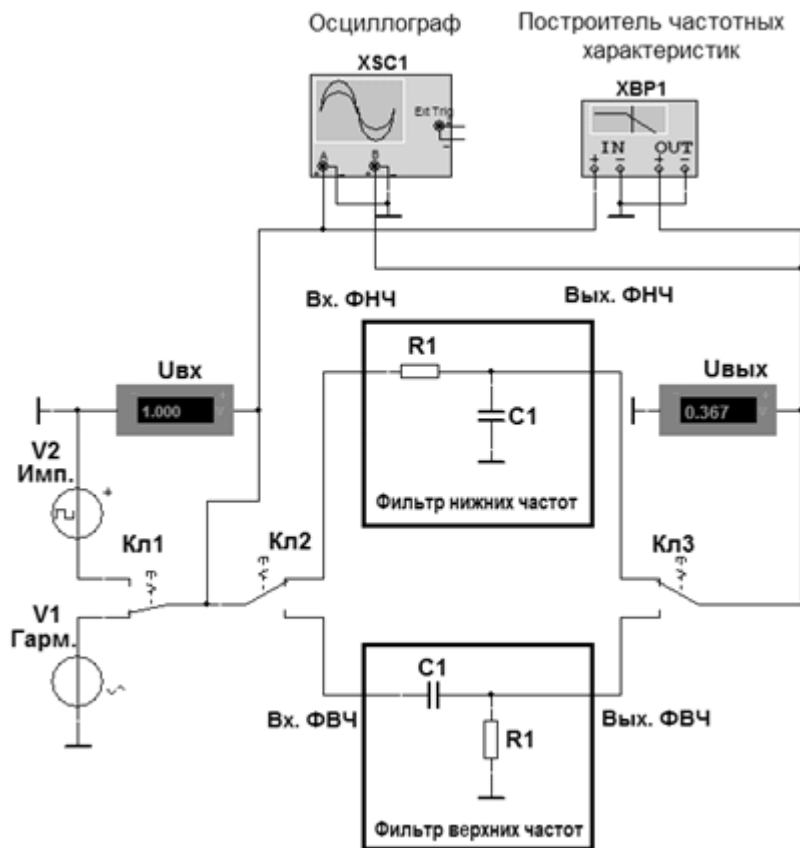


Рис. 1.1. Лабораторное устройство

Таблица 1.1

Параметры	Номер стенда									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C1, пФ	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100
R1, кОм	122	113	106	99,0	93,0	88,0	83,0	79,0	75,0	72,0
R2, кОм	6,1	5,6	5,3	4,9	4,6	4,4	4,2	3,9	3,7	3,6

### 1.2.2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучите основные вопросы темы по конспекту лекций и литературе.

*Указание.* Расчёты и построения по каждому фильтру проведите для двух значений сопротивления ( $R = R_1, R_2$ ). *Результаты расчётов занесите в табл. 1.2.*

2. Рассчитайте и постройте графики АЧХ ( $K(f)$ ) и ФЧХ ( $\varphi(f)$ ) фильтров для  $\tau_1 = R_1 C_1$  и  $\tau_2 = R_2 C_1$ . Фазы вычислять в градусах.

Графики постройте на миллиметровке. На них же в ходе практической работы изобразите и результаты эксперимента. Рекомендуемые размеры:  $\sim 10$  см – по вертикали и  $\sim 15$  см – по горизонтали (по оси частот). Масштаб по оси частот: для  $\tau_1$  от 0 до 20 кГц и для  $\tau_2$  от 0 до 400 кГц. При этом на графиках для  $\tau_1, \tau_2$  можно совместить кривые, соответствующие ФНЧ и ФВЧ.

3. Для каждого фильтра определите граничную частоту полосы пропускания ( $f_{гр1}, f_{гр2}$ ) и фазовый ( $\varphi_{гр1}, \varphi_{гр2}$ ) сдвиг гармонического сигнала на граничной частоте. Отметьте их на графиках.

4. Рассчитайте и постройте переходные характеристики фильтров  $h_{ФНЧ}(t)$ ,  $h_{ФВЧ}(t)$ , а также рассчитайте и отметьте на графиках время окончания переходного процесса ( $t_{y1}, t_{y2}$ ).

Таблица 1.2

Фильтр	$f_{гр1}$ , кГц	$f_{гр2}$ , кГц	$\varphi_{гр1}$ , град	$\varphi_{гр2}$ , град	$\tau_1$ , мкс	$\tau_2$ , мкс	$t_{y1}$ , мкс	$t_{y2}$ , мкс
ФНЧ								
ФВЧ								

#### Пояснения и расчетные соотношения

*Комплексный (частотный) коэффициент передачи* представляет собой зависимость отношения комплексных амплитуд выходного и входного напряжений от частоты.

$$K_{ФНЧ}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{1 + j\omega\tau} = K_{ФНЧ}(\omega)e^{j\varphi_{ФНЧ}(\omega)},$$

$$K_{\text{ФВЧ}}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau} = K_{\text{ФВЧ}}(\omega)e^{j\varphi_{\text{ФВЧ}}(\omega)},$$

где  $\tau = RC$  – постоянная времени цепи.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – это зависимость модуля частотного коэффициента передачи от частоты:

$$K_{\text{ФНЧ}}(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}}, \quad K_{\text{ФВЧ}}(f) = \frac{2\pi f\tau}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}}.$$

Фазочастотная характеристика – это зависимость аргумента частотного коэффициента передачи от частоты:

$$\varphi_{\text{ФНЧ}}(f) = -\arctg(2\pi f\tau), \quad \varphi_{\text{ФВЧ}}(f) = \arctg(1/2\pi f\tau).$$

На граничной частоте модуль коэффициента передачи равен  $1/\sqrt{2}$  от своего максимального значения  $K(f_{\text{гр}}) = 0,707 K_{\text{max}} = 0,707$ . Отсюда граничная частота  $RC$ -фильтров

$$f_{\text{гр}}^{\text{ФНЧ}} = f_{\text{гр}}^{\text{ФВЧ}} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau}.$$

*Переходная характеристика*  $h(t)$  – это реакция цепи на единичный скачок напряжения на входе ( $U_{\text{вх}} = \sigma(t)|_{t>0} = 1 \text{ В}$ , при этом  $U_{\text{вых}} = h(t)$ ),

$$h_{\text{ФНЧ}}(t) = 1 - \exp(-t/\tau), \quad h_{\text{ФВЧ}}(t) = \exp(-t/\tau).$$

Переходный процесс можно считать законченным, когда реакция достигнет уровня 0,95 для ФНЧ и 0,05 для ФВЧ ( $\exp(-t_y/\tau) \approx 0,05$ ). Отсюда время установления  $t_y \approx 3\tau$ .

### 1.2.3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Откройте диск "Education Argon" (D), папки "Радиотехника 2016", "Лаб.раб. 1", "ФНЧ-ФВЧ\_2016" и файл "ФНЧ\_ФВЧ\_В#.ms10". "#" – соответствует номеру вашего стенда.

*Указание.* По результатам эксперимента проводится расчёт и заполняется таблица, аналогичная табл. 1.2.



1. Снимите АЧХ ФНЧ для  $\tau_1 = R_1 C_1$  и  $\tau_2 = R_2 C_1$ . Сравните установленные параметры  $R_1$  и  $C_1$  с заданными. При необходимости исправления значений  $C_1$ , а также замены  $R_1$  на  $R_2$  дважды щёлкните на нужном значке и во вкладке "Значение" ("Value") установите требуемую величину  $R_1$  или  $C_1$ .

С помощью ключей "Кл1" и "Кл2" подайте на вход ФНЧ гармоническое напряжение от источника "V1" с посчитанной в предварительном задании граничной частотой и действующим значением 1 В. Для этого в меню источника задайте: "Frequency (F)" =  $f_{\text{гр}}^{\text{ФНЧ}}$ ; "Voltage (RMS)" = 1В. Ключом "Кл3" присоедините к выходу ФНЧ измерительно-индикаторную часть схемы. Пронаблюдайте форму входного и выходного сигнала на двухканальном осциллографе "XSC1".

Для получения АЧХ активируйте мышкой построитель частотных характеристик "ХВР1". В меню "Установки" ("Settings...") задайте максимальное разрешение 1000 точек. В главном меню выберите режим работы "Модуль" ("Magnitude"). По горизонтальной и вертикальной оси должен быть линейный масштаб ("Lin"). Установите начальное ("I") и конечное ("F") значение изменения частоты: "I" = 0 Гц; "F" = 20 кГц для  $\tau_1$  и "F" = 400 кГц для  $\tau_2$ , а также начальное и конечное значение масштаба усиления: "I" = 0, "F" = 1.

Запустите моделирование и по полученной АЧХ с помощью курсоров (маркёров) определите значения частоты для уровней (0,9, 0,8, 0,707, 0,5, 0,3, 0,1)  $K_{\text{max}}$ . Постройте графики  $K(f)$  для различных  $\tau$ , совместив их с графиками предварительного задания. Определите и отметьте на графиках  $f_{\text{гр1}}, f_{\text{гр2}}$ .

2. Получите ФЧХ ФНЧ  $\varphi(f)$  для  $\tau_1 = R_1 C_1$  и  $\tau_2 = R_2 C_1$ . В окне построителя ЧХ нажмите клавишу "Фаза" ("Phase") и установите по вертикали: "F" =  $90^\circ$ , "I" =  $-90^\circ$ . Снимите отсчеты фазы для  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Шаг по частоте такой же, как в п. 1. Графики ФЧХ также совместите с графиками предварительного задания.

3. Получите графики переходных характеристик ФНЧ  $h_{\text{ФНЧ}}(t)$  для  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Ключом "Кл1" присоедините к входу ФНЧ генератор прямоугольных импульсов "V2". Активируйте его меню и установите во вкладке "Значение" ("Value") амплитуду импульсов "V" = 1 В и частоту "F" = 1 кГц для цепи с  $\tau_1$ ; "F" = 20 кГц для цепи с  $\tau_2$ .

Переходные характеристики и входной сигнал наблюдайте на двухканальном осциллографе "XSC1". Для этого в каждом канале ("А" и "В") должна быть нажата клавиша "DC" и установлен масштаб по вертикали "Scale = 500 mV/Div". По горизонтали (ось времени) должна быть нажата клавиша "V/T" и установлено: "Scale" = 100 и 5 us/Div для  $\tau_1$  и  $\tau_2$  соответственно ( $1\text{us} = 10^{-6}\text{ c}$ ).

С помощью курсоров (маркёров) снимите отсчёты и постройте графики  $h(t)$  для  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , совместив их с графиками предварительного задания.

*Указание.* Для удобства отключите канал "А", нажав клавишу "0"; курсор 1 поместите в начало переходного процесса, а курсором 2 снимайте значения  $h(t)$  с шагом  $\sim(0,1\dots0,2)h_{\max}$ .

Определите длительность переходного процесса  $t_y$  по уровню  $\sim 0,95h_{\max}$  для ФНЧ и  $\sim 0,05h_{\max}$  для ФВЧ.

4. Повторите пункты 1–3 для ФВЧ.

### 1.3. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР КАК ПОЛОСОВОЙ *RLC*-ФИЛЬТР

#### 1.3.1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО УСТРОЙСТВА

Экспериментальная радиотехническая цепь с *параллельным колебательным контуром* ( $C_1$ ,  $L_1$ ,  $R_n$ ) смоделирована в среде "Multisim" (рис. 1.2).

Она включает в себя источники синусоидального *тока* "I1", импульсного *тока* "I2", двухканальный осциллограф "XSC1" и цифровой вольтметр "Увых", измеряющий *амплитуду* гармонического напряжения на контуре.

С помощью ключа "Кл2" параллельно контуру можно присоединить шунтирующий резистор  $R_{\text{ш}}$ .

Параметры контура и сопротивления шунта для каждого рабочего места заданы в табл. 1.3.

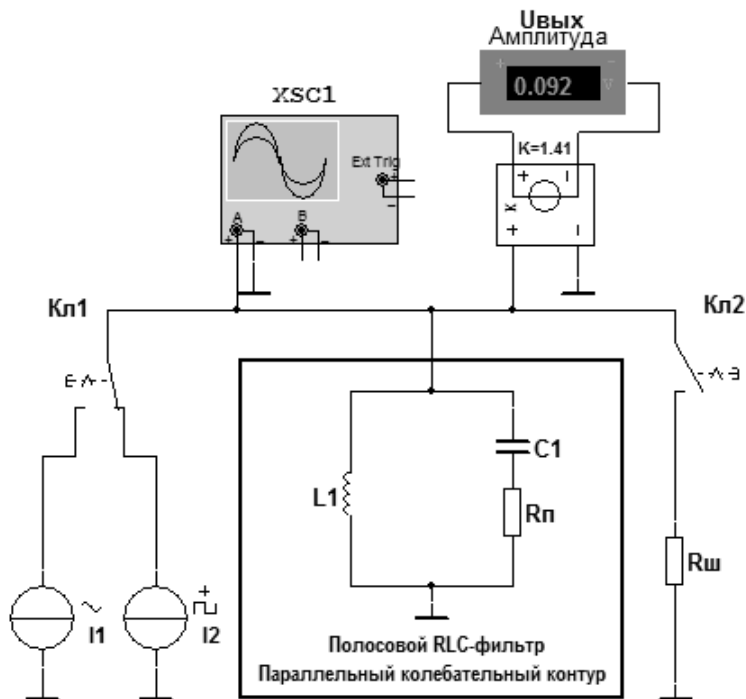


Рис. 1.2. Лабораторное устройство

Таблица 1.3

Параметры	Номер стенда									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_1$ , нФ	6,4	7,2	8,0	8,8	9,6	10,4	11,2	12,0	12,8	13,6
$L_1$ , мГн	1,6	1,55	1,5	1,45	1,4	1,35	1,3	1,25	1,2	1,15
$R_n$ , Ом	50	47	44	41	38	35	32	29	26	23
$R_{ш}$ , кОм	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

### 1.3.2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Изучите основные вопросы теории контуров по конспекту лекций и литературе.

