

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**А.В. Шарапов**

# **АНАЛОГОВАЯ СХЕМОТЕХНИКА**

**Руководство к организации  
самостоятельной работы**

**2006**

Федеральное агентство по образованию

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**А.В.Шарапов**

# **АНАЛОГОВАЯ СХЕМОТЕХНИКА**

**Руководство к организации  
самостоятельной работы**

**2006**

## СОДЕРЖАНИЕ

1 РАБОЧАЯ ПРОГРАММА.....	3
2 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО АНАЛОГОВОЙ СХЕМОТЕХНИКЕ .....	11
2.1 Сравнительная характеристика каскадов УНЧ с ОЭ, ОК и ОБ .....	11
2.2 Усилительные каскады на полевых транзисторах .....	15
3 КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО АНАЛОГОВОЙ СХЕМОТЕХНИКЕ .....	18
3.1 Бестрансформаторные выходные каскады УНЧ .....	22
3.2 Усилители и преобразователи сигналов на операционных усилителях .....	25
3.3 Избирательные усилители и генераторы гармонических колебаний.....	28
3.4 Измерительные устройства на операционных усилителях .....	32
3.5 Стабилизаторы постоянного напряжения .....	35
4 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ .....	38
5 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №1 .....	51
6 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №1 .....	53
7 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №2 .....	56
8 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №2 .....	58
9 ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЗАДАНИЯ №1 .....	60
10 ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЗАДАНИЯ №2 .....	63
11 ТВОРЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ.....	66
12 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА....	68
12.1 Цель курсового проектирования .....	68
12.2 Конкретизация технического задания .....	68
12.3 Выбор элементов выходного каскада .....	69
12.4 Компоновка схемы усилителя с последовательной ООС по напряжению.....	74
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	80
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	81
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	82
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	83
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	84
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	85

Федеральное агентство по образованию

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

### РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

По дисциплине	Аналоговая схемотехника
Направление	210100 – электроника и микроэлектроника
Специальность	210106 – промышленная электроника

Факультет электронной техники  
Профилирующая кафедра промышленной электроники

Курс третий  
Семестры пятый и шестой

Учебный план набора 2002 года и последующих лет

Распределение учебного времени

Лекции (5 семестр)	28 часов
Лабораторные занятия	18 часов
Практические занятия	18 часов
Курсовой проект (6 семестр)	16 часов
Всего аудиторных занятий	80 часов
Самостоятельная работа	50 часов
Общая трудоемкость	130 часов

Экзамен	– 5 семестр
Диф. зачет	– 6 семестр

## **1 Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе**

В дисциплине «Аналоговая схемотехника» рассматриваются усилительные устройства, генераторы гармонических колебаний и стабилизаторы постоянного напряжения. В процессе ее изучения приобретаются навыки анализа транзисторных усилительных каскадов и построения аналоговых электронных устройств на операционных усилителях.

Для изучения дисциплины необходимо знать принцип работы и эквивалентные схемы электронных и полупроводниковых приборов, методы анализа электрических цепей. Эти знания студенты получают в процессе изучения предшествующих дисциплин «Твердотельная электроника», «Теоретические основы электротехники».

## **2 Содержание дисциплины**

### **2.1 Наименование тем, их содержание**

#### **1. Основные характеристики усилительных устройств**

Структурная схема усилительного устройства. Классификация электронных усилителей. Усилительные параметры. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики. Переходная характеристика. Линейные и нелинейные искажения. Амплитудная характеристика. Способы связи между каскадами. Классы усиления.

#### **2. Обратные связи в усилителях**

Виды обратных связей. Влияние отрицательной обратной связи (ООС) на стабильность коэффициента усиления. Влияние ООС на нелинейные искажения. Влияние ООС на величину входного и выходного сопротивлений усилителя. Амплитудно-частотная характеристика усилителя с ООС. Частотный критерий устойчивости усилителя с обратной связью. Запасы устойчивости по амплитуде и фазе. Пример расчета характеристик усилителя с ООС.

**3. Эквивалентные схемы и малосигнальные параметры усилительных устройств** (тема выносится на самостоятельное изучение по учебному пособию)

Способы включения биполярного транзистора. Характеристики транзистора при включении с общей базой и общим эмиттером. Т-образная эквивалентная схема замещения транзистора при включении с общей базой. Т-образная эквивалентная схема замещения транзистора при включе-

нии с общим эмиттером.  $h$ -параметры транзистора и их связь с параметрами физической эквивалентной схемы. Определение  $h$ -параметров по характеристикам транзистора. Типы полевых транзисторов. Характеристики и малосигнальные параметры полевых транзисторов. Эквивалентные схемы замещения полевых транзисторов.

#### **4. Усилительный каскад по схеме с общим эмиттером**

Принцип работы и назначение элементов простейшего каскада УНЧ по схеме с общим эмиттером. Нагрузочные прямые постоянного и переменного тока. Анализ каскада в области средних частот. Анализ каскада в области нижних частот. Анализ каскада в области верхних частот. Результирующие характеристики каскада.

#### **5. Температурная стабилизация режима работы биполярного транзистора**

Цепи смещения с фиксированным током базы и эмиттера. Цепь смещения с эмиттерной стабилизацией рабочей точки. Цепь смещения с комбинированной ООС по постоянному току.

#### **6. Каскад с общим эмиттером при работе в режиме большого сигнала**

Выбор режима работы транзистора. Пример расчета усилительного каскада.

#### **7. Коррекция частотных характеристик**

Схемы высокочастотной коррекции. Схема низкочастотной коррекции.

#### **8. Усилительные каскады УНЧ по схемам с общей базой и общим коллектором**

Каскад с общей базой. Каскад с общим коллектором. УНЧ с гальванически связанными каскадами ОЭ-ОК.

#### **9. Усилительные каскады на полевых транзисторах**

Каскад по схеме с общим истоком. Анализ каскада в области средних и верхних частот. Каскад с последовательной ООС по току.

## **10. Усилители мощности**

Трансформаторный выходной каскад в режиме класса А. Трансформаторный выходной каскад в режимах В и АВ. Влияние трансформатора на частотную характеристику усилителя. Бестрансформаторные выходные каскады (выходные каскады в режиме класса В, выходной каскад в режиме класса АВ, каскад с вольтодобавкой, выходной каскад УНЧ с квазидополнительной симметрией).

## **11. Операционные усилители**

Дифференциальный усилительный каскад. Стабилизаторы тока. Операционный усилитель. Основные параметры и схемы включения операционных усилителей.