1. Рассчитайте резонансную частоту ( $f_0$ ) контура.
2. Рассчитайте характеристическое сопротивление ( $\rho$ ), а также эквивалентное сопротивление, вносимое в контур при шунтировании ( $R_{\text{вн}}$ ).
3. Рассчитайте добротность ( $Q$ ,  $Q_{\text{эш}}$ ) и полосу пропускания ( $2\Delta f_{0,7}$ ,  $2\Delta f_{0,7\text{ш}}$ ) контура.
4. Рассчитайте и постройте нормированные резонансные кривые ( $n(f)$ ,  $n_{\text{ш}}(f)$ ) контура. Пометьте на каждой кривой полосу пропускания.
5. Рассчитайте и постройте график ФЧХ параллельного контура  $\varphi(f)$ . На графике отметьте значения фазы на граничных частотах  $\varphi(f_{\text{гр.н}})$ ,  $\varphi(f_{\text{гр.в}})$ . Размерность ФЧХ – градусы.
6. Рассчитайте коэффициент затухания ( $\alpha$ ,  $\alpha_{\text{эш}}$ ), постоянную времени ( $\tau$ ,  $\tau_{\text{ш}}$ ) и время установления переходного процесса ( $t_y$ ,  $t_{\text{уш}}$ ).
7. Изобразите качественно графики нормированных переходных характеристик  $h_{\text{н}}(t)$ ,  $h_{\text{нш}}(t)$ . Пометьте на графиках  $t_y$ .
8. Рассчитайте резонансное сопротивление контура ( $Z_p$ ,  $Z_{\text{рш}}$ ).
9. Вычислите амплитуду напряжения на контуре ( $U_{\text{вых}}$ ) без шунта и с шунтом, если амплитуда входного гармонического тока на резонансной частоте  $I_{1m} = 1 \text{ mA}$ .
10. Определите амплитуду прямоугольных импульсов источника тока ( $I_{2m}$ ), которые необходимо подать на контур так, чтобы на выходе осциллограф показал нормированную переходную характеристику.

*Указание.* Все расчёты выполняются для нешунтированного и шунтированного контура и заносятся в табл. 1.4.

Т а б л и ц а 1.4

Вид контура	$f_p$ , кГц	$\rho$ , Ом	$R_{вн}$ , кОм	$Q$	$2\Delta f_{0,7}$ , кГц	$\Phi(f_{гр.н})$ , град	$\Phi(f_{гр.в})$ , град	$Z_p$ , кОм	$\alpha$	$\tau$ , мкс	$t_y$ , мкс	$U_{вых1}$ , В	$I_{2m}$ , мА
Полный контур													
Полный контур с шунтом													

### Пояснения и расчетные соотношения

Резонансная частота ( $f_0$ ), характеристическое сопротивление ( $\rho$ ), эквивалентное сопротивление потерь ( $R_{\Pi}$ ) и добротность контура ( $Q$ ) рассчитываются по формулам:

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad R_{\Pi} = r_L + r_C, \quad Q = \frac{\rho}{R_{\Pi}}, \quad (1.1)$$

где  $r_L$  и  $r_C$  – сопротивления потерь в индуктивной и ёмкостной ветви контура.

Комплексное входное сопротивлением контура определяет его свойства в частотной области.

$$\dot{Z}_{\text{вх}} = \frac{(r_L + j\omega L)(r_C + 1/j\omega C)}{(r_L + r_C + j\omega L + 1/j\omega C)} = \frac{\rho^2}{(R_{\Pi} + jX)} = \frac{Z_p}{1 + ja}, \quad (1.2)$$

где  $a = \frac{X_p}{R_{\Pi}} \approx 2Q \frac{f - f_0}{f_0} = 2Q \frac{\Delta f}{f_0}$  – обобщенная расстройка;  $\Delta f = (f - f_0)$ ,

$\Delta f / f_0$  – соответственно абсолютная и относительная расстройка.

Входное сопротивлением параллельного контура на резонансной частоте (резонансное сопротивление)

$$Z_p = \dot{Z}_{\text{вх}}(f_0) = (\rho^2 / R_{\Pi}) = Q\rho. \quad (1.3a)$$

Нормированная комплексная передаточная характеристика резонансного контура  $\dot{n}(a)$ :

$$\dot{n}(a) = \frac{\dot{Z}_{\text{вх}}(a)}{Z_p} = \frac{1}{1 + ja} = \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \exp[-j \arctg(a)]. \quad (1.3)$$

Колебательный контур можно использовать в качестве *полосового фильтра*. Нижняя и верхняя граничные частоты ( $f_{гр.н}, f_{гр.в}$ ) полосы пропускания фильтра вычисляются по уровню  $1/\sqrt{2} = 0,707$  от максимума АЧХ. Полоса пропускания контура ( $2\Delta f_{0,7}$ ) зависит от его добротности:

$$2\Delta f_{0,7} = (f_{гр.в} - f_{гр.н}) = f_0 / Q. \quad (1.4)$$

ФЧХ контура

$$\varphi(f) = -\arctg \left[ 2Q \frac{f - f_0}{f_0} \right]. \quad (1.5)$$

Свойства цепи во *временной области* определяются переходной характеристикой  $h(t)$ . В нашем случае  $h(t)$  представляет собой реакцию контура на единичный скачок тока и имеет размерность сопротивления.

Для контура с малыми потерями нормированная переходная характеристика

$$h_n(t) = \frac{h(t)}{\rho} \approx -e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t). \quad (1.6)$$

Коэффициент затухания ( $\alpha$ ) и постоянная времени контура ( $\tau_k$ )

$$\alpha = \frac{1}{\tau_k} = \frac{R_n}{2L} = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{\pi f_0}{Q} = \pi(2\Delta f_{0,7}). \quad (1.7)$$

Длительность переходного процесса ( $t_y$ ), т. е. время затухания в контуре собственных колебаний, можно определить графически по уровню 0,05 от максимального значения  $h(t)$  или вычислить по формуле

$$t_y \approx 3\tau_k = 3 \cdot 2Q / \omega_0 \approx Q / f_0 = \frac{1}{2\Delta f_{0,7}}. \quad (1.8)$$

Подключение параллельно контуру *сопротивления шунта* уменьшает входное сопротивление контура на резонансной частоте:

$$Z_{\text{рш}} = Z_{\text{р}} R_{\text{ш}} / (Z_{\text{р}} + R_{\text{ш}}) = Z_{\text{р}} / (1 + Z_{\text{р}} / R_{\text{ш}}). \quad (1.9)$$

Параллельное сопротивление шунта, пересчитанное в последовательное сопротивление потерь, называется *вносимым сопротивлением*

$$R_{\text{вн}} = \rho^2 / R_{\text{ш}}, \quad (1.10)$$

Появление в контуре дополнительного сопротивления потерь ( $R_{\text{вн}}$ ) меняет его частотные и временные свойства. Численно изменения можно оценить с помощью эквивалентной добротности и эквивалентного коэффициента затухания:

$$Q_{\text{эш}} = \frac{\rho}{R_{\text{п}} + R_{\text{вн}}} = \frac{Q}{1 + Z_{\text{р}} / R_{\text{ш}}}; \quad (1.11\text{а})$$

$$\alpha_{\text{эш}} = \frac{R_{\text{п}} + R_{\text{вн}}}{2L} = \alpha \left( 1 + \frac{Z_{\text{р}}}{R_{\text{ш}}} \right). \quad (1.11\text{б})$$

Амплитуда напряжения на полном ( $U_{\text{вых1}}$ ) и полном шунтированном ( $U_{\text{вых1}}^{\text{ш}}$ ) контуре на резонансной частоте при подключении к нему тока амплитудой  $I_{1\text{м}}$ :

$$U_{\text{вых1}} = I_{1\text{м}} Z_{\text{р}}; \quad U_{\text{вых1}}^{\text{ш}} = I_{1\text{м}} Z_{\text{рш}}. \quad (1.12)$$

### 1.3.3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Откройте папку "ПФ 2016" и файл "ПФ\_В#.msl0" со своим номером стенда "#".

*Указание.* По результатам эксперимента проводится расчёт и заполняется таблица аналогичная табл. 1.4.

1. Снимите резонансную кривую  $U_{\text{вых1}} = F(f)$  полного нешунтированного контура.

Ключом "Кл1" присоедините к контуру источник синусоидального тока "П". Дважды кликните на значке источника. Откроется вкладка "AC\_CURRENT". В строке "Частота (F)" установите рассчитанную

в предварительном задании (п. 1) резонансную частоту, в строке "Ток (Pk)" – амплитуду входного тока  $I_{1m} = 1 \text{ mA}$ . "Pk" означает пиковое (амплитудное) значение.

Резонансную кривую *получите автоматически* путём анализа схемы на переменном токе.

Для этого сначала дважды кликните на значке источника тока "I1" и в меню "Value" открывшейся вкладки, в строке "AC Analysis Magnitude" установите амплитуду входного тока  $I_{1m} = 1 \text{ mA}$ . Затем через пункты главного меню "Simulate" → "Analysis" откройте вкладку "AC Analysis". В пункте "Frequency Parameters" установите начальное "FSTART") и конечное "FSTOP" значение частоты так, чтобы максимум кривой был в центре частотной оси, а изменение частоты не превышало 60 кГц. Например, для варианта 1 "FSTART" = 20 кГц, "FSTOP" = 80 кГц. В пункте "Output" выберите переменную, для которой производится анализ (V4). Кнопкой "Simulate" запустите процесс анализа. В открывшемся окне "Grapher View" будут построены графики АЧХ и ФЧХ контура.

С помощью курсора перенесите и постройте их на одном графике с рассчитанными в предварительном задании *нормированной* резонансной кривой (п. 4) и фазочастотной характеристикой (п. 5). При построении АЧХ можно использовать шаг по частоте  $\Delta f \approx 1...2 \text{ кГц}$  или задавать относительные уровни напряжения 0,9; 0,707; 0,5; 0,3; 0,1.

Определите по графику АЧХ резонансную частоту, полосу пропускания контура и  $U_{\text{вых1}}$ . По полученным данным вычислите экспериментальные значения  $Q$ ,  $Z_p$ ,  $\rho$  и занесите их в таблицу. Сравните экспериментальные и расчетные результаты.

2. Повторите п. 1 для шунтированного контура. Показания и результаты вычислений занесите в таблицу.

3. Получите осциллограммы переходных характеристик нешунтированного и шунтированного контура.

На вход схемы подайте последовательность прямоугольных импульсов от источника тока "I2". Активируйте мышкой вкладку источника "CLOCK\_CURRENT" и во вкладке меню "Value" установите частоту повторения импульсов  $F \approx 1...2 \text{ кГц}$ . Амплитуду  $I_{2m}$  возьмите из п. 10 предварительного задания.

Активируйте осциллограф. Установите удобные для наблюдения масштабы по оси времени (Scale Timebase) и по оси напряжений (Scale Channel A). Зарисуйте полученные осциллограммы в отчёт.



С помощью курсоров оцените экспериментальное время установления переходного процесса по уровню 0,05 от максимума. Вычислите экспериментальные значения  $\alpha$  и  $\tau_k$ .

Занесите полученные результаты ( $t_y$ ,  $\alpha$ ,  $\tau_k$ ) в таблицу и сравните их с расчетными.

#### 1.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое АЧХ? Изобразите АЧХ  $RC$ -фильтра нижних частот, верхних частот, полосового  $RLC$ -фильтра.

2. Что такое ФЧХ? Изобразите ФЧХ  $RC$ -фильтра нижних частот, верхних частот, полосового  $RLC$ -фильтра.

3. Что такое полоса пропускания фильтра и граничная частота? Чему они равны для  $RC$ -фильтров низких и высоких частот, полосового  $RLC$ -фильтра?

4. Что происходит с формой АЧХ, ФЧХ и граничной частотой полосы пропускания  $RC$ -фильтров и  $RLC$ -фильтра при увеличении сопротивления  $R$ ?

5. Как изменится АЧХ  $RC$ -фильтров и  $RLC$ -фильтра с уменьшением емкости конденсатора?

6. Изобразите АЧХ и ФЧХ  $RC$ -фильтров и  $RLC$ -фильтра.

7. Как изменится граничная частота  $RC$ -фильтров и  $RLC$ -фильтра при увеличении или уменьшении сопротивления  $R$ ?

8. К какому изменению полосы пропускания  $RC$ -фильтров и  $RLC$ -фильтра приведет уменьшение ёмкости конденсатора?

9. Что такое переходная характеристика (ПХ)? Изобразите ПХ изучаемых в работе фильтров.

10. Поясните влияние элементов схемы  $C$ ,  $L$ ,  $R$  на ПХ ФНЧ, ФВЧ и ПФ.

11. Что такое время установления переходного процесса  $t_y$  и как оно связано с постоянной времени ( $\tau$ ) исследуемых цепей?

12. Изобразите реакцию фильтров на прямоугольный импульс. С какой временной характеристикой она связана?

13. Что такое импульсная характеристика? Ее связь с переходной.

14. Изобразите импульсные характеристики ФНЧ, ФВЧ и ПФ.

15. Используя переходную характеристику одного из фильтров, получите импульсную характеристику и наоборот.

16. Какова связь между импульсной характеристикой, переходной характеристикой и комплексным коэффициентом передачи цепей?

# Лабораторная работа № 2

## ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ

### 2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение влияния обратной связи на частотные и временные характеристики резонансного усилителя.

### 2.2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО УСТРОЙСТВА

Схема эксперимента показана на рис. 2.1. Резонансный усилитель собран на полевом транзисторе VT1 с управляемым  $p-n$ -переходом (канал  $n$ -типа). Нагрузкой транзистора служит параллельный колебательный контур ( $C_1, L_1, R_n$ ).

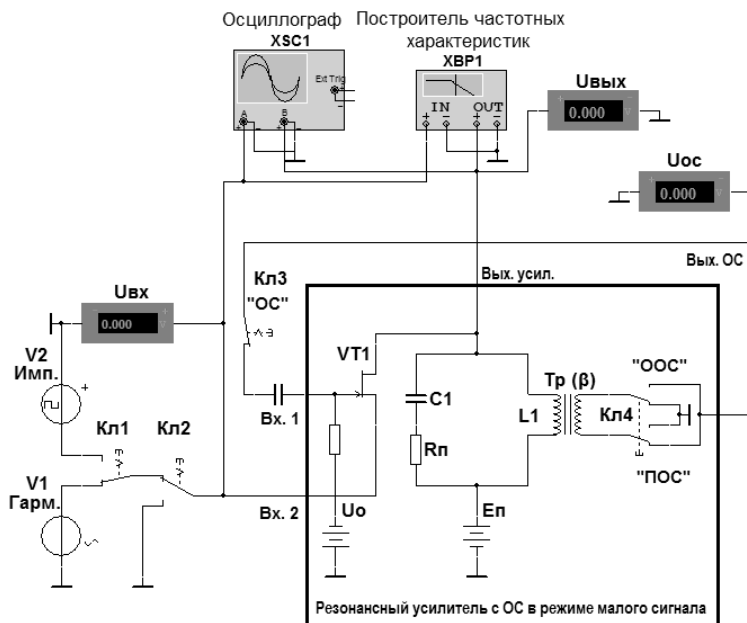


Рис. 2.1. Схема исследований резонансного усилителя с ОС

Трансформатор  $\text{Tr}(\beta)$  осуществляет обратную связь (ОС). Коэффициент трансформации и, следовательно, коэффициент передачи четырёхполосника ОС  $\beta$  регулируются от 0 до 1.

Ключ "Кл3" ("ОС") замыкает обратную связь. Ключ "Кл4" ("ООС" – "ПОС") меняет её тип (отрицательная ОС – положительная ОС).

На вход 2 усилителя ключами "Кл1", "Кл2" можно подать либо гармонический, либо импульсный сигнал от источников напряжения "V1", "V2". Напряжение смещения (рабочая точка транзистора) задаётся источником " $U_0$ ".

Параметры усилителя для каждого рабочего места различны и заданы в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Параметры	Номер стенда									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C$ , нФ	9,6	8,96	8,32	7,68	7,04	6,4	5,76	5,12	4,48	3,84
$L$ , мГн	0,8	0,96	1,12	1,28	1,44	1,6	1,76	1,92	2,08	2,24
$R_{п}$ , Ом	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56
$U_0$ , В	–0,4	–0,5	–0,6	–0,7	–0,8	–0,9	–1	–1,1	–1,2	–1,3
$k$	0,6	0,58	0,56	0,54	0,52	0,5	0,48	0,46	0,44	0,42

Сток-затворная вольт-амперная характеристика (ВАХ) транзистора изображена на графике рис. 2.2 и задана в табл. 2.2.

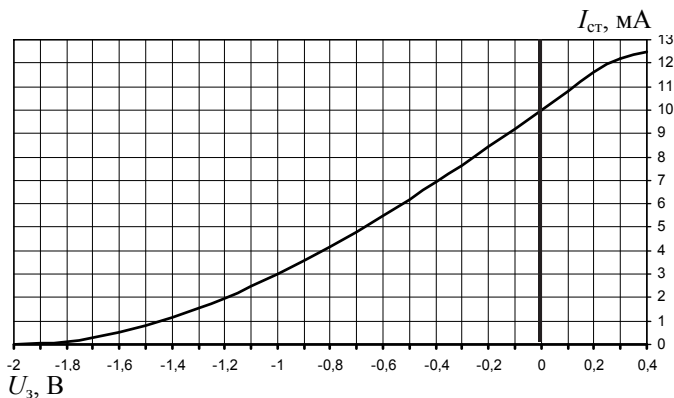


Рис. 2.2. ВАХ транзистора

Таблица 2.2

$U_3$ , В	0,3	0,2	0,1	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8
$I_{ст}$ , мА	12,2	11,6	10,8	10	9,2	8,42	7,65	6,91	6,19	5,49	4,82	4,18
$U_3$ , В	-0,9	-1	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6	-1,7	-1,8	-1,9	-2,0
$I_{ст}$ , мА	3,57	3	2,47	1,98	1,54	1,15	0,81	0,53	0,3	0,14	0,03	0

### 2.3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучите основные вопросы темы по конспекту лекций и литературе.

*Указание.* Результаты расчётов занесите в табл. 2.3.

2. Для усилителя без обратной связи определите резонансную частоту ( $f_0$ ) добротность ( $Q$ ), полосу пропускания ( $2\Delta f_{0,7}$ ), резонансное сопротивление контура ( $Z_p$ ), постоянную времени и время установления переходного процесса ( $\tau$ ,  $t_y$ ), крутизну  $S_i$  транзистора в рабочей точке  $U_0$ , а также резонансный коэффициент усиления ( $K_p$ ).

3. Постройте график АЧХ усилителя без ОС и график его переходной характеристики. На графиках отметьте полосу пропускания и время окончания переходного процесса.

4. Рассчитайте критические значения коэффициента передачи цепи обратной связи  $\beta_{кр}$ , соответствующие порогу возбуждения усилителя с положительной ОС.

5. Повторите пункты 2 и 3 для усилителя с положительной и отрицательной ОС при  $\beta = k\beta_{кр}$  ( $k$  задано в табл. 2.1). Вычислите сопротивление, вносимое в резонансный контур усилителя при ПОС и ООС ( $R_{вн}^{пос}$ ,  $R_{вн}^{оос}$ ).

Таблица 2.3

Режимы работы	$f_p$ , кГц	$R_{вн}^{ос}$ , Ом	$Q$	$2\Delta f_{0,7}$ , кГц	$Z_p$ , кОм	$S_i$ , мА/В	$K_p$	$\beta_{кр}$	$\tau$ , мс	$t_y$ , мс
Без ОС										
С положительной ОС										
С отрицательной ОС										

## Пояснения и расчётные соотношения

Радиотехническая цепь, у которой выходной сигнал (или его часть), возвращается на вход (рис. 2.3), называется цепью с *обратной связью*. Она состоит из основного четырёхполюсника с коэффициентом передачи  $K(j\omega)$  и четырёхполюсника обратной связи с коэффициентом передачи  $\beta(j\omega)$ .

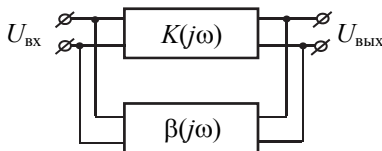


Рис. 2.3. Цепь с обратной связью

Коэффициент передачи цепи с ОС вычисляется по формуле

$$K_{\text{ОС}}(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{K(j\omega)}{1 - K(j\omega)\beta(j\omega)}. \quad (2.1)$$

В нашем случае основной четырёхполюсник – это *резонансный усилитель*, работающий в линейном режиме. Четырёхполюсник обратной связи – это трансформатор, соединяющий вход и выход усилителя.

Коэффициент передачи резонансного усилителя без ОС

$$K_{\text{пу}}(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = S_i \dot{Z}_{\text{ВХ}}, \quad (2.2)$$

где  $\dot{Z}_{\text{ВХ}}$  – комплексное входное сопротивление параллельного резонансного контура (формула (1.2) Л.Р. № 1).  $S_i$  – дифференциальная крутизна транзистора, которую для заданного напряжения смещения  $U_0$  можно найти, используя ВАХ рис. 2.2 или табл. 2.2 по формуле  $S_i \approx \Delta i / \Delta U$ , где  $\Delta i$ ,  $\Delta U$  – небольшие приращения тока и напряжения с центром в рабочей точке  $U_0$ .

АЧХ резонансного усилителя (зависимость  $|\dot{K}_{\text{пу}}|$  от частоты)

$$K_{\text{пу}}(f) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(f)}{U_{\text{ВХ}}(f)} = \frac{S_i Z_{\text{п}}}{\sqrt{1+a^2}} = \frac{S_i Z_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(2Q \frac{f - f_0}{f_0}\right)^2}}. \quad (2.3)$$

Резонансная частота  $f_0$ , резонансное сопротивление  $Z_p$  и добротность контура  $Q$  рассчитываются по формулам (1.1), (1.3а) Л.Р. № 1.

Модуль коэффициента передачи усилителя на резонансной частоте (резонансный коэффициент усиления)

$$K_p = K_{py}(f_0) = S_i Z_p = S_i Q_p. \quad (2.4)$$

Переходная характеристика резонансного усилителя без ОС

$$h_p(t) = S_i \rho e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t). \quad (2.5)$$

Постоянную времени усилителя ( $\tau = 1/\alpha$ ) и длительность переходного процесса ( $t_y$ ) можно определить по формулам (1.7), (1.8) Л.Р. № 1.

Положительная ОС *увеличивает*, а отрицательная *уменьшает* модуль коэффициента передачи основного четырёхполосника.

Для выявления влияния ОС на частотные и временные свойства резонансного усилителя можно заменить обратную связь на *вносимое в контур эквивалентное сопротивление*

$$R_{\text{вн}}^{\text{ОС}} = \pm R_{\Pi} K_p \beta. \quad (2.6)$$

Причем при отрицательной ОС в контур вносятся дополнительные потери:  $R_{\text{вн}}^{\text{ООС}} > 0$ ; при положительной ОС потери уменьшаются:  $R_{\text{вн}}^{\text{ПОС}} < 0$ .

Появление в контуре дополнительного сопротивления вызовет изменение добротности и коэффициента затухания:

$$Q_3^{\text{ОС}} = \frac{\rho}{R_{\Pi} \pm R_{\text{вн}}^{\text{ОС}}} = \frac{Q}{1 \pm K_p \beta}, \quad \alpha_3^{\text{ОС}} = \frac{R_{\Pi} \pm R_{\text{вн}}^{\text{ОС}}}{2L} = \alpha(1 \pm K_p \beta). \quad (2.7)$$

Подставляя значения эквивалентной добротности  $Q_3^{\text{ОС}}$  и эквивалентного коэффициента затухания  $\alpha_3^{\text{ОС}}$  в формулы (1.1)–(1.8), можно вычислить характеристики и параметры усилителя при ПОС и ООС.

Если при положительной ОС менять какой-либо из параметров системы (например  $\beta$ ), то можно добиться равенства между сопротивлением потерь и вносимым в контур отрицательным сопротивлением.

Такой режим работы усилителя и соответствующее ему значение переменного параметра ( $\beta_{кр}$ ) называются *критическими*.

$$R_{п} - R_{вн}^{ПОР} = R_{п}(1 - K_{р}\beta_{кр}) = 0 \rightarrow K_{р}\beta_{кр} = 1. \quad (2.8)$$

В критическом режиме  $|\dot{K}_{ОС}| \rightarrow \infty$ ,  $\alpha_{\beta}^{ПОР} \rightarrow 0$ , т. е. переходной процесс перестаёт затухать. Система теряет устойчивость (самовозбуждается).

## 2.4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Откройте диск "Education Argon" (D), папки "Радиотехника 2016", "Лаб.раб. 2", "Варианты" и файл "ОС\_В#.msl0". "#" – соответствует номеру вашего стенда.

*Указание.* По результатам эксперимента проводится расчёт и заполняется таблица, аналогичная табл. 2.3.

1. Для усилителя без ОС определите экспериментальные значения резонансной частоты, полосы пропускания и выходного напряжения ( $f_0$ ,  $2\Delta f_{0,7}$ ,  $U_{вых}$ ) при  $U_{вх} = 0,1$  В. Вычислите  $K_{р}$  и  $Q$ .

Ключами "Кл1", "Кл2" присоедините к входу исследуемой цепи источник синусоидального напряжения "V1". Ключ "Кл4" ("ОС") при этом должен быть разомкнут. Дважды кликните на значке источника. Откроется вкладка "AC\_POWER". В строке "Частота (F)" установите рассчитанную в предварительном задании резонансную частоту, а в строке "Voltage (RMS)" – действующее значение входного напряжения (0,1 В).

Активируйте мышкой источник "U<sub>0</sub>" и проверьте соответствие установленного смещения вашему варианту (знак «минус» не вводить).

Поменяйте в небольших пределах частоту генератора и оцените его настройку на резонансную частоту  $f_0$  по максимуму показаний вольтметра  $U_{вых}$ . Определите полосу  $2\Delta f_{0,7}$  по уровню 0,707 от этого максимума.

2. Снимите АЧХ  $(|\dot{K}(f)|)$  резонансного усилителя без ОС. Для этого откройте построитель частотных характеристик "ХВР1". Активируйте кнопку "Установки" ("Settings...") и в открывшемся окне уве-

личьте значение "Resolution Points" до 1000. Задайте режим работы "Модуль" ("Magnitude"). По горизонтальной и вертикальной оси выберите линейный масштаб ("Lin"). Установите начальное (" $I$ " =  $f_0 - 10$  кГц) и конечное (" $F$ " =  $f_0 + 10$  кГц) значение изменения частоты, а также начальное " $I$ " = 0 и конечное значение масштаба усиления (используйте данные предварительного задания).

АЧХ с помощью курсора перенесите и постройте на одном графике с рассчитанной в предварительном задании.

Определите по графику резонансную частоту, полосу пропускания и резонансный коэффициент усиления. Сравните с п. 1.

*Указание.* В случае разницы между  $K_p$  по п. 1 и 2 более чем на 10 % повторите настройку генератора в резонанс (п. 1).

3. Получите осциллограмму переходной характеристики резонансного усилителя без ОС. На вход схемы подайте последовательность прямоугольных импульсов от источника "V2". Активируйте мышкой вкладку источника "Value" и в соответствующих пунктах меню установите частоту повторения импульсов " $F$ " ~ 1 кГц, амплитуду " $V$ " = 1 В.

Активируйте осциллограф. Установите удобные для наблюдения масштабы по оси времени (Scale Timebase) и по оси напряжений (Scale Channel A, B). Зарисуйте полученные осциллограммы в отчёт. С помощью курсоров по уровню 0,05 от максимального значения определите экспериментальное время установления переходного процесса  $t_y$ .

Вычислите  $\tau$ .

Результаты занесите в таблицу и сравните их с расчётами.

*Указание.* При наложении переходных процессов друг на друга уменьшите частоту повторения импульсов источника "V2".

4. Найдите экспериментально критическое значение коэффициента обратной связи ( $\beta_{кр}^{экс}$ ). Отключите от усилителя входное напряжение. Замкните ключами "Кл3", "Кл4" положительную обратную связь. Установите в меню трансформатора рассчитанное в предварительном задании значение коэффициента ОС  $\beta = \beta_{кр}$ . Для этого дважды кликните левой клавишей мыши на изображении трансформатора и в открывшемся меню установите нужный "Coefficient of coupling" ("Коэффициент связи"). Активируйте осциллограф. Включите моделирование. Наблюдая за изменением показаний вольтметра " $U_{ОС}$ ", дождитесь



самовозбуждения усилителя, т. е. появления на экране осциллографа гармонических колебаний. Если колебаний нет, постепенно увеличивайте  $\beta$ , если есть – уменьшайте так, чтобы оказаться на границе потери устойчивости. Сравните экспериментальное и расчётное значение  $\beta_{кр}$ .

5. Изучите влияние обратной связи на частотные и временные характеристики резонансного усилителя. Для этого установите  $\beta = k\beta_{кр}^{экс}$  ( $k$  из табл. 2.1) и повторите пункты 1–4 практического задания при ПОС и ООС. Изобразите на одном графике АЧХ усилителя без ОС, с ООС и с ПОС.

6. Проверьте с помощью переходной характеристики найденное в п. 5 значение  $\beta_{кр}$ . Для этого, меняя  $\beta$ , добейтесь, чтобы вид осциллограммы переходного процесса соответствовал  $\alpha \approx 0$ .

## 2.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое обратная связь, положительная и отрицательная обратная связь?

2. Запишите выражение для коэффициента передачи четырёхполюсника с ОС, ПОС и ООС.