## **12. Примеры применения операционных усилителей**

Инвертирующий усилитель постоянного тока. Неинвертирующий усилитель постоянного тока. Дифференциальный УПТ. Аналоговый сумматор. Аналоговый интегратор. Усилители низкой частоты. Усилители с токовым выходом. Усилители тока. Амплитудный детектор. Выпрямитель среднего значения. Преобразователи сопротивления в напряжение. Пример расчета погрешностей измерительного УПТ.

## **13. Избирательные усилители**

Резонансный усилитель с параллельным LC-контуром. Каскодный усилитель. Избирательный усилитель типа RC со сложной ООС. Активные фильтры нижних и верхних частот.

## **14. Генераторы гармонических колебаний**

Структурная схема генератора. Условия баланса фаз и амплитуд. Автогенератор с трансформаторной обратной связью. Трехточечные генераторы. Кварцевая стабилизация частоты. Автогенератор с трехзвенной RC-цепью. Автогенератор с мостом Вина. Генератор с независимым возбуждением. Автогенератор на туннельном диоде.

## **15. Стабилизаторы постоянного напряжения**

Классификация стабилизаторов постоянного напряжения. Параметрический стабилизатор напряжения на кремниевом стабилитроне. Источник опорного напряжения. Последовательный компенсационный стабили-

зитор напряжения. Стабилизатор на операционном усилителе с ограничением выходного тока. Микросхемы стабилизаторов постоянного напряжения.

## 2.2 Практические занятия, их содержание

1. Качественные показатели усилительных устройств.
2. Влияние обратных связей на характеристики усилителей.  
Малосигнальные параметры биполярных и полевых транзисторов.
3. Усилительный каскад на биполярном транзисторе.
4. Усилительный каскад на полевом транзисторе.
5. Контрольная работа 1.
6. Собеседование 1.
7. Аналоговые устройства на операционных усилителях.
8. Контрольная работа 2.
9. Собеседование 2.

## 2.3 Лабораторные занятия, их наименование и объем в часах

1. Исследование усилительных каскадов на биполярном транзисторе .....	4 часа
2. Каскад усиления на полевом транзисторе.....	4 часа
3. Бестрансформаторные выходные каскады УНЧ.....	2 часа
4. Усилители и преобразователи сигналов на операционных усилителях.....	2 часа
5. Измерительные устройства на операционных усилителях...	2 часа
6. Избирательные усилители и генераторы гармонических колебаний.....	2 часа
7. Стабилизаторы постоянного напряжения.....	2 часа

## 2.4 Курсовой проект, его характеристика

Целью курсового проектирования является закрепление знаний по схемотехнике аналоговых электронных устройств, выбору их элементов, расчету качественных характеристик, приобретению навыков моделирования, оформления пояснительной записки и чертежей. В число проектируемых устройств входят различные усилители, генераторы гармонических колебаний, стабилизаторы постоянного напряжения.

Точный анализ аналоговых устройств приводит к громоздким соотношениям, мало пригодным для практики инженерных расчетов. Рекомендуем использовать приближенные эквивалентные схемы и методы анализа, позволяющие получить простые и наглядные соотношения для параметри-



ческого синтеза устройств. Уточненный анализ и подгонку значений элементов спроектированных таким образом устройств можно выполнить затем путем компьютерного моделирования с помощью пакетов Electronics Workbench или ASIMEC.

Рекомендации по курсовому проектированию с примерами оформления текстовой части и чертежей приведены в руководстве к выполнению курсового проекта. Три первых занятия по курсовому проектированию посвящаются разбору различных схмотехнических аспектов и изложению методики проектирования, остальные – индивидуальным консультациям и защите проекта.

## 2.5 Организация самостоятельной работы

Самостоятельная работа в 5 семестре организуется в соответствии со следующей рейтинговой раскладкой:

Собеседование 1 (темы 1–9).....	10
Инд. задание 1 (транзисторный усилительный каскад).....	15
Контрольная работа 1 (анализ транзисторного каскада).....	10
Собеседование 2 (темы 10–15).....	15
Инд. задание 2 (прецизионный усилитель).....	15
Контрольная работа 2 (анализ УНЧ на ОУ).....	10
Рейтинг за лабораторный практикум (семь работ по пять баллов).....	35
Творческое задание.....	10
Максимальный итоговый рейтинг.....	120

Варианты индивидуальных заданий приведены в данном руководстве. Примеры выполнения индивидуальных заданий приведены в учебном пособии.

Творческое задание может получить студент, выполнивший оба задания и набравший рейтинг, соответствующий порогу оценки «хорошо» ( $\geq 80$ ). Варианты творческих заданий приведены в данном руководстве.

## 3 Учебно-методические материалы по дисциплине

### 3.1 Основная и дополнительная литература

Основная:

1. Шарапов А.В. Аналоговая схмотехника: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2006. – 193 с.

2. Шарапов А.В. Аналоговая схмотехника: Руководство к организации самостоятельной работы. – Томск: ТУСУР, 2006. – 82 с.

Дополнительная:

3. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.

4. Изъюрова Г.И., Королев Г.В., Терехов В.А. и др. Расчет электронных схем. Примеры и задачи. – М.: Высшая школа, 1987. – 335 с.

5. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с.

6. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с.

7. Воробьев Н.И. Проектирование электронных устройств. – М.: Высшая школа, 1989. – 223 с.

8. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 320 с.

9. Денисов Н.П., Шарапов А.В., Шibaев А.А. Электроника и схемотехника. Учебное пособие: в 2 частях – Томск, ТМЦ ДО, 2002. — Ч.2. – 220 с.

### **3.2 Компьютерные обучающие и контролирующие программы**

Электронный учебник по дисциплине представляет собой гипертекстовый вариант лекционного курса и материалов данного учебно-методического пособия. В конце каждого раздела лекционного курса приведены упражнения в виде тестовых вопросов. Звуковые комментарии с голосом лектора поясняют принцип работы наиболее сложных электронных устройств.

С помощью программной оболочки «Фея» реализованы компьютерные собеседования по темам: «Транзисторный усилительный каскад» и «Операционный усилитель». В ходе собеседований на экране формируется несколько информационных кадров, на фоне которых предлагается ответить на  $N$  вопросов по закрепляемой теме, а компьютер комментирует правильность ответов. Несколько последних вопросов выбираются случайным образом и не снабжены комментарием. Итогом собеседования является процент правильных ответов и рейтинг, максимальное значение которого равно  $R$ . Рейтинг равен нулю, если число правильных ответов меньше или равно  $N - R$ . Каждый правильный ответ начиная с этого порогового значения увеличивает рейтинг на единицу. Собеседование по теме «Транзисторный усилительный каскад» включает 30 вопросов, собеседование по теме «Операционный усилитель» включает 50 контрольных вопросов.

Использование данных программ возможно, если практическое занятие проходит в учебной лаборатории, компьютеры в которой не подключены к кафедральной сети. В других компьютерных классах для текущего

контроля можно использовать программы двух компьютерных контрольных работ, которые выполняют студенты ТМЦДО.

Экзамен по дисциплине принимается в компьютерном классе (используется программа компьютерного экзамена для ТМЦДО). Оценка, предлагаемая компьютером, считается предварительной. Окончательная оценка выставляется после небольшого собеседования с лектором.

## 2 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО АНАЛОГОВОЙ СХЕМОТЕХНИКЕ

### Лабораторная работа №1

#### 2.1 Сравнительная характеристика каскадов УНЧ с ОЭ, ОК и ОБ

**Цель работы.** Целью лабораторной работы является экспериментальное исследование усилительных каскадов на биполярном транзисторе, собранных по схемам с общим эмиттером, общим коллектором и общей базой, и их сравнение по величинам входного и выходного сопротивлений, коэффициента усиления по напряжению, верхней рабочей частоте. Схемы исследуемых усилителей представлены на рис. 1, 2 и 3. Задается одинаковый режим работы транзистора по постоянному току. В зависимости от номера варианта  $N$  устанавливается величина напряжения источника питания  $E=10+N/2$  В.

$$C_1 = C_2 = C_B = 47 \text{ мкФ}$$

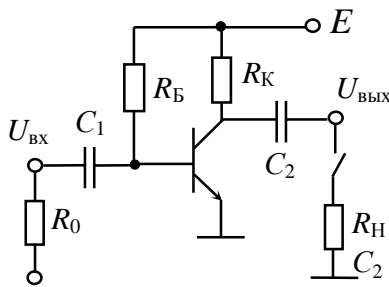


Рис. 1 – Каскад с ОЭ

$$\begin{aligned} R_0 &= 1 \text{ кОм} \\ R_B &= 1 \text{ МОм} \\ R_K &= 5,1 \text{ кОм} \\ R_Н &= 5,1 \text{ кОм} \end{aligned}$$

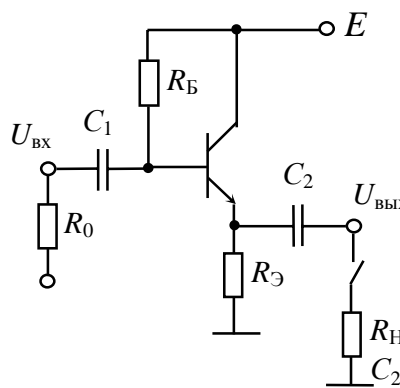


Рис. 2 – Каскад с ОК

$$\begin{aligned} R_0 &= 110 \text{ кОм} \\ R_B &= 560 \text{ кОм} \\ R_Э &= 5,1 \text{ кОм} \\ R_Н &= 5,1 \text{ кОм} \end{aligned}$$

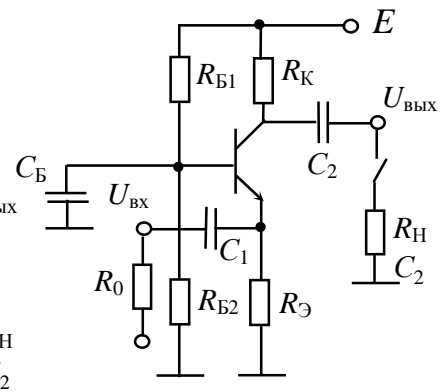


Рис. 3 – Каскад с ОБ

$$\begin{aligned} R_0 &= 47 \text{ Ом} \\ R_{Б1} &= 10 \text{ кОм} \\ R_{Б2} = R_Э &= 5,1 \text{ кОм} \\ R_Н = R_К &= 5,1 \text{ кОм} \end{aligned}$$

### Основные расчетные соотношения

Входное сопротивление

ОЭ	$R_{ВХ} = R_B \parallel h_{11}^Э \approx h_{11}^Э \approx r_B + r_Э(1 + \beta) \approx 50 + \frac{26}{I_0}(1 + \beta)$
ОБ	$R_{ВХ} = R_Э \parallel h_{11}^Б \approx h_{11}^Б \approx r_Э + \frac{r_B}{1 + \beta}$
ОК	$R_{ВХ} = h_{11}^Э + R_{\sim}(1 + \beta)$ , где $R_{\sim} = R_Э \parallel R_Н$

## Выходное сопротивление

ОЭ	$R_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{К}} \parallel \frac{1}{h_{22}^{\text{Э}}} \approx R_{\text{К}}$
ОБ	$R_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{К}} \parallel r_{\text{К}} \approx R_{\text{К}}$
ОК	$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{h_{11}^{\text{Э}}}{1 + \beta}$

Коэффициент усиления по напряжению в рабочем диапазоне частот

ОЭ	$K_0 = \frac{\beta R_{\sim}}{h_{11}^{\text{Э}}}$ , где $R_{\sim} = R_{\text{К}} \parallel R_{\text{Н}}$
ОБ	$K_0 = \frac{\alpha R_{\sim}}{h_{11}^{\text{Б}}}$ , где $R_{\sim} = R_{\text{К}} \parallel R_{\text{Н}}$
ОК	$K_0 = \frac{(1 + \beta) R_{\sim}}{h_{11}^{\text{Э}} + (1 + \beta) R_{\sim}}$ , где $R_{\sim} = R_{\text{Э}} \parallel R_{\text{Н}}$

Постоянная времени каскада в области верхних частот

ОЭ	$\tau_{\text{В}} = \tau_{\beta} + C_{\text{К}}(1 + \beta)R_{\sim}$
ОБ	$\tau_{\text{В}} = \tau_{\alpha} + C_{\text{К}}R_{\sim}$
ОК	$\tau_{\text{В}} = \frac{\tau_{\alpha}}{1 - \alpha\gamma}$ , где $\gamma = \frac{r_{\text{Б}}}{R_{\sim} + r_{\text{Б}} + r_{\text{Э}}}$

Для всех схем

Нижняя граничная частота на уровне 3 дБ определяется из соотношения

$$\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi f_{\text{Н}} \tau_1}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi f_{\text{Н}} \tau_2}\right)^2} = \sqrt{2},$$

где  $\tau_1 = C_1 R_{\text{ВХ}}$ ,  $\tau_2 = C_2 (R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{Н}})$ .