3. Как влияет ОС на амплитудно-частотную характеристику цепи?

4. Получите выражение для коэффициента усиления резонансного усилителя без обратной связи, с ПОС, с ООС.

5. Поясните влияние ОС на коэффициент усиления и полосу пропускания резонансного усилителя, а также на добротность контура.

6. Как влияет ОС на величину нелинейных искажений, на стабильность цепи (авторегулирующее действие ОС)?

7. Каково влияние ООС и ПОС на переходные характеристики резонансного усилителя?

8. Сравните время установления переходного процесса в усилителе без ОС, с ПОС и ООС.

9. Что такое критический режим работы резонансного усилителя, условия его возникновения?

10. Как выглядит переходная характеристика резонансного усилителя на границе устойчивости, в неустойчивом режиме?

# Лабораторная работа № 3

## НЕЛИНЕЙНОЕ РЕЗОНАНСНОЕ УСИЛЕНИЕ. УМНОЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ

### 3.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование нелинейного усиления колебаний и умножения частоты в резонансном усилителе на полевом транзисторе; определение основных параметров и характеристик.

### 3.2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО УСТРОЙСТВА

Схема исследуемого устройства показана на рис. 3.1. Параметры  $C$ ,  $L$ ,  $R_{\Pi}$  и  $R_{\Pi}$  заданы для каждого варианта в табл. 3.1. Вольтамперная характеристика (ВАХ) полевого транзистора приведена на рис. 3.2 и в табл. 3.2.

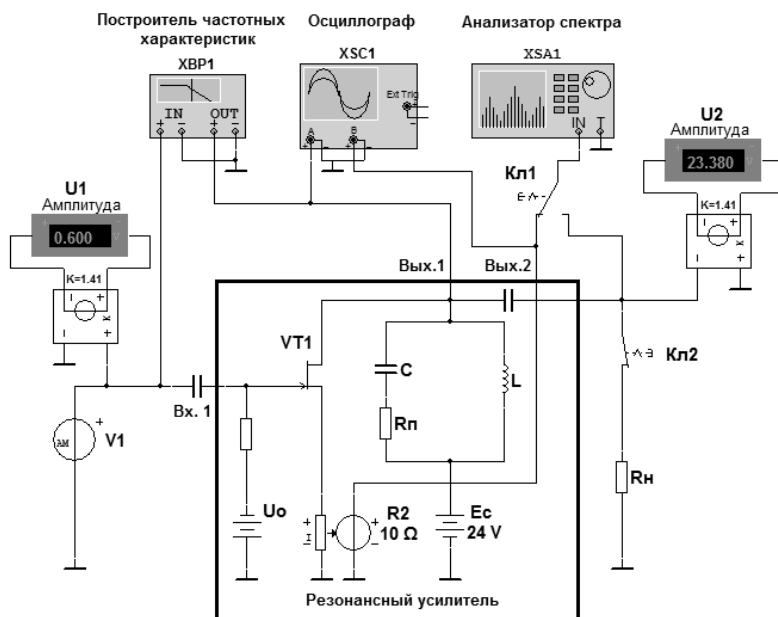


Рис. 3.1. Схема лабораторного устройства

Таблица 3.1

Параметры	Номер стенда									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C$ , нФ	10	9,2	8,5	7,8	7,3	6,8	6,4	6,0	5,8	5,5
$L$ , мГн	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$R_{п}$ , Ом	13,1	14	15,7	17,6	23	24	30	35	39	42
$R_{н}$ , кОм	11	9,5	9	8,6	9,8	8,8	9,8	10,1	10,4	9,9
$E_c$ , В	24									

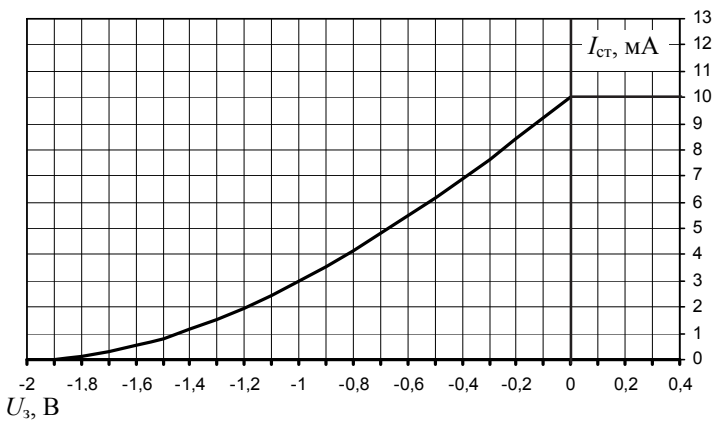


Рис. 3.2. ВАХ транзистора

Таблица 3.2

$U_3$ , В	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,3</b>	<b>-0,4</b>	<b>-0,5</b>	<b>-0,6</b>	<b>-0,7</b>	<b>-0,8</b>
$I_{ст}$ , мА	10,3	10,2	10,1	10	9,2	8,42	7,65	6,91	6,19	5,49	4,82	4,18
$U_3$ , В	<b>-0,9</b>	<b>-1</b>	<b>-1,1</b>	<b>-1,2</b>	<b>-1,3</b>	<b>-1,4</b>	<b>-1,5</b>	<b>-1,6</b>	<b>-1,7</b>	<b>-1,8</b>	<b>-1,9</b>	<b>-2,0</b>
$I_{ст}$ , мА	3,57	3	2,47	1,98	1,54	1,15	0,81	0,53	0,3	0,14	0,03	0

### 3.3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучите основные вопросы темы по конспекту лекций.

2. Рассчитайте резонансную частоту  $f_p$ , характеристическое сопротивление  $\rho$ , добротность  $Q$  и резонансное сопротивление  $Z_{pэ}$  контура усилителя с учётом сопротивления нагрузки  $R_n$ .

3. Рассчитайте среднюю крутизну  $S_{cp} = I_1 / U_1^{BX}$ , коэффициент резонансного усиления  $K_{pэ}$  и КПД усилителя  $\eta$  при подаче на вход:

$$U_{BX}(t) = U_1^{BX} \cos(2\pi f_p t).$$

Расчёт проведите для четырёх различных режимов работы транзистора, указанных в табл. 3.3.

Амплитуду тока первой гармоники рекомендуется определять по формуле трёх ординат, используя таблицу ВАХ 3.2.

Результаты расчётов по пунктам 2–3 занесите в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Режимы работы транзистора, В	$f_p$ , кГц	$\rho$ , Ом	$Q$	$2\Delta f_{0,7\%}$ , кГц	$Z_{pэ}$ , кОм	$S_{cp}$ , мА/В	$K_{pэ}$	$U_1^{ВЫХ}$ , В	$\eta$ , %
Режим кл. "А": $U_0 = -1,2$ ; $U_1^{BX} = 0,8$									
Режим кл. "AB": $U_0 = -1,2$ ; $U_1^{BX} = 1,2$									
Режим кл. "B": $U_0 = -1,8$ ; $U_1^{BX} = 1,9$									
Режим кл. "C": $U_0 = -2,3$ ; $U_1^{BX} = 2,5$									

4. Рассчитайте и постройте три амплитудные характеристики усилителя:

$$U_1^{\text{ВЫХ}} = f(U_1^{\text{ВХ}}) \Big|_{U_0 = \text{const}}$$

для трёх значений  $U_0 = -1,2; -1,8; -2,3 \text{ В}$ .

*Указание.* В каждом случае амплитуду входного напряжения  $U_1^{\text{ВХ}}$  меняйте с шагом 0,1 В относительно напряжения смещения  $U_0$  вплоть до амплитуды, при которой на характеристике появится участок ограничения.

5. Постройте график зависимости амплитуды напряжения второй гармоники на выходе удвоителя от напряжения смещения при постоянной амплитуде входного напряжения  $U_1^{\text{ВХ}} = \text{const} = 0,5 \text{ В}$ :

$$U_2^{\text{ВЫХ}} = f(U_0) \Big|_{U_1^{\text{ВХ}} = 0,5 \text{ В}}$$

На графике укажите оптимальное напряжение смещения  $U_0^{\text{ОПТ}}$ , соответствующее максимуму  $U_2^{\text{ВЫХ}}$ . Оцените возможный угол отсечки  $\theta$ .

### Расчётные соотношения

Резонансная частота  $f_p$ , характеристическое сопротивление  $\rho$ , добротность  $Q$ , резонансное сопротивление  $Z_p$  контура усилителя без учёта сопротивления нагрузки  $R_n$ :

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad \rho = \omega_p L = \frac{1}{\omega_p C} = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad Q = \frac{\rho}{R_n}, \quad Z_p = \rho Q = \frac{\rho^2}{R_n}.$$

Эквивалентные резонансное сопротивление  $Z_{p3}$  и добротность  $Q_3$  контура усилителя с учётом сопротивления нагрузки

$$Z_{p3} = \frac{Z_p R_n}{Z_p + R_n}, \quad Q_3 = \frac{Z_{p3}}{\rho}, \quad 2\Delta f_{0,7,3} = \frac{f_p}{Q_3}.$$

Коэффициент резонансного усиления  $K_{pz}$  и амплитуда выходного напряжения усилителя  $U_1^{B\Delta X}$  с учетом сопротивления нагрузки

$$K_{pz} = \frac{U_1^{B\Delta X}}{U_1^{BX}} = S_{cp} Z_{pz}, \quad U_1^{B\Delta X} = Z_{pz} I_1,$$

где  $I_1$  – амплитуда первой гармоники тока транзистора.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{кол}}{P_{пол}} = \frac{(I_1 U_1^{B\Delta X} / 2)}{I_0 E_c} = \frac{(I_1^2 Z_{pz} / 2)}{I_0 E_c},$$

где  $P_{кол}$  – колебательная (полезная) мощность на выходе усилителя;  $P_{пол}$  – полная мощность, отбираемая от источника  $E_c = 24$  В;  $I_0$  – постоянная составляющая тока транзистора.

Амплитуда напряжения на выходе удвоителя

$$U_2^{B\Delta X} = Z_{pz} I_2,$$

где  $I_2$  – амплитуда второй гармоники тока транзистора.

Постоянную составляющую, амплитуды первой и второй гармоник тока транзистора и среднюю крутизну можно определить по ВАХ методом трёх ординат.

$$I_0 = \frac{i_{\max} + i_{\min} + 2i_0}{4}, \quad I_1 = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{2}, \quad I_2 = \frac{i_{\max} + i_{\min} - 2i_0}{4},$$

$$S_{cp} = \frac{I_1}{U_m^{BX}} = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{2U_m^{BX}},$$

где  $i_0$ ,  $i_{\max}$  и  $i_{\min}$  – значения тока стока в точках ВАХ  $U_0$  и  $U_0 \pm U_1^{BX}$  соответственно.

Для расчётов рекомендуется использовать табл. 3.2.

Угол отсечки тока транзистора

$$\theta = \arccos[(U_{отс} - U_0) / U_m],$$

где  $U_{отс}$  – напряжение отсечки ВАХ транзистора при кусочно-линейной аппроксимации.

Оптимальный угол отсечки умножителя частоты для случая, когда амплитуда входного сигнала постоянна ( $U_1^{\text{вх}} = \text{const}$ ), а максимальное значение тока  $n$ -й гармоники обеспечивается выбором соответствующего напряжения смещения ( $U_0 = \text{vario}$ ),

$$\theta_{\text{опт } \gamma} = 180^\circ / n, \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

### 3.4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Откройте диск "Education Argon" (D), папки "Радиотехника 2016", "Лаб.раб. 3", "Варианты" и файл "Усил\_умн\_В#.ms10". "#" – соответствует номеру вашего стенда.

*Указание.* По результатам эксперимента проводится расчёт и заполняется таблица, аналогичная табл. 3.3.

1. Проверьте соответствие параметров элементов схемы параметрам элементов предварительного задания.

*Указание.* Знак «минус» во вкладке источника смещения не вводить, так как минус задан соответствующим подключением батареи.

2. При подключенном сопротивлении нагрузки ( $R_n$ ) в линейном режиме ( $U_0 = 1 \text{ В}$ ,  $U_1^{\text{вх}} = 0,2 \text{ В}$ ) определите коэффициент усиления  $K_{\text{рз}}$ , резонансную частоту  $f_p$  и полосу пропускания  $2\Delta f_{0,7,\text{э}}$  контура усилителя при подаче на его вход "Вх.1" гармонического колебания на резонансной частоте от генератора "V1". Для этого воспользуйтесь анализатором частотных характеристик "ХВР1".

Вычислите амплитуду первой гармоники тока транзистора  $I_1$ . Для этого активируйте анализатор спектра "ХСА1". Получите спектр напряжения на сопротивлении  $R_2 = 10 \Omega$  ("Вых.2"). Измерьте маркёром амплитуду напряжения первой гармоники спектра  $U_1^{R_2}$  и рассчитайте амплитуду тока  $I_1 = U_1^{R_2} / R_2$ .

По полученным экспериментальным данным ( $f_p$ ,  $2\Delta f_{0,7,\text{э}}$ ,  $K_{\text{рз}}$ ,  $I_1$ ) вычислите эквивалентную добротность и резонансное сопротивление ( $Q_3$ ,  $Z_{\text{рз}}$ ).

3. Снимите данные и постройте графики трёх амплитудных характеристик усилителя

$$U_1^{\text{ВЫХ}} = f(U_1^{\text{ВХ}}) \Big|_{U_0 = \text{const}} \quad \text{при } U_0 = -1,2; -1,8; -2,3 \text{ В.}$$

Шаг изменения амплитуды входного напряжения  $(\Delta U_1^{\text{ВХ}})$  для  $U_0 = -1,2 \text{ В} \rightarrow \Delta U_1^{\text{ВХ}} = 0,1 \text{ В}$ ; для  $U_0 = -1,8$  и  $-2,3 \text{ В} \rightarrow \Delta U_1^{\text{ВХ}} = 0,2 \text{ В}$ .

*Указание.* По возможности совместите экспериментальные и теоретические кривые.

4. Определите экспериментальные значения КПД и резонансного коэффициента передачи усилителя для режимов работы транзистора "А", "АВ", "В" и "С". Параметры режимов указаны в табл. 3.3.

$$\eta = \frac{I_1 U_1^{\text{ВЫХ}}}{I_0 E_c}, \quad K_{\text{рз}} = \frac{U_1^{\text{ВЫХ}}}{U_1^{\text{ВХ}}}, \quad (3.1)$$

$I_1$  и  $I_0$  вычислите по спектру напряжения на сопротивлении  $R_2$  (аналогично п. 2 практического задания).  $U_1^{\text{ВХ}}$ ,  $U_1^{\text{ВЫХ}}$  – показания соответствующих вольтметров.