Верхняя граничная частота на уровне 3 дБ определяется из соотношения

$$f_{\text{В}} = \frac{1}{2\pi\tau_{\text{В}}}.$$

Время установления фронта импульса

$$t_{\phi} = 2,2\tau_{\text{В}}.$$

Относительный спад вершины импульса

$$\Delta = \frac{t_{\text{И}}}{\tau_1} + \frac{t_{\text{И}}}{\tau_2}.$$

### Программа работы

1. Рассчитать теоретически (при  $\beta=100$ ) и оценить экспериментально координаты рабочей точки транзистора  $I_0$  и  $U_0$ . Для измерения постоянных напряжений воспользоваться цифровым вольтметром. Провести на характеристиках транзистора нагрузочную прямую постоянного тока и отметить на ней положение точки покоя. Используется транзистор типа КТЗ15Г.

2. Подключив ко входу каскада генератор гармонических колебаний, снять амплитудно-частотную характеристику коэффициента усиления по напряжению. Амплитуда выходного сигнала должна быть достаточно большой (порядка 1 В) для уменьшения влияния шумов, в то же время сигнал не должен ограничиваться (должна сохраняться синусоидальная форма выходного напряжения). Для измерений на низких и средних частотах можно воспользоваться цифровым вольтметром, на высоких – только осциллографом. Эксперимент проводить при подключенной нагрузке. Оценить величины  $K_0, f_{\text{н}}, f_{\text{в}}$  и сравнить их с расчетными значениями.

3. Снять и построить амплитудную характеристику, подавая и постепенно увеличивая на входе синусоидальный сигнал частотой 1 кГц. На каком уровне происходит ограничение выходного сигнала положительной и отрицательной полярности? Построить нагрузочную прямую переменного тока.

4. На частоте 1 кГц (область средних частот), подав на вход синусоидальное напряжение амплитудой 10 мВ, зафиксировать выходное напряжение при подключенной и отключенной нагрузке. По данным эксперимента оценить величину выходного сопротивления каждого из каскадов:

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{E_{\text{XX}} - U_{\text{Н}}}{U_{\text{Н}}} \cdot R_{\text{Н}},$$

где  $E_{\text{XX}}$  – выходное напряжение при отключенной нагрузке;

$U_{\text{Н}}$  – выходное напряжение при подключенной нагрузке.

5. В условиях предыдущего эксперимента подключить резистор  $R_0$  последовательно с источником сигнала и измерить напряжение на его

нижнем ( $U_1$ ) и верхнем ( $U_2$ ) выводе. Вычислить значение входного сопротивления усилителя по формуле  $R_{ВХ} = U_{ВХ}/I_{ВХ} = R_0 U_2 / (U_1 - U_2)$ .

6. Подключив ко входу каскада генератор импульсных сигналов, исследовать свойства каскада при усилении прямоугольных импульсов ( $f = 1$  кГц,  $t_{и} = 100$  мкс). Инвертирует ли каскад импульс? Во сколько раз усиливается амплитуда импульса? Оценить экспериментально время установления фронта и относительный спад вершины импульса и сравнить с расчетными величинами.

7. Заполнив по результатам экспериментов таблицу 1, провести сравнительную оценку каскадов с ОЭ, ОБ и ОК по величинам  $R_{ВХ}$ ,  $R_{ВЫХ}$ ,  $K_0$ ,  $f_{В}$ .

Таблица 1	$R_{ВХ}$	$R_{ВЫХ}$	$K_0$	$f_{В}$
ОЭ				
ОБ				
ОК				

### Контрольные вопросы

1. Записать соотношения для оценки температурной нестабильности тока коллектора в рабочей точке каждого из каскадов для диапазона температур от 20 °С до 50 °С.

2. Назвать причины уменьшения коэффициента усиления на низких частотах.

3. Назвать причины уменьшения коэффициента усиления на высоких частотах.

4. Назвать причины искажения фронта и вершины прямоугольного импульса на выходе УНЧ.

5. Какой из каскадов (с ОЭ, ОБ, ОК) инвертирует фазу входного сигнала при усилении?

### Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы исследуемых усилительных каскадов, основные экспериментальные данные и их сравнение с расчетными величинами, выводы по пунктам программы работы, а также ответы на контрольные вопросы.

## Лабораторная работа №2

### 2.2 Усилительные каскады на полевых транзисторах

**Цель работы.** Целью лабораторной работы является экспериментальное исследование свойств каскада УНЧ на полевом транзисторе с управляющим  $p$ - $n$ -переходом (типа КП302Б), собранного по схеме с общим истоком, в том числе каскада с динамической нагрузкой (рис. 1). В зависимости от номера варианта  $N$  устанавливается величина напряжения источника питания  $E=10+N/2$  В.