**Внимание!** В формуле КПД (3.1) учтено, что анализатор спектра "XSA1" **удваивает значение тока**  $I_0$ .

Сравните полученные результаты с результатами предварительного задания.

5. В режиме класса "В" зарисуйте спектр и осциллограммы напряжения на "Вых.1" и "Вых.2". Укажите на спектральной диаграмме величины частот и амплитуд спектральных составляющих. Объясните разницу.

6. Переведите усилитель в режим удвоения частоты. Для этого установите частоту колебаний генератора "V1" равной половине резонансной частоты контура, что будет соответствовать настройке контура на вторую гармонику входного напряжения.

Используя анализатор спектра "XSA1", снимите зависимость амплитуды напряжения удвоенной частоты  $U_2^{\text{ВЫХ}}$  на выходе "Вых.1" от напряжения смещения  $U_0$ . Амплитуда входного напряжения при этом



$U_1^{\text{ВХ}} = \text{const} = 0,5 \text{ В}$ . Смещение  $U_0$  меняйте от 0,5 В до полного записания транзистора (шаг 0,1 или 0,2 В).

Одновременно с помощью осциллографа "XSC1" наблюдайте изменение формы напряжения на "Вых.1" и "Вых.2". Зарисуйте осциллограммы для  $U_0 = 0,5 \text{ В}$  и  $U_0 = U_0^{\text{ОПТ}}$ .

Постройте график  $U_2^{\text{ВЫХ}} = f(U_0)|_{U_1^{\text{ВХ}} = 0,5 \text{ В}}$ . На графике укажите оптимальное экспериментальное значение напряжение смещения  $U_0^{\text{ОПТ}}$ , сравните его с расчётным.

### 3.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы достоинства и недостатки линейного режима усиления колебаний?

2. Поясните принцип работы нелинейного резонансного усилителя.

3. Изобразите временные диаграммы тока транзистора и выходного напряжения при различных смещениях на затворе.

4. Что такое угол отсечки тока транзистора и как он зависит от напряжения смещения и амплитуды входного напряжения?

5. Как вычислить амплитуду тока первой гармоники по вольт-амперной характеристике нелинейного элемента?

6. Что такое средняя крутизна и как она зависит от напряжения смещения?

7. Как влияет напряжение смещения на коэффициент усиления (передачи) усилителя на полевом транзисторе?

8. Дайте определение колебательной характеристике резонансного усилителя. Как влияет напряжение смещения на эту характеристику?

9. Почему в нелинейном режиме усиления происходит повышение КПД?

10. Что такое режим умножения частоты? Поясните принцип работы удвоителя частоты на полевом транзисторе.

11. Изобразите временные диаграммы тока полевого транзистора и напряжения на его затворе, стоке и истоке в режиме удвоения частоты.

12. Почему не применяются высокие кратности умножения частоты в одном каскаде?

# Лабораторная работа № 4

## АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ СМЕЩЕНИЯ

### 4.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование процесса амплитудной модуляции изменением смещения, снятие модуляционной характеристики, оценка возможных линейных и нелинейных искажений огибающей.

### 4.2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО УСТРОЙСТВА

Схема амплитудного модулятора показана на рис. 4.1.

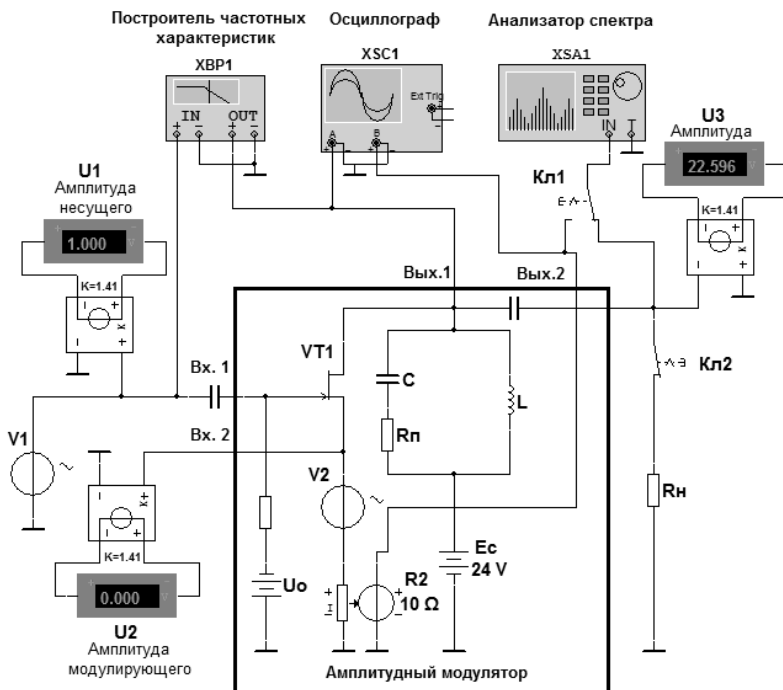


Рис. 4.1. Схема лабораторного устройства

Она отличается от схемы резонансного усилителя (Л.Р. № 3, рис. 3.1) введением дополнительного генератора "V2", который служит источником низкочастотного управляющего (модулирующего) напряжения  $U_2 = U_\Omega \cos(\Omega t) = U_\Omega \cos(2\pi Ft)$ . При этом вольтметр "U2" измеряет амплитуду  $U_\Omega$  этого напряжения. Параметры резонансного контура  $C, L, R_{\Pi}$  и  $R_H$  заданы для каждого варианта в табл. 4.1.

На рис. 4.2 и в табл. 4.2 дана вольт-амперная характеристика полевого транзистора.

Таблица 4.1

Параметры	Номер стенда									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C$ , нФ	10	9,2	8,5	7,8	7,3	6,8	6,4	6,0	5,8	5,5
$L$ , мГн	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$R_{\Pi}$ , Ом	13,1	14	15,7	17,6	23	24	30	35	39	42
$R_H$ , кОм	11	9,5	9	8,6	9,8	8,8	9,8	10,1	10,4	9,9
$E_c$ , В	24									
$U_m^{BX}$ , В	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,1

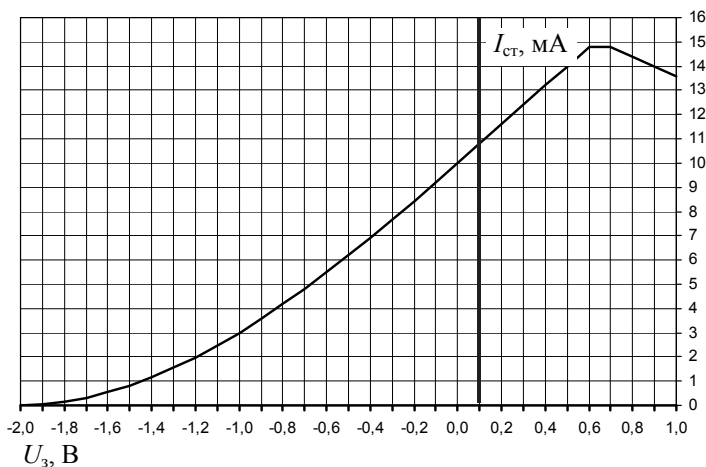


Рис. 4.2. ВАХ транзистора

Таблица 4.2

$U_3$ , В	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5
$I_{сг}$ , мА	14	14,4	14,8	14,8	14	13,2	12,4	11,6	10,8	10	9,2	8,42	7,65	6,91	6,19
$U_3$ , В	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-1	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6	-1,7	-1,8	-1,9	-2
$I_{сг}$ , мА	5,49	4,82	4,18	3,57	3	2,47	1,98	1,54	1,15	0,81	0,53	0,3	0,14	0,03	0

### 4.3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучите основные вопросы темы по конспекту лекций.
2. Рассчитайте (или воспользуйтесь результатами расчётов предварительного задания Л.Р. № 3) резонансную частоту  $f_p$ , добротность  $Q_3$ , полосу пропускания  $2\Delta f_{0,7\%}$  и резонансное сопротивление  $Z_{p3}$  контура усилителя с учётом сопротивления нагрузки  $R_n$ .
3. Постройте статическую модуляционную характеристику

$$U_1^{\text{ВЫХ}} = I_1 Z_{p3} = f(U_0) \Big|_{U_m^{\text{ВХ}} = \text{const}}.$$

На входе действует несущее колебание  $U_{\text{вх1}} = U_m^{\text{ВХ}} \cos(2\pi f_n t)$  на резонансной частоте ( $f_n = f_0$ ). Его амплитуду  $U_m^{\text{ВХ}}$  возьмите из табл. 4.1.

*Указание.* Амплитуду тока стока  $I_1$  рассчитывайте по таблице ВАХ методом трех ординат. Напряжение смещения  $U_0$  изменяйте с шагом 0,1 В от 0 до значения, при котором ток  $I_1$  станет равным нулю.

*Внимание!* Статическая модуляционная характеристика для тока совпадает по форме со статической модуляционной характеристикой для напряжения только в идеальном случае, когда  $F \ll \Delta f|_{0,7}$  т. е.  $Z_k(f) = Z_{p3} = \text{const}$ .

4. По полученной в п. 3 характеристике определите рабочую точку модулятора (рабочее смещение)  $U_0^{\text{РТ}}$ , наибольшее значение амплитуды модулирующего напряжения  $U_{\Omega}^{\text{max}}$  и коэффициент модуляции  $M_{\text{max}}$ , при которых модуляция будет неискажённой.

5. Определите частоту модуляции  $F_{0,7}$ , превышение которой приведет к уменьшению рассчитанного по статической модуляционной характеристике коэффициента модуляции  $M_{\max}$  на 30 %.

Результаты расчётов занесите в табл. 4.3.

Т а б л и ц а 4.3

$f_p$ , кГц	$Q_3$	$2\Delta f_{0,7,3}$ , кГц	$Z_{pэ}$ , кОм	$F_{0,7}$ , кГц	$U_0^{PT}$ , В	$U_{\Omega}^{\max}$ , В	$M_{\max}$ , %	$U_{\Omega}^{пм}$ , В	$k_{н1}$ , %	$k_{н2}$ , %
								Только экспериментальные значения	Только экспериментальные значения	Только экспериментальные значения

6. Постройте динамическую модуляционную характеристику

$$M = f(U_{\Omega})|_{U_0^{PT} = \text{const}}.$$

Для этого воспользуйтесь статической модуляционной характеристикой и найденным в п. 4 рабочим смещением  $U_0^{PT}$ . Шаг изменения амплитуды управляющего напряжения  $\Delta U_{\Omega} = 0,1$  или  $0,2$  В.  $U_{\Omega}$  меняйте до устойчивого прекращения роста  $M$ .

### Пояснения и расчётные соотношения

К транзистору (нелинейному элементу (НЭ)) прикладывают высокочастотное (ВЧ) несущее колебание  $U_m^{\text{ВЧ}} \cos(\omega_0 t)$ , смещение  $U_0$  и низкочастотный модулирующий сигнал  $U_{\Omega} \cos(\Omega t)$ , где  $\omega_0 = 2\pi f_0 \gg \Omega = 2\pi F$ .

$$U_{\text{НЭ}} = u(t) = U_m^{\text{ВЧ}} \cos \omega_0 t + U_0 + U_{\Omega} \cos \Omega t = U_m^{\text{ВЧ}} \cos \omega_0 t + U_0(t).$$

Под  $U_0(t)$  можно понимать медленно меняющееся во времени по модулирующему закону напряжение смещения, которое приводит к из-

менению крутизны транзистора и, следовательно, к изменению амплитуды выходного ВЧ-сигнала.

Рабочий участок на ВАХ транзистора, превращающий его в модулятор, выбирают по *статической модуляционной характеристике* (рис. 4.3, а). Она представляет собой зависимость амплитуды первой гармоники тока  $I_1(U_0)$  или напряжения  $U_1^{\text{ВЫХ}}(U_0) = I_1(U_0)Z_{\text{пэ}}$  на выходе модулятора от напряжения смещения  $U_0$ . При этом на вход подается ВЧ несущее колебание с постоянной амплитудой ( $U_m^{\text{ВХ}} = \text{const}$ ). Управляющее напряжение не подается ( $U_\Omega = 0$ ).

В процессе модуляции могут появиться нелинейные искажения огибающей несущего колебания. Для их предотвращения на статической модуляционной характеристике выбирается *близкий к линейному* рабочий участок:  $(U_0^{\min}, U_1^{\min})$ ,  $(U_0^{\max}, U_1^{\max})$ . Его середина (рабочая точка (РТ)) соответствует рабочему напряжению смещения транзистора  $(U_0^{\text{РТ}}, U_1^{\text{РТ}})$ .

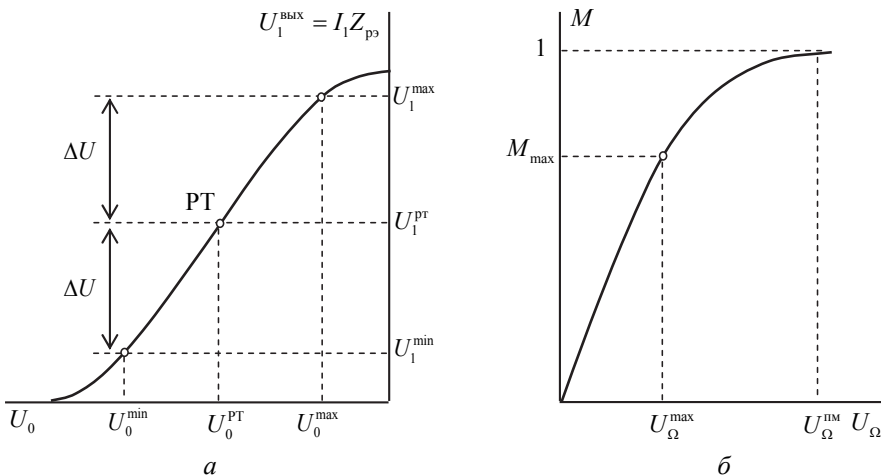


Рис. 4.3. Статическая (а) и динамическая (б) модуляционные характеристики

Амплитуда управляющего напряжения  $U_{\Omega}^{\max}$ , обеспечивающая максимально возможный коэффициент неискажённой модуляции

$$M_{\max} = \frac{\Delta U}{U_1^{\text{PT}}} = \frac{(U_1^{\max} - U_1^{\min})}{(U_1^{\max} + U_1^{\min})},$$

равна половине величины рабочего участка  $U_{\Omega}^{\max} = (U_0^{\max} - U_0^{\min})/2$ .