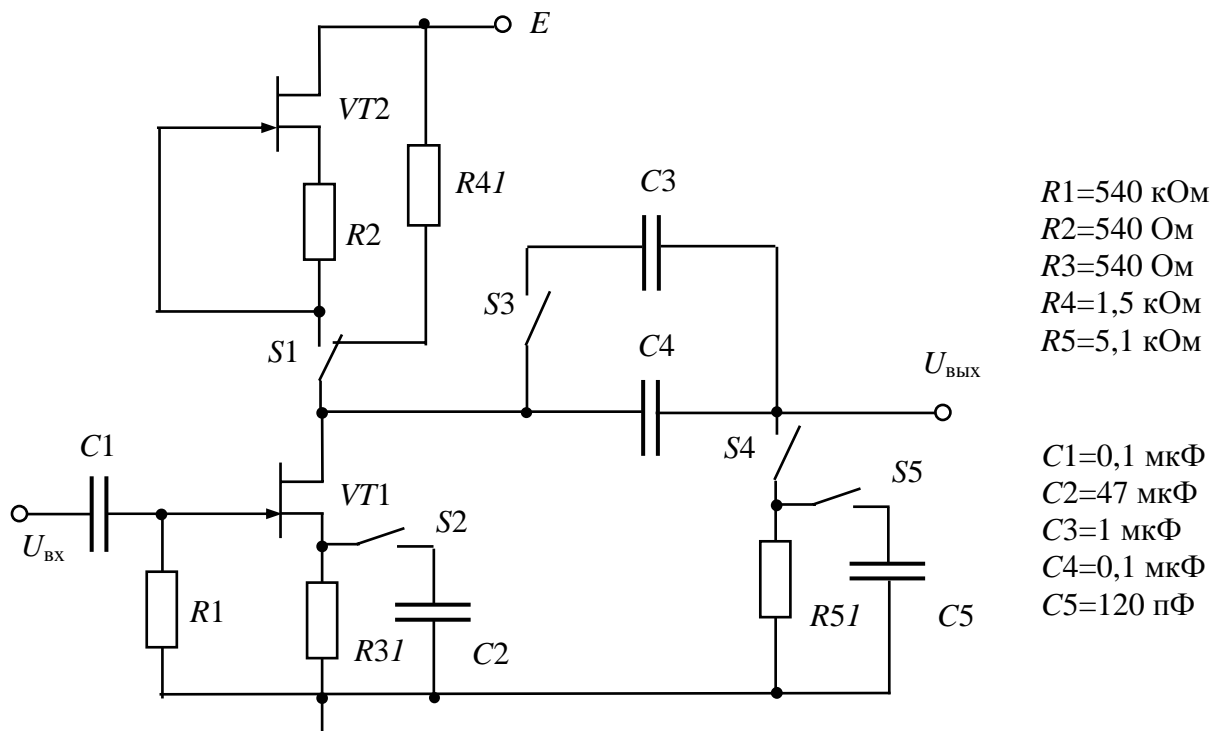


Рис. 1 – Усилительный каскад по схеме с общим истоком

### Программа работы

1. Подключить в качестве стоковой нагрузки резистор  $R4$  и оценить экспериментально координаты рабочей точки транзистора  $I_0$  и  $U_0$ . Для измерения постоянных напряжений воспользоваться цифровым вольтметром. Провести на характеристиках транзистора нагрузочную прямую постоянного тока и отметить на ней положение точки покоя.

2. Подключить  $C3$  параллельно  $C4$ . Снять и сравнить амплитудно-частотные характеристики каскада с ОИ при работе на активную нагрузку и нагрузку емкостного характера. Оценить величины  $K_0$ ,  $f_n$ ,  $f_v$  и сравнить их с расчетными значениями.

3. Исследовать влияние емкости разделительных конденсаторов на АЧХ, отключив конденсатор  $C3$ .



4. Снять и построить амплитудную характеристику, подавая и постепенно увеличивая на входе синусоидальный сигнал частотой 1 кГц. На каком уровне происходит ограничение выходного сигнала положительной и отрицательной полярности? Построить нагрузочную прямую переменного тока.

5. Отключив конденсатор  $C_2$ , снять АЧХ и оценить  $K_{OC}$  для каскада с последовательной ООС по току.

6. Подключить в качестве стоковой нагрузки стабилизатор тока на полевом транзисторе  $VT_2$ . Оценить  $K_0$  и снять АЧХ усилительного каскада. На частоте 1 кГц (область средних частот), подав на вход синусоидальное напряжение амплитудой 10 мВ, зафиксировать выходное напряжение при подключенной и отключенной нагрузке. По данным эксперимента оценить величину выходного сопротивления:

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{E_{\text{XX}} - U_{\text{H}}}{U_{\text{H}}} \cdot R_5,$$

где  $E_{\text{XX}}$  – выходное напряжение при отключенной нагрузке;

$U_{\text{H}}$  – выходное напряжение при подключенной нагрузке.

Оценить  $K_{OC}$  для каскада с последовательной ООС по току и динамической нагрузкой.

7. Подключив ко входу каскада генератор импульсных сигналов, исследовать свойства каскада при усилении прямоугольных импульсов ( $f = 1$  кГц,  $t_{\text{и}} = 100$  мкс). Инвертирует ли каскад импульс? Во сколько раз усиливается амплитуда импульса? Оценить экспериментально время установления фронта и относительный спад вершины импульса и сравнить с расчетными величинами.

### Контрольные вопросы

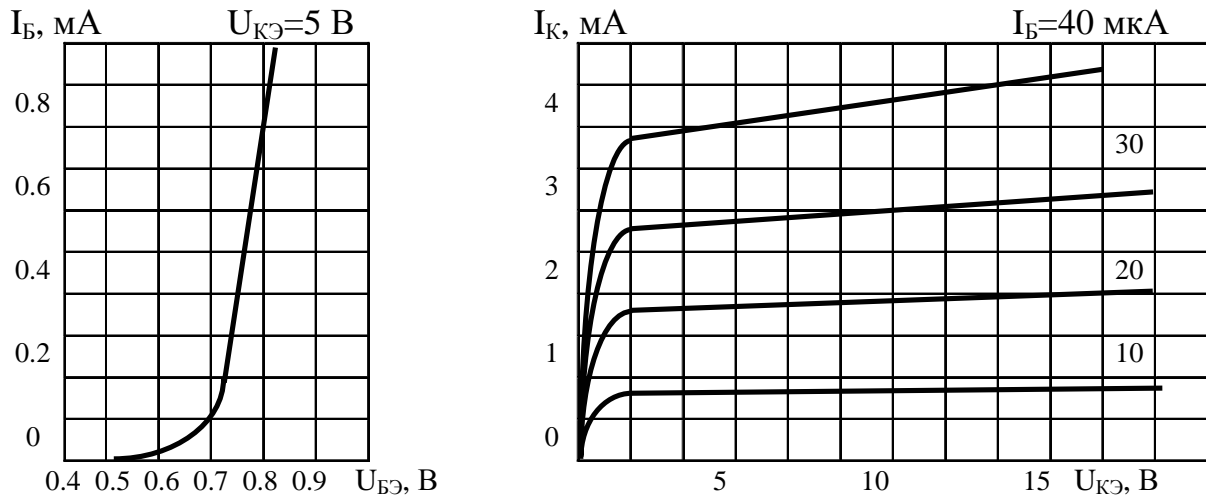
1. Как определить по характеристикам полевого транзистора напряжение отсечки и крутизну характеристики?
2. Рассчитать величину  $K_0$  для исследуемых каскадов и сравнить с экспериментальными данными.
3. Дать сравнительную характеристику усилительных каскадов по схемам с ОЭ и ОИ.
4. Оценить величину входной динамической емкости каскада с ОИ при  $C_{\text{зи}} = C_{\text{зс}} = 10$  пФ.

### Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы исследуемых усилительных каскадов, основные экспериментальные данные и их сравнение с расчетными величинами, выводы по пунктам программы работы, а также ответы на контрольные вопросы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

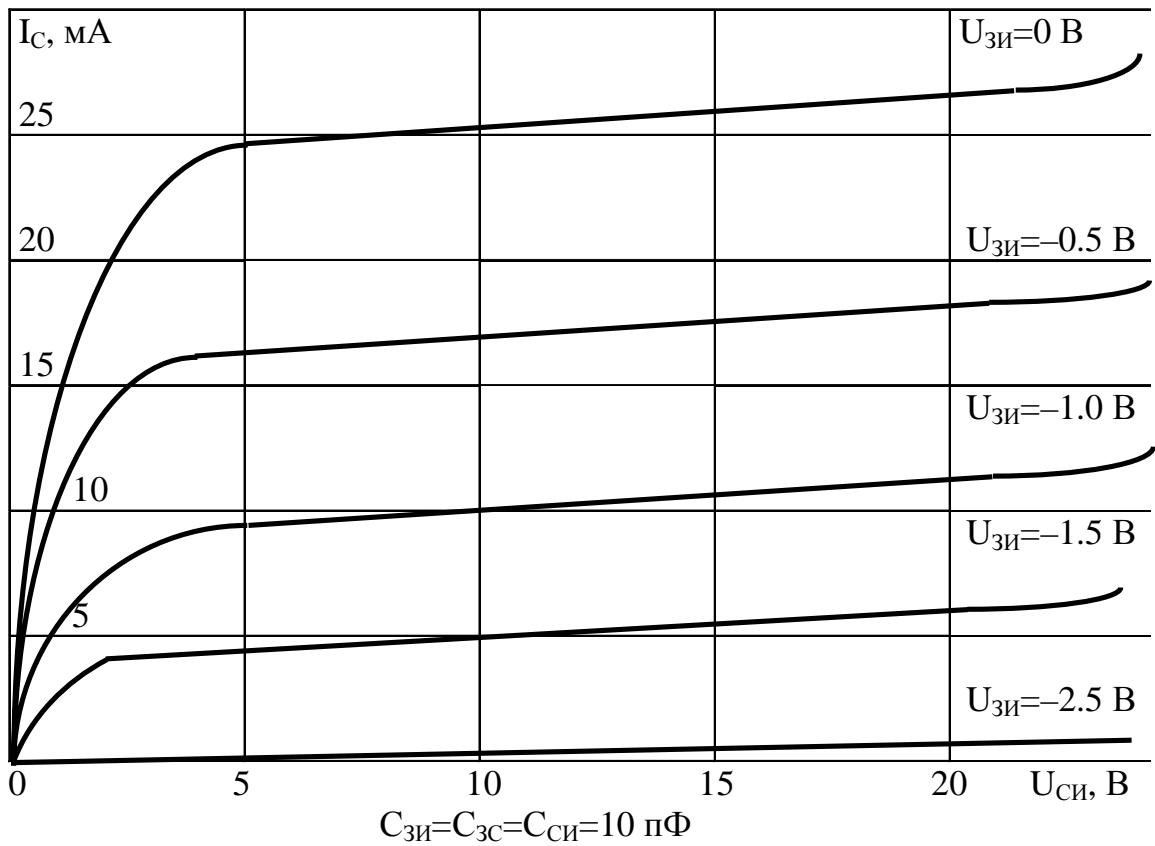
## Транзистор КТ315Г



Граничная частота коэффициента передачи тока  $f_{\beta} = 5$  МГц.  
Емкость коллекторного перехода  $C_K = 7$  пФ.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Транзистор КП302Б



### 3 КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО АНАЛОГОВОЙ СХЕМОТЕХНИКЕ

Целью лабораторного практикума является приобретение навыков сборки и испытания аналоговых электронных схем на экране персонального компьютера с помощью пакета Electronics Workbench (WEWB4). Обязательным является наличие ручного манипулятора типа «мышь». Программа моделирует лабораторный стол с макетом, источниками питания и необходимым набором контрольно-измерительной аппаратуры.

Реализуется полная имитация органов управления и экранов измерительных приборов. Использование компьютерных моделей графопостроителя (Bode Plotter) и двухлучевого осциллографа (Oscilloscope) делает процесс испытания электронных цепей более наглядным, чем в реальной лаборатории. Дословно workbench переводится как рабочий стол или верстак. Будем и в дальнейшем использовать эту аналогию. Подробное описание Electronics Workbench можно получить при нажатии клавиши F1 (Help).

Получите от преподавателя вариант задания  $N$  для вашей подгруппы. По каждой лабораторной работе необходимо представить отчет в виде текстового файла. Для этого фиксируйте основные результаты эксперимента, отвечайте на контрольные вопросы и вопросы по пунктам программы лабораторных работ. Чтобы вставить в отчет формата Word схему или осциллограмму с экрана WEWB4, выберите строку Copybits меню Edit и, натянув левой кнопкой мышки прямоугольник на желаемый фрагмент изображения, отпустите ее. После чего картинка вставляется в Word из буфера.

#### Описание аналогового модуля «Electronics Workbench»

Экран монитора содержит основное окно, в котором собирается исследуемая цепь, над которым размещены основное меню, панель инструментов и панель элементов. Активизация собранного устройства производится нажатием кнопки Пуск, имитирующей включение источника питания.

В качестве компонентов, из которых собирается исследуемая цепь, используются резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, транзисторы, операционные усилители, а также источники постоянного напряжения, клеммы и заземления. Все эти компоненты вы найдете в выпадающих подменю панели элементов *Passive* и *Active*.

Процесс макетирования и испытания исследуемой схемы включает в себя следующие этапы:

- 1) выбор компонентов;
- 2) размещение их на плате;
- 3) соединение компонентов проводниками;

- 4) подключение измерительных приборов;
- 5) нажатие на кнопку I-O (ПУСК) для активизации цепи.

Установите курсор мышки на необходимый компонент так, чтобы он принял форму ладони. Нажав левую кнопку, тяните мышкой деталь на требуемое место платы и отпустите кнопку. Таким путем на плате устанавливаются необходимые детали, источники питания и измерительные приборы. Они имеют клеммы для подключения проводов. Установите курсор на клемму одного компонента и тяните провод мышкой при нажатой левой кнопке до клеммы другого компонента, после чего отпустите кнопку. Проводник соединит указанные клеммы, изгибаясь под прямыми углами. Если к какой-либо точке схемы необходимо подключить несколько компонентов или приборов, из ящика деталей берут специальные соединительные клеммы с четырьмя контактами для проводов. Не забывайте заземлять источники питания и измерительные приборы.