Выходное напряжение модулятора рассчитывается по формуле

$$U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{вых}} [1 + M_{\text{вых}} \cos(\Omega t + \varphi)] \cos \omega_0 t,$$

где  $U_{\text{вых}} = I_1 Z_{\text{рз}}$ ,  $M_{\text{вых}} = M / \sqrt{1 + a^2}$ ,  $\varphi = \arctg(-a)$ ,  $a \approx 2Q_3 \frac{F}{f_0}$  –

обобщенная расстройка на частоте  $F$  модулирующего колебания.

Изменение глубины модуляции на выходе (на контуре)  $M_{\text{вых}}$  по сравнению с глубиной модуляции  $M_{\max}$ , вычисленной по статической модуляционной характеристике, а также запаздывание огибающей на угол  $\varphi$  – это *линейные искажения*. Они связаны с зависимостью сопротивления контура от частоты и уменьшаются со снижением  $F$  и  $Q_3$ .

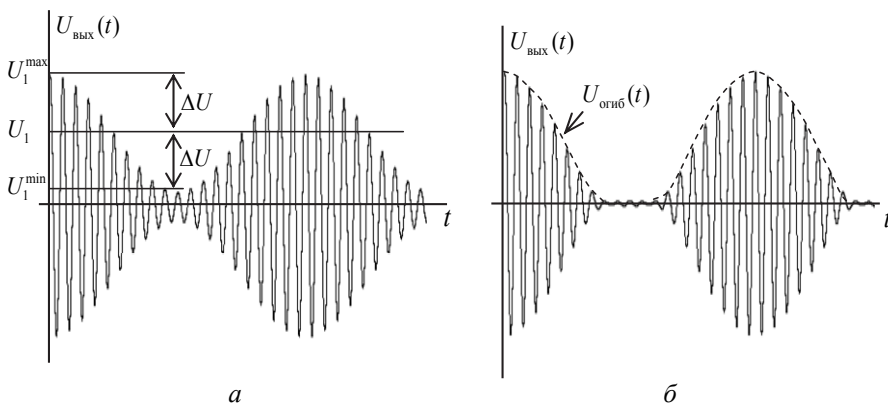


Рис. 4.4. Однотональные АМ-колебания без искажения (а) и с искажением (б)

Частота модуляции  $F_{0,7}$ , превышение которой приводит к уменьшению  $M_{\text{вых}}$  на 30 %, определяется из равенства

$$F_{0,7} = \Delta f_{0,7,3}.$$

*Динамическая модуляционная характеристика* (рис. 4.3, б) – это зависимость коэффициента модуляции от амплитуды модулирующего сигнала  $U_{\Omega}$  при постоянном смещении  $U_0^{\text{PT}}$  и амплитуде ВЧ-колебаний  $U_m^{\text{BX}}$ .

$$M = f(U_{\Omega}), \quad U_0^{\text{PT}} = \text{const}, \quad U_m^{\text{BX}} = \text{const}, \quad \Omega = \text{const}.$$

Если амплитуда управляющего напряжения больше чем  $U_{\Omega}^{\text{max}}$ , то форма огибающей  $U_{\text{огиб}}(t)$  искажается (рис. 4.4, б). Такой режим называется *перемодуляцией*, а связанные с ним искажения – это *нелинейные искажения*.

Количественно степень нелинейных искажений огибающей напряжения описывается коэффициентом нелинейных искажений

$$k_{\text{ни}} = \frac{\sqrt{U_{(f_{\text{H}} \pm 2F)}^2 + \dots + U_{(f_{\text{H}} \pm nF)}^2}}{U_{(f_{\text{H}} \pm F)}},$$

где  $U_{(f_{\text{H}} \pm F)}$ ,  $U_{(f_{\text{H}} \pm 2F)}$ , ...,  $U_{(f_{\text{H}} \pm nF)}$  – амплитуды гармонических составляющих спектра напряжения любой из боковых полос АМ колебания (рис. 4.5, б).

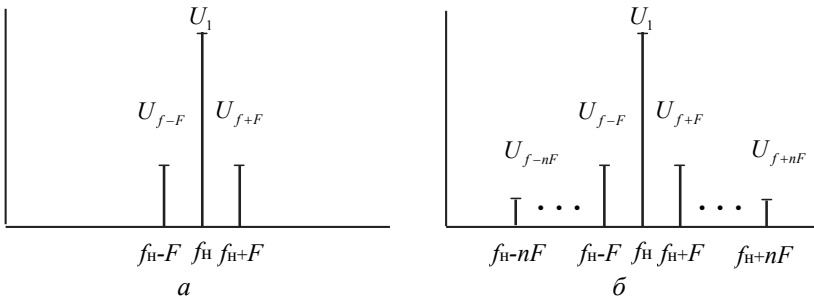


Рис. 4.5. Спектр однотоновых неискаженных АМК (а) и спектр однотоновых АМК при нелинейных искажениях огибающей (б)



#### 4.4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Откройте диск "Education Argon" (D), папки "Радиотехника 2016", "Лаб.раб. 4", "Варианты" и файл "Модуляция\_V#.ms10". "#" – соответствует номеру вашего стенда.

*Указания.* По результатам эксперимента заполняется таблица аналогичная табл. 4.3. Все измерения проводятся при подключённом  $R_n$ .

1. Проверьте соответствие параметров элементов нагруженной схемы и параметров элементов предварительного задания.

2. Измерьте резонансную частоту  $f_p$  и полосу пропускания  $2\Delta f_{0,7,\alpha}$  контура модулятора. Для этого воспользуйтесь анализатором частотных характеристик ХВР1. Измерения проводите в линейном режиме работы транзистора ( $U_0 = -1$  В и  $U_m^{\text{BX}} = 0,1$  В). Амплитуда управляющего напряжения  $U_\Omega = 0$ .

$U_m^{\text{BX}}$  следует устанавливать во вкладке генератора "V1", как в строке "Напряжение (Pk)", так и в строке анализа на переменном токе.  $U_\Omega$  устанавливается во вкладке генератора "V2".

Вычислите экспериментальную эквивалентную добротность  $Q_3$ . Сравните полученные результаты с предварительным расчетом.

2. Снимите данные и постройте статическую модуляционную характеристику

$$U_1^{\text{ВЫХ}} = f(U_0) \Big|_{U_m^{\text{BX}} = \text{const}}.$$

Для этого на вход "Вх.1" от генератора "V1" подайте несущее колебание резонансной частоты  $f_n = f_0$  с амплитудой  $U_m^{\text{BX}}$ , соответствующей предварительному заданию. Амплитуда управляющего напряжения генератора "V2"  $U_\Omega = 0$ . Смещение  $U_0$  изменяйте с шагом  $\Delta U_0 = 0,1$  В.

Результаты занесите в таблицу и постройте график, совместив его с графиком предварительного задания.

Выберите рабочую точку  $U_0^{\text{PT}}$  на середине максимально возможно линейного участка модуляционной характеристики (допускается некоторое –10 %-е отклонение от линейности). Отметьте на графике

максимальную амплитуду модулирующего сигнала  $U_{\Omega}^{\max}$  и определите максимальный коэффициент модуляции  $M_{\max}$ , при котором модуляция будет без нелинейных искажений огибающей.

3. Установите напряжение смещения  $U_0 = U_0^{\text{PT}}$ , амплитуду и частоту управляющего напряжения генератора "V2":  $U_{\Omega} = U_{\Omega}^{\max}$ ,  $F = F_{0,7} = \Delta f_{0,7,3}$ .

Зарисуйте осциллограмму и спектрограмму полученных на выходе "Вых.1" амплитудно-модулированных колебаний. Рассчитайте по ним значение коэффициента модуляции по осциллограмме и спектрограмме ( $M_1^{\text{осц}}$  и  $M_1^{\text{сп}}$ ).

Указание. Коэффициент  $M_1^{\text{осц}}$  рассчитывается через  $U_1^{\max}$ ,  $U_1^{\min}$  (рис. 4.4, а); коэффициент  $M_1^{\text{сп}}$  (рис. 4.5, а) – по формуле  $M_1^{\text{сп}} = \frac{(U_{f-F} + U_{f+F})}{U_1}$ .

Зарисуйте спектрограмму амплитудно-модулированных колебаний на выходе "Вых.2". Рассчитайте значение коэффициента модуляции  $M_2^{\text{сп}}$ . Сравните  $M_1$ ,  $M_2^{\text{сп}}$  и  $M_{\max}$ . Объясните результат.

4. Снимите данные и постройте динамическую модуляционную характеристику

$$M = f(U_{\Omega}) \Big|_{U_0^{\text{PT}} = \text{const}}.$$

$U_{\Omega}$  меняйте с шагом  $\Delta U_{\Omega} \approx 0,2$  В до устойчивого прекращения изменения  $M$ . Соответствующее этому значение амплитуды  $U_{\Omega}^{\text{пм}}$  занесите в таблицу. Одновременно по осциллографу следите за формой изменения колебаний на выходе "Вых.1".

5. Зарисуйте осциллограммы и спектрограммы АМ колебаний на "Вых.1" для следующих случаев:

- а)  $U_0 = U_{\text{PT}}$ ;  $U_{\Omega} = U_{\Omega}^{\max}$  – режим неискажённой АМ;
- б)  $U_0 = U_0^{\min}$ ;  $U_{\Omega} = U_{\Omega}^{\max}$  – перемодуляция «снизу»;
- в)  $U_0 = U_0^{\max}$ ;  $U_{\Omega} = U_{\Omega}^{\max}$  – перемодуляция «сверху»;
- г)  $U_0 = U_{\text{PT}}$ ;  $U_{\Omega} = U_{\Omega}^{\text{пм}}$  – перемодуляция «сверху» и «снизу».

6. Для п. 5, г вычислите по спектрограммам коэффициент нелинейных искажений на выходах "Вых.1" ( $k_{н1}$ ) и "Вых.2" ( $k_{н2}$ ). Объясните разницу.

#### 4.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните физические процессы при модуляции смещением. Почему для получения АМ режим работы усилителя должен быть нелинейным?

2. Что такое нелинейные искажения при модуляции? Требования к характеристике НЭ.

3. Что такое линейные искажения при АМ и каковы требования к нагрузке (колебательному контуру)?

4. Как и почему влияет добротность контура модулятора на глубину модуляции на нем? Роль нагрузки ( $R_n$ ).

5. Какова зависимость коэффициента модуляции от частоты модулирующего напряжения?

6. Что такое статическая модуляционная характеристика? Ее назначение.

7. Как влияет амплитуда несущего колебания на форму статической модуляционной характеристики?

8. Каковы требования к режиму работы модулятора в случае большого по амплитуде несущего колебания (когда используется кусочно-линейная аппроксимация ВАХ НЭ)?

9. Как влияет на форму АМК изменение напряжения смещения полевого транзистора?

10. Дайте определение динамической модуляционной характеристики.

11. Изобразите и поясните зависимость коэффициента модуляции напряжения на контуре от амплитуды модулирующего сигнала.

12. Поясните зависимость коэффициента модуляции напряжения на контуре от частоты модулирующего сигнала.

13. Что такое нелинейные искажения огибающей АМК; как оценить их величину?

14. Как влияет добротность контура на коэффициент нелинейных искажений огибающей напряжения АМК?

# Лабораторная работа № 5

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ

### 5.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение физических процессов в диодном детекторе при воздействии АМ-колебаний и последовательности радиоимпульсов, снятие детекторной характеристики и осциллограмм напряжений в различных точках схемы при различных сигналах и параметрах нагрузки.

### 5.2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО УСТРОЙСТВА

Исследование детектирования АМ-сигналов проводится на последовательном диодном детекторе, схема которого показана на рис. 5.1.

Вольт-амперная характеристика диода задана своими значениями в табл. 5.1, а график приведен на рис. 5.2: в укрупненном (а), среднем (б) и мелком (в) масштабе.

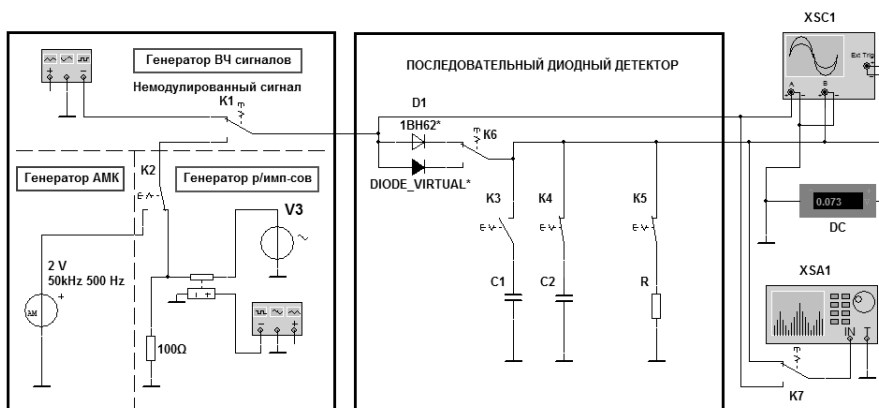


Рис. 5.1. Схема лабораторного устройства

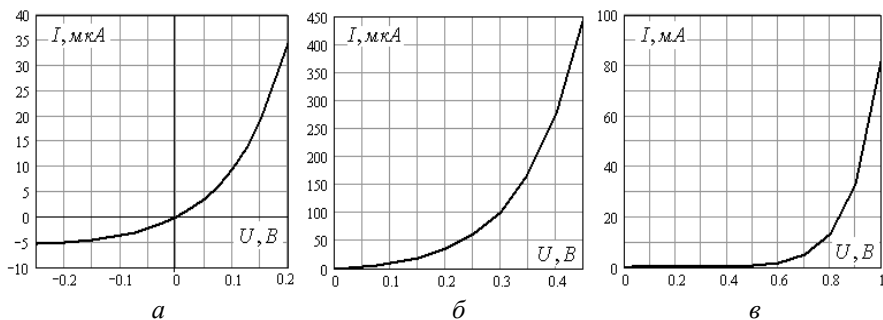


Рис. 5.2. Вольт-амперная характеристика диода

Таблица 5.1

$U, \text{В}$	-0,5	-0,3	-0,25	-0,2	-0,15	-0,1	-0,075	-0,05	-0,025	0
$I, \text{мкА}$	-5,8	-5,6	-5,4	-5,1	-4,5	-3,85	-3,1	-2,3	-1,3	0
$U, \text{В}$	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4
$I, \text{мкА}$	1,6	3,7	6,3	9,6	13,8	19,1	34,6	59,5	99,8	270
$U, \text{В}$	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$I, \text{мА}$	0,44	0,71	1,16	1,87	3,03	4,89	7,9	12,75	20,55	33,1

### 5.3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучите основные вопросы темы по конспекту лекций. Для расчёта по всем пунктам задания используйте данные, приведённые в табл. 5.1 и 5.2.