Многие операции выполняются над компонентами схемы, отмеченными в красный цвет щелчком левой кнопки мыши. Такие компоненты можно удалить (Ctrl+X или Del), повернуть на 90 градусов (Ctrl+R). Эти действия выполняются и над группой отмеченных объектов.

Для задания требуемых значений параметров установленного в схему компонента (например, сопротивления резистора или емкости конденсатора) надо отметить его и, дважды щелкнув левой кнопкой мыши, вызвать соответствующее меню. В поле ввода ввести с клавиатуры число с точкой в качестве разделителя целой и дробной части, в поле размерности движением мышки установить требуемую размерность физических величин.

Для раскрытия лицевой панели прибора надо дважды щелкнуть левой кнопкой мышки. Теперь с помощью мышки можно активизировать требуемые кнопки прибора, установить значения и размерности генерируемых и контролируемых величин.

После сборки цепи, задания всех параметров компонентов и измерительных приборов, попытайтесь протестировать ее работу нажатием кнопки ПУСК. Если схема собрана неверно, появляется соответствующий комментарий и необходимо устранить ошибку.

При нажатии кнопки ПУСК программа решает матричные уравнения цепи и находит напряжения и токи во многих точках в течение определенного интервала времени, которые можно наблюдать с помощью измерительных приборов.

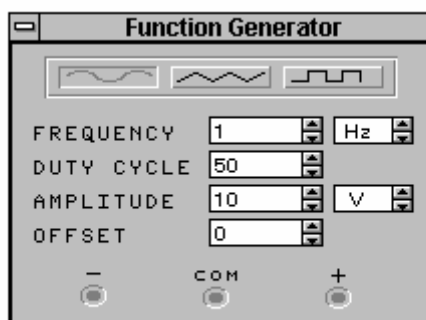
## Контрольно-измерительные приборы:

### МУЛЬТИМЕТР (Multimeter)



Используется для измерения тока, напряжения, сопротивления и отношения амплитуд сигналов в дБ. В режиме (~) измеряется действующее значение переменной составляющей напряжения или тока, в режиме (–) – среднее значение (постоянная составляющая).

### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР (Function Generator)



Является источником сигналов синусоидальной, треугольной и прямоугольной формы. Значение частоты (frequency) может быть выбрано от 1 до 999 в диапазоне от Гц до МГц. Относительная длительность импульсов треугольной и прямоугольной формы (duty cycle) может составлять от 1 до 99 процентов периода.

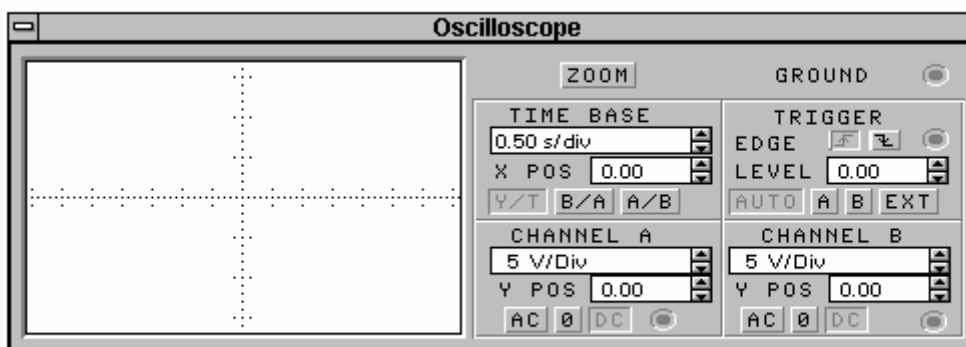
Регулируются амплитуда (amplitude) генерируемых колебаний (величина, равная половине полного перепада) и постоянная составляющая (уровень offset).

### ОСЦИЛЛОГРАФ (Oscilloscope)

Позволяет наблюдать два исследуемых сигнала (channel A и channel B) одновременно. Если при подключении входов к цепи выбрать цветные проводники (дважды щелкнув мышкой, установленной на проводник, можно вызвать меню для изменения его цвета), то и осциллограммы каналов A и B будут окрашены в те же цвета.

Шкала делений по оси X регулируется от 0.1 нс/дел до 1 с/дел. Для того, чтобы просмотреть на экране осциллографа один период частоты 1 кГц, нужно установить TIME BASE, равное 0.1 мс/дел. Используйте автоколебательный режим запуска развертки (auto).

Масштаб по оси Y задается независимо для каждого канала (входной синусоидальный сигнал амплитудой 1 В займет весь экран, если выставлен масштаб 0.5 В/дел).

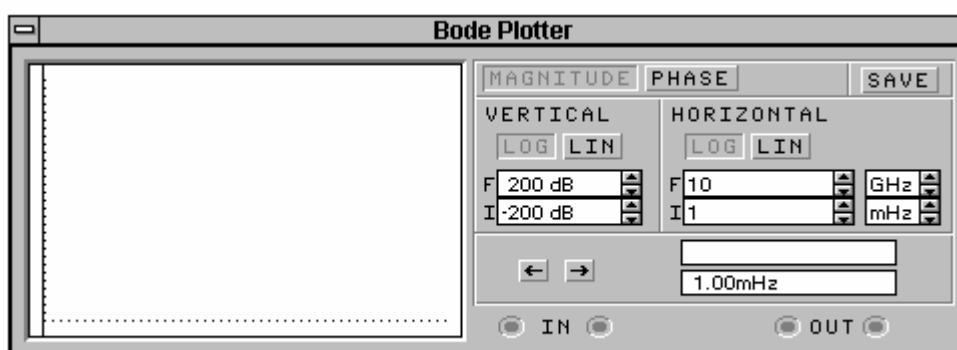


Возможно наблюдение только переменной составляющей сигналов (режим AC) или совместно с постоянным уровнем (режим DC), смещение каждого из сигналов по вертикали, чтобы исключить их наложение на экране.

Щелчок по клавише ZOOM (лупа) приводит к появлению на экране увеличенных осциллограмм и двух визиров (1 – красный и 2 – желтый), с помощью которых производится цифровой отсчет амплитудных и временных параметров сигналов в двух точках, а также их разности. Выход из режима ZOOM осуществляется нажатием клавиши REDUCE.