2. По параметрам  $U_A$  и  $R$  определите: угол отсечки  $\theta$ , коэффициент передачи  $K$  диодного детектора и входное напряжение  $U_m$ , соответствующее напряжению  $U_A$  на открытом диоде. На детектор действует немодулированное высокочастотное колебание.

Таблица 5.2

Параметры	Номер стенда									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_A$ , В	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$R$ , кОм	50	35	25	30	20	15	10	10	7	4,8
$C_1$ , нФ	2	3	5	5	7	7	10	10	20	20
$C_2$ , нФ	10	12	15	15	20	25	30	30	60	60
$R_{обр}$ , кОм	90	93	100	150	160	170	190	260	300	300

### Пояснения и расчётные соотношения

На вход детектора подается напряжение  $u_{вх}(t) = U_m \cos \omega_0 t$ . Напряжение на выходе в этом случае  $U_{вых} = U_0 = I_0 R = \text{const}$ , т. е. детектор представляет собой выпрямитель.

Напряжение на диоде  $u_d(t) = u_{вх}(t) - u_{вых}(t) = U_m \cos \omega_0 t - U_0$ . **Важно:** выходное напряжение ( $-U_0$ ) запирает диод, играя роль авто-смещения.

ВАХ диода в режиме «большого сигнала» ( $U_A \geq 0,45$  В) можно аппроксимировать кусочно-линейной зависимостью (рис. 5.3):

$$I = \begin{cases} SU, & U > 0, \\ 0, & U < 0, \end{cases}$$

где  $S = I_A / U_A$  – крутизна аппроксимированной характеристики;  $U_A$  – напряжение на открытом диоде, заданное для каждой бригады в таблице заданий;  $I_A$  – значение тока из табл. 5.1, соответствующее напряжению  $U_A$ .

Ток диода имеет вид последовательности импульсов (рис. 5.3). Угол отсечки тока  $\theta$  и коэффициент передачи  $K$  детектора можно вычислить по формулам:

$$\text{tg}(\theta) - \theta = \pi / (SR_s) \quad (5.1a)$$

или при  $SR_3 > 60$

$$\theta \approx \sqrt[3]{3\pi / (SR_3)}; \quad (5.16)$$

$$K = U_{\text{вых}} / U_m = U_0 / U_m = \cos \theta, \quad (5.1в)$$

где  $R_3 = RR_{\text{обр}} / (R + R_{\text{обр}})$  – эквивалентное сопротивление соединенных параллельно сопротивлений фильтра и обратно смещенного диода;  $R_{\text{обр}}$  задано в табл. 5.2.

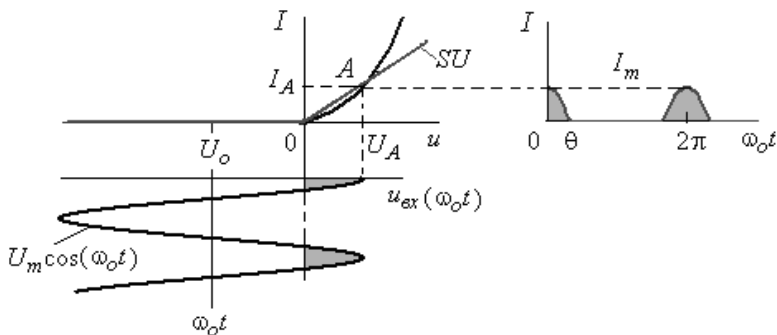


Рис. 5.3. Пояснение режима функционирования диода

Амплитуда напряжения на открытом диоде  $U_A$  выражается через полученный коэффициент передачи  $K$  и амплитуду  $U_m$  входного сигнала:  $U_d = U_A = U_m - U_{\text{вых}} = U_m(1 - K)$ . Отсюда амплитуда  $U_m$  входного напряжения

$$U_m = U_A / (1 - K) = U_{\text{max}}. \quad (5.2)$$

3. По заданным значениям параметров ( $C$  и  $R$ ) и несущей частоты ( $f_0 = 50$  кГц) определите граничную частоту  $F_{\text{гр}}$  и, следовательно, полосу пропускания  $\Delta f_{0,7} = F_{\text{гр}}$  фильтра нижних частот, а также (ориентировочно) значение модулирующей частоты  $F_0$ , для которой выполняются условия неискаженного детектирования

$$F_0 < F_{\text{гр}}/2; \quad F_{\text{гр}} = 1/(2\pi\tau); \quad (5.3a)$$

$$F_0 \ll f_0. \quad (5.36)$$

Это следует сделать для  $\tau_1 = RC_1$  и  $\tau_2 = RC_2$ .

4. Постройте спектральные диаграммы для входного и выходного сигналов, если на вход детектора ( $\tau_1 = RC_1$ ) подано АМК:

$$u(t) = U_{\max} [1 + M \cos(2\pi F_0 t)] \cos(2\pi f_0 t), \quad (5.4)$$

где  $U_{\max}$  найдено по формуле (5.2) в п. 2,  $M = 1$ .

5. Качественно изобразите радиоимпульс с прямоугольной огибающей и (для  $C_1$  и  $C_2$ ) результат его детектирования – видеоимпульс. Вычислите длительности заднего фронта видеоимпульса ( $\tau_{зф1}$ ,  $\tau_{зф2}$ ).

*Пояснение.* Длительность заднего фронта  $\tau_{зф} = 3 \cdot CR_3$  определяется рядом конденсатора через  $R_3$ .

Результаты расчётов по пунктам 1–5 занесите в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Результаты	$\theta^\circ$ , град.	$K_1$	$K_2$	$U_{\max}$ , В	$\tau_1$ , мс	$\tau_2$ , мс	$F_{01}$ , Гц	$F_{02}$ , кГц	$\tau_{зф1}$ , мс	$\tau_{зф2}$ , мс
Расчёт										
Эксперимент										

## 5.4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Откройте диск "Education Argon"(D), папки "Радиотехника 2016", "Лаб.раб. 5", "Варианты" и файл "Детектор\_В#.ms10". "#" – соответствует номеру вашего стенда.

1. Проверьте соответствие параметров элементов загруженной схемы параметрам элементов предварительного задания. Подключите (если не подключен) диод D1 1ВН62.



2. Измерьте выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  и определите коэффициент передачи  $K$  для рассчитанного в предварительном задании значения амплитуды входного немодулированного колебания  $U_m = U_{\text{max}}$ .

*Указание.* На вход детектора ключом "К2" подайте немодулированный ВЧ гармонический сигнал. Активируйте вкладку генератора. Проверьте форму, частоту ( $f_0 = 50$  кГц) и амплитуду ( $U = U_{\text{max}}$  ["Vp"]) выходного сигнала, где ["Vp"] – «пиковые» или «амплитудные» вольты.

**Внимание!** Значение амплитуды необходимо вводить с точностью до десятых.

Измерения проведите для  $C_2$  и  $C_1$ . Результаты занесите в табл. 5.3 и сравните с предварительным расчётом.

3. Снимите детекторную характеристику детектора

$$U_{\text{вых}} = \varphi(U_m).$$

Измерения проведите для  $C_1 + C_2$ .

*Указание.* Тщательно исследуйте начальный участок характеристики, т. е. от нуля до 0,3 В входное напряжение  $U_m$  изменяйте с шагом 25 мВ; далее до  $U_m = 1$  В шаг может быть 0,1 В и, наконец, до  $U_m = U_{\text{max}}$  с шагом 0,5 В.

Результаты занесите в таблицу и постройте два графика: первый график с укрупненным масштабом начального участка характеристики (т. е.  $U_m$  от нуля и до 0,3 В), второй – для всего диапазона значений  $U_m$ . Обозначьте на графиках «квадратичную» и «линейную» области детектирования.

Постройте два графика зависимости коэффициента передачи детектора от амплитуды входного сигнала

$$K = U_{\text{вых}} / U_m = U_0 / U_m$$

для  $0 \leq U_m \leq 0,3$  и  $0 \leq U_m \leq U_{\text{max}}$  соответственно.

4. Зарисуйте осциллограммы на входе и выходе детектора при подаче на вход:

а) немодулированного колебания ( $f_0 = 50$  кГц,  $U_m = U_{\text{max}}$  из п. 2 предварительного задания):

- при подключенных  $C_1$  и  $R$ ;

- при подключенных  $C_2$  и  $R$  ;
- при отключенных конденсаторах (но подключенном сопротивлении нагрузки);

- без резистора, но подключенных конденсаторах  $C_1 + C_2$  ;

б) модулированного колебания (5.4). Частота модуляции  $F$  устанавливается для  $\tau_1 = RC_1$  из условий (5.3) неискаженного детектирования, т. е.  $F \leq F_{01}$  ( $F_{01}$  – из предварительного задания);

в) модулированного сигнала в соответствии с пунктом б), но для  $\tau_2 = RC_2$ , когда не выполняются условия неискажённого детектирования.

5. Повторите пункты 4а и 4б, подключив виртуальный диод, обратное сопротивление которого бесконечно велико, а прямое – мало. Отметьте отличия от предыдущих результатов. Верните на место прежний диод.

6. Активируйте анализатор спектра "XSA1". Зарисуйте спектрограммы и измерьте амплитуды спектральных составляющих входного и выходного сигналов детектора для двух значений  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . В обоих случаях на вход подайте амплитудно-модулированное колебание вида (5.4). Частоту  $F \leq F_{01}$  не меняйте. По спектрам выходных сигналов вычислите коэффициенты нелинейных искажений:

$$k_{\text{ни}} = \frac{\sqrt{U_{2F}^2 + U_{3F}^2 + \dots + U_{nF}^2}}{U_F},$$

где  $U_{2F}, U_{3F} \dots$  – амплитуды второй, третьей и далее гармоник на выходе.

7. Исследуйте детектирование радиоимпульса с прямоугольной огибающей.

Пронаблюдайте, зарисуйте и объясните влияние постоянных времени  $RC$ -цепочки  $\tau_1$  и  $\tau_2$  на форму фронтов и вершины выходных видеопульсов.

По уровню 0,05 от максимального значения измерьте длительность заднего фронта видеопульсов.

Результаты сопоставьте с расчетом.

## 5.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип работы диодного детектора.
2. Изобразите вид временных диаграмм в следующих точках последовательного диодного детектора: на входе, на диоде, на нагрузке, на сопротивлении нагрузки при отключенном конденсаторе и, наоборот, на конденсаторе при отключенном сопротивлении.
3. Напишите соотношения для выбора нагрузки ( $C$  и  $R$ ) в диодном детекторе.
4. Чем определяется угол отсечки в диодном детекторе?
5. Как зависит угол отсечки от сопротивления нагрузки?
6. Дайте определение детекторной характеристике и ее математическое выражение.
7. Что такое линейное и квадратичное детектирование?
8. От чего зависит входное сопротивление детектора?
9. Как будет изменяться форма выходного напряжения детектора при изменении модулирующей частоты?
10. Чему будет равен угол отсечки и коэффициент передачи детектора при отключенном: а) конденсаторе; б) резисторе?
11. Как будут изменяться передний фронт, вершина и задний фронт продетектированного радиоимпульса, если изменять: а) сопротивление нагрузки, б) емкость нагрузки?
12. При каком условии и почему диодный детектор, имеющий нелинейную ВАХ диода, называют линейным детектором?

# Лабораторная работа № 6

## LC-ГЕНЕРАТОР С ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

### 6.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование условий самовозбуждения и стационарного режима генератора на полевом транзисторе с трансформаторной обратной связью.

### 6.2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ВИРТУАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Схема эксперимента показана на рис. 6.1. Автогенератор (АГ) представляет собой резонансный усилитель с положительной обратной связью (ПОС). Варианты параметров его контура для каждой бригады даны в табл. 6.1, ВАХ транзистора – в табл. 6.2 и 6.3 и на рис. 6.2.

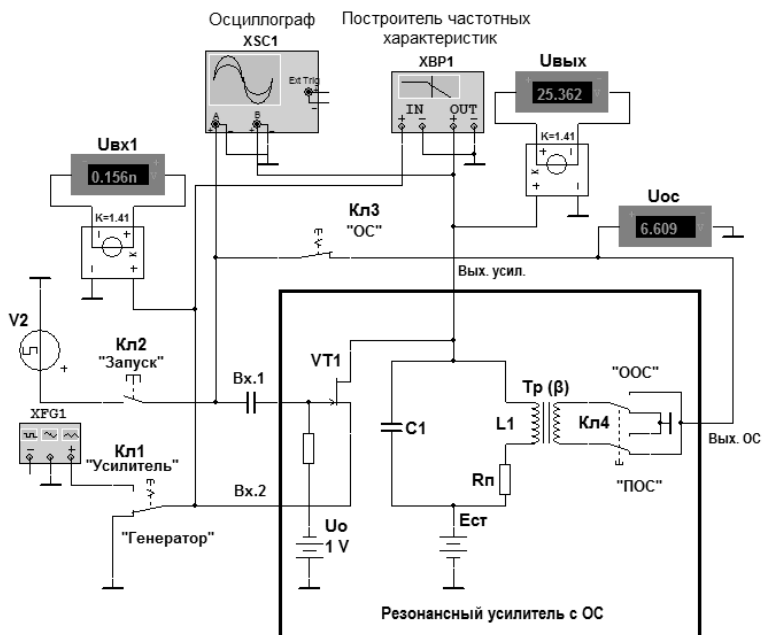


Рис. 6.1. Схема лабораторного устройства

Таблица 6.1

Параметры	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C$ , нФ	9,6	8,96	8,32	7,68	7,04	6,4	5,76	5,12	4,48	3,84
$L$ , мГн	0,8	0,96	1,12	1,28	1,44	1,6	1,76	1,92	2,08	2,24
$R_{п}$ , Ом	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56

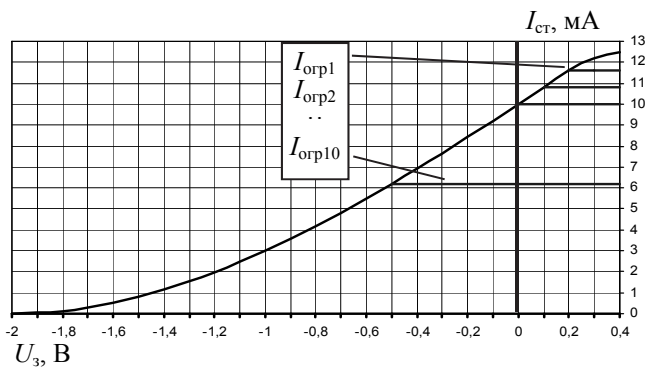


Рис. 6.2. ВАХ транзистора

Таблица 6.2

$U_3$ , В	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,3</b>	<b>-0,4</b>	<b>-0,5</b>	<b>-0,6</b>	<b>-0,7</b>	<b>-0,8</b>
$I_{ст}$ , мА	10,3	10,2	10,1	10	9,2	8,42	7,65	6,91	6,19	5,49	4,82	4,18
$U_3$ , В	<b>-0,9</b>	<b>-1</b>	<b>-1,1</b>	<b>-1,2</b>	<b>-1,3</b>	<b>-1,4</b>	<b>-1,5</b>	<b>-1,6</b>	<b>-1,7</b>	<b>-1,8</b>	<b>-1,9</b>	<b>-2,0</b>
$I_{ст}$ , мА	3,57	3	2,47	1,98	1,54	1,15	0,81	0,53	0,3	0,14	0,03	0

Таблица 6.3

Параметры	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{орп}$ , мА	11,6	10,8	10	9,2	8,58	8	7,45	6,66	6,19	5,75

На вход "Вх2" усилителя ключом "Кл1" можно подать гармонический сигнал от генератора "XFG1" (положение "Усилитель"). Ключ "Кл2" служит для кратковременной поддачи на вход автогенератора импульсов запуска прямоугольной формы от источника "V2".

### 6.3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучите основные вопросы темы по конспекту лекций.
2. Рассчитайте резонансную частоту ( $f_p$ ) и резонансное сопротивление ( $Z_{p3}$ ) контура усилителя. Необходимые значения  $C_1$ ,  $L_1$ ,  $R_p$  даны в табл. 6.1.

3. Рассчитайте амплитуду тока  $I_1$  первой гармоники, среднюю крутизну  $S_{cp} = I_1 / U_m$ , резонансный коэффициент усиления  $K_p = S_{cp} Z_p$ , а также критическое значение коэффициента обратной связи  $\beta_{кр}$ . Расчет выполните для двух напряжений смещения:  $U_0 = -1$  и  $U_0 = -1,8$  В. Амплитуда на входе при этом  $U_m^{BX} = 0,1$  В.

4. Рассчитайте и постройте два графика амплитудной характеристики усилителя  $U_m^{ВЫХ} = f(U_m^{BX})_{U_0=const}$  для заданных в п. 3 напряжений смещения.

**Внимание!** Графики следует строить отдельно друг от друга на различных участках миллиметровки. При построении воспользуйтесь динамической сток-затворной характеристикой транзистора (рис. 6.2 и табл. 6.2, 6.3). В табл. 6.3 для каждого варианта даны значения тока стока, начиная с которых он не меняется ( $I_{огр1} \dots I_{огр10}$ ). Максимальное значение входной амплитуды определяется устойчивым прекращением роста амплитуды на выходе.

По виду графиков оцените возможный режим самовозбуждения (*мягкий, жёсткий*).

5. На каждом из графиков амплитудных характеристик постройте по две линии обратной связи  $U_m^{ВЫХ} = \frac{1}{\beta_{кр}} U_m^{BX}$ ;  $U_m^{ВЫХ} = \frac{1}{\beta_{ст}} U_m^{BX}$ . Для мягкого режима  $\beta_{ст.м} = 1,3\beta_{кр1}$ ; для жёсткого  $\beta_{ст.ж} = 0,7\beta_{кр2}$ . По точкам пересечения линий обратной связи с колебательными характеристиками определите значения стационарных амплитуд на выходе

$(U_m^{\text{ст. м}}, U_m^{\text{ст. ж}})$ . Для жёсткого режима определите необходимую амплитуду импульсов запуска автоколебаний  $(U_m^{\text{зап}})$ .

Указание. Результаты расчётов занесите в табл. 6.4.

Т а б л и ц а 6.4

Результаты	$f_p$ , кГц	$Z_p$ , кОм	$U_0 = -1 \text{ В}$					$U_0 = -1,8 \text{ В}$					
			$I_1$ , мА	$S_{cp}$ , мА/В	$K_{p1}$	$\beta_{kp1}$	$U_m^{ст.м}$ , В	$I_1$ , мА	$S_{cp}$ , мА/В	$K_{p2}$	$\beta_{kp2}$	$U_m^{ст.ж}$ , В	$U_m^{зап}$ , В
Расчёт													
Эксперимент		—	—	—				—	—				

### Пояснения и расчётные соотношения

Методика и формулы для расчёта параметров параллельного резонансного контура приведены в работе № 2. Расчет резонансного усилителя с обратной связью описан в работе № 3.

Режим, при котором в усилителе возбуждаются автоколебания, называется *критическим*.

Для того чтобы усилитель с обратной связью возбудился, необходимо:

1) обеспечить выполнение условия положительности обратной связи (ПОС):

$$\varphi_K(f_\Gamma) + \varphi_\beta(f_\Gamma) = n \cdot 2\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (6.1)$$

где  $\varphi_K(f)$ ,  $\varphi_\beta(f)$  – ФЧХ усилителя и цепи ОС, из которого следует  $f_\Gamma = f_p = 1/2\pi\sqrt{LC}$ ;

2) выполнить амплитудное условие самовозбуждения:

$$K(f_\Gamma) \cdot \beta(f_\Gamma) \geq 1, \quad (6.2)$$

где  $K(f_\Gamma) = K_p = S \cdot Z_p$ .

Так как самовозбуждение усилителя происходит в линейном режиме работы, то  $S = S_i \approx \Delta i / \Delta u$  – это дифференциальная крутизна транзистора в рабочей точке  $U_0$ . Она равна средней  $S_{cp}$  при малых входных амплитудах.

Из условия (6.2) следует, что перевести усилитель в *критический режим* можно, меняя  $S$ ,  $Z_p$  или  $\beta$ . Например, в случае изменения  $\beta$  минимальное (критическое) значение коэффициента ОС

$$\beta_{кр} = 1/K_p. \quad (6.3)$$

При выполнении условий (6.1) и (6.2) нарастающие автоколебания попадают в область нелинейности параметров транзистора (отсечка, ограничение). Их рост замедляется и прекращается. Наступает *стационарный режим*, описываемый уравнением *баланса амплитуд*

$$S_{cp}(U_m^{ct})Z_p\beta_{ct} = 1 \text{ или } K(U_m^{ct}) = \frac{1}{\beta_{ct}}, \quad (6.4)$$

где  $S_{cp} = I_1 / U_m$  – средняя крутизна.

Для определения стационарной амплитуды  $(U_m^{ct})$  необходимо построить амплитудную характеристику усилителя

$$U_m^{BЫX} = Z_p I_1 (U_m^{BЫX}) \Big|_{U_0 = \text{const}}, \quad (6.5)$$

где  $I_1 (U_m^{BЫX}) \Big|_{U_0 = \text{const}}$  – амплитуда выходного тока транзистора в рабочей точке  $U_0$ .

$I_1 (U_m^{BЫX})$  рассчитывается *методом трёх ординат* по динамической сток-затворной характеристике (рис. 6.2; табл. 6.2 и 6.3). Она отличается от статической (см. рис. 3.2) наличием участка ограничения тока, т. е. такого значения тока ( $I_{огр}$ ), при котором он перестаёт увеличиваться.

В жёстком режиме стационарная линия ОС пересекается с амплитудной характеристикой в трёх точках. Крайние точки устойчивые, а



средняя неустойчивая. Амплитуда импульсов запуска  $U_m^{\text{зап}}$  должна быть больше значения абсциссы неустойчивой (средней) точки пересечения.

#### 6.4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Откройте диск "Education Argon" (D), папки "Радиотехника 2016", "Лаб.раб. 6", "Варианты" и файл "Генератор\_2015\_B#.ms10".

*Указание.* Установите значения параметров элементов схемы ( $C_1, L_1, R_n$ ) в соответствии с предварительным заданием. Результаты последующих измерений заносите в табл. 6.4.

1. Измерьте резонансную частоту и коэффициент усиления усилителя без обратной связи. Для этого разомкните ключ "Кл3"; ключом "Кл1" подайте на вход "Вх2" усилителя от генератора "XFG1" синусоиду амплитудой  $U_m = 0,1$  В на резонансной частоте ( $f_0$ ) из предварительного задания. Установите источником " $U_0$ " смещение  $U_0 = -1$  В (знак "—" не вводить).

По построителю ЧХ "ХВР1" определите резонансную частоту и коэффициент усиления. При необходимости откорректируйте частоту генератора  $f_0$  так, чтобы напряжение на выходе ( $U_{\text{вых}}$ ) стало максимальным.

Повторите измерения для  $U_0 = -1,8$  В.

Сравните результаты эксперимента и расчёта.

2. Снимите и постройте амплитудные характеристики  $U_m^{\text{вых}} = f(U_m^{\text{вх}})_{U_0 = \text{const}}$  для смещений  $U_0 = -1$  и  $-1,8$  В. Амплитуду входного напряжения  $U_m^{\text{вх}}$  меняйте с шагом  $0,1$  В.

Совместите экспериментальные и теоретические графики.

3. Переключите "Кл1" в положение «Генератор», замкните ключом "Кл3" положительную обратную связь. Определите критические значения коэффициента обратной связи  $\beta_{\text{кр1}}, \beta_{\text{кр2}}$  для напряжений смещения  $-1$  и  $-1,8$  В.

*Указание.* Установите в меню трансформатора сначала теоретическое значение  $\beta_{\text{кр}}$  с точностью до двух значащих цифр. При отсутствии самовозбуждения немного увеличьте связь и некоторое время следите за динамикой изменения напряжения по вольтметру цепи ОС ("Uос"). Если напряжение не

увеличивается, то связь меньше критической, если увеличивается скачком, то слишком большая.  $\beta$  следует менять до появления на экране осциллографа "XSC1" устойчивых гармонических колебаний. Процесс самовозбуждения наблюдайте на экране осциллографа. Канал "А" отключите.

4. Определите значения стационарной амплитуды автоколебаний на выходе генератора в мягком ( $U_m^{\text{ст.м}}$ ) и жёстком ( $U_m^{\text{ст.ж}}$ ) режимах самовозбуждения. Для мягкого режима установите  $\beta_{\text{ст.м}} = 1,3\beta_{\text{кр1}}$ , для жёсткого  $\beta_{\text{ст.ж}} = 0,7\beta_{\text{кр2}}$ .

*Указание.* Для возбуждения АК в жёстком режиме коротко кликните мышкой ключ "Кл2" "Запуск". При этом амплитуда импульсов запуска генератора "V2" должна быть  $\geq U_m^{\text{зап}}$  из предварительного задания. Канал "А" необходимо включить.

Занесите в таблицу экспериментальные значения стационарных амплитуд.

5. Постройте на графиках амплитудных характеристик экспериментальные линии ОС для критических и стационарных  $\beta$ . Отметьте координаты устойчивых и неустойчивых точек.

Сравните расчётные, графические и экспериментальные значения стационарной амплитуды АК.

6. Исследуйте с помощью осциллографа, как влияет амплитуда импульсов запуска от источника "V2" на жёсткий режим возбуждения. Определите минимально возможную амплитуду импульсов запуска, сравните ее с теоретическим значением  $U_m^{\text{зап}}$ .

7. Для мягкого режима самовозбуждения ( $U_0 = -1$ ) снимите и постройте зависимость стационарной амплитуды генерируемых колебаний от коэффициента обратной связи  $U_m^{\text{ст}} = f(\beta)$ . Объясните полученный результат.

$\beta$  следует менять от  $\beta_{\text{кр1}}$  до  $2\beta_{\text{кр1}}$ . График должен состоять из 10...15 точек. Шаг первых пяти точек 0,001.

*Указание.* После каждого изменения  $\beta$  для ускорения процесса установления стационарной амплитуды можно коротко кликнуть мышкой на кнопке "Запуск".

## 6.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Изобразите обобщенную схему автогенератора гармонических колебаний. Каково назначение нелинейного элемента и фильтра?
2. В чем сущность квазилинейного метода исследования генераторов? Какие характеристики и параметры нелинейного элемента используются в этом методе?
3. Дайте определение колебательной (амплитудной) характеристики. Запишите ее математическое выражение и поясните методику экспериментального получения.
4. Качественно изобразите семейство колебательных характеристик для различных напряжений смещения полевого транзистора автогенератора.
5. Назовите режимы самовозбуждения автогенератора. Какова их связь с формой колебательных характеристик? От чего зависит форма последних?
6. Как определить области мягкого и жёсткого режимов самовозбуждения генератора по ВАХ нелинейного элемента?
7. Каковы условия (и математическая запись) режима самовозбуждения  $LC$ -генератора? Почему режим возникновения колебаний можно анализировать согласно линейной теории?
8. От чего зависит время установления колебаний в автогенераторе?
9. Каковы условия (и математическая запись) стационарного режима генератора?
10. Как по колебательной характеристике и характеристике ОС определить амплитуду генерируемых колебаний и их устойчивость?
11. Изобразите зависимости  $K(U_m)$  и  $S_{cp}(U_m)$  для мягкого и жёсткого режимов самовозбуждения генератора. Как по ним определить критическое значение обратной связи ( $\beta_{кр}$ ) для возникновения и срыва генерации?
12. Запишите условия устойчивости стационарного режима «в малом».
13. Чем определяется частота автогенератора? Почему добротность контура влияет на стабильность частоты?
14. Изобразите графически зависимость амплитуды выходного напряжения генератора от величины коэффициента ОС ( $\beta$ ) для смещений, соответствующих мягкому и жёсткому режимам самовозбуждения.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Лабораторная работа № 1. ФИЛЬТРЫ НИЖНИХ И ВЕРХНИХ ЧАСТОТ. ПОЛОСОВЫЕ ФИЛЬТРЫ .....	4
Лабораторная работа № 2. ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ .....	17
Лабораторная работа № 3. НЕЛИНЕЙНОЕ РЕЗОНАНСНОЕ УСИЛЕНИЕ. УМНОЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ .....	25
Лабораторная работа № 4. АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ СМЕЩЕНИЯ .....	33
Лабораторная работа № 5. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО- МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ .....	43
Лабораторная работа № 6. LC-ГЕНЕРАТОР С ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ .....	51

## **РАДИОТЕХНИКА**

### **Методические указания**

Редактор *И.Л. Кескевич*  
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*  
Корректор *И.Е. Семенова*  
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

---

Подписано в печать 07.04.2016. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.  
Уч.-изд. л. 3,48. Печ. л. 3,75. Изд. № 338/15. Заказ № 571. Цена договорная

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20