### ПЛОТТЕР (Bode Plotter)

Используется для снятия амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик цепей. Подключается ко входу и выходу исследуемой цепи. В дополнение к плоттеру в схеме должен быть источник сигнала.



На лицевой панели прибора предусмотрена возможность регулировки нижней и верхней частот сканирования, диапазона изменения амплитуд и фаз как в обычном, так и в логарифмическом масштабе.

Возможно чтение частоты и амплитуды в любой точке характеристики, если с помощью мышки установить в нужную точку экрана плоттера специальный визир, предварительно совпадающий с осью ординат.

## Лабораторная работа №3

### 3.1 Бестрансформаторные выходные каскады УНЧ

**Цель работы.** Целью лабораторной работы является экспериментальное исследование бестрансформаторных выходных каскадов УНЧ: с питанием от однополярного и двухполярного источника, в режимах классов *B* и *AB*, с различными цепями ООС и ПОС, с квазидополнительной симметрией. Оценивается КПД каскада при максимально достижимой неискаженной амплитуде синусоидального выходного сигнала. Схемы исследуемых усилителей представлены на рис. 1 и 2.

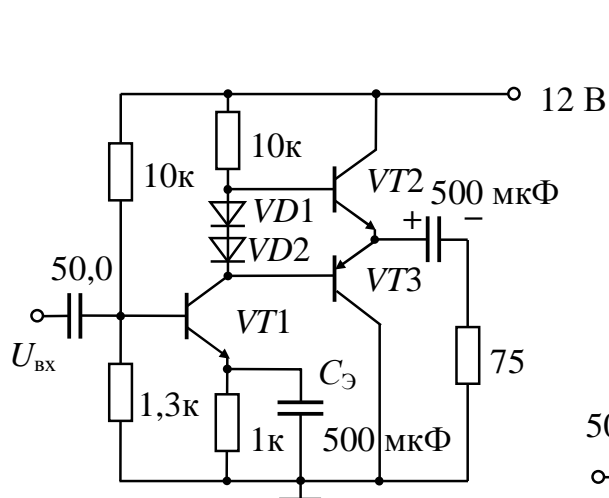


Рис. 1

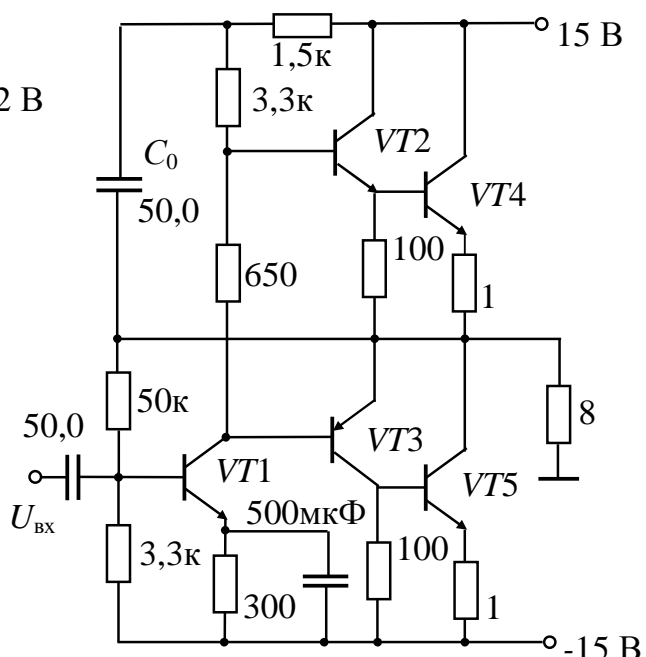


Рис. 2

### Программа работы

1. Для выходного каскада с однополярным источником питания в режиме класса *B* (диоды *VD1* и *VD2* закорачивают перемычкой):

- оценить координаты рабочих точек транзисторов;
- оценить коэффициент усиления по напряжению на средних частотах каскада на транзисторе *VT1* без ООС и с ней (удаляют из схемы конденсатор *Cэ*). Сравнить их со значениями, рассчитанными теоретически;
- сравнить сигналы на коллекторе *VT1* и на нагрузке при слабой и полной раскатке выходного каскада.

2. Для выходного каскада с однополярным источником питания в режиме класса *AB* (рис. 1):

- оценить координаты рабочих точек транзисторов;

- сравнить сигналы на коллекторе  $VT1$  и на нагрузке. Оценить амплитуду максимального неискаженного выходного сигнала. Оценить коэффициент полезного действия выходного каскада;

- снять амплитудно-частотную характеристику УНЧ.

3. Для выходного каскада с двухполярным источником питания (рис. 2):

- убедиться, что исходное напряжение в точке покоя на нагрузке равно нулю;

- выставить начальный ток транзисторов  $VT4$  и  $VT5$  в режиме  $AB$  порядка 5–10 % от  $E/R_n$ ;

- оценить коэффициент усиления по напряжению, максимальную амплитуду неискаженного синусоидального напряжения на выходе и КПД в схеме без вольтодобавки (удаляют конденсатор  $C_0$ );

- оценить коэффициент усиления по напряжению, максимальную амплитуду неискаженного синусоидального напряжения на выходе и КПД в схеме с положительной обратной связью;

- снять осциллограммы напряжений на зажимах вольтодобавочного конденсатора  $C_0$ , оценить постоянное напряжение на этом конденсаторе;

- снять и объяснить ход амплитудно-частотной характеристики коэффициента усиления по напряжению в схемах с ПОС и без нее.

### Контрольные вопросы

1. Оценить максимальную мощность и КПД выходного каскада УНЧ по результатам эксперимента, представленным на рис. 3.

2. Как рассчитать максимальную температуру перехода транзистора выходного каскада?

3. Как оценить коэффициент нелинейных искажений синусоидального входного сигнала на выходе усилителя?

4. Перечислить отличительные особенности выходных каскадов по сравнению с каскадами предварительного усиления.

5. Назовите достоинства и недостатки трансформаторных выходных каскадов.

6. С какой целью в выходных каскадах используются двухтактные усилители мощности?

### Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы исследуемых усилительных каскадов, основные экспериментальные данные, выводы по пунктам программы работы, а также ответы на контрольные вопросы. Результаты моделирования в виде экспериментальных схем и осциллограмм вставляются в текст отчета, который оформляется как документ формата Word.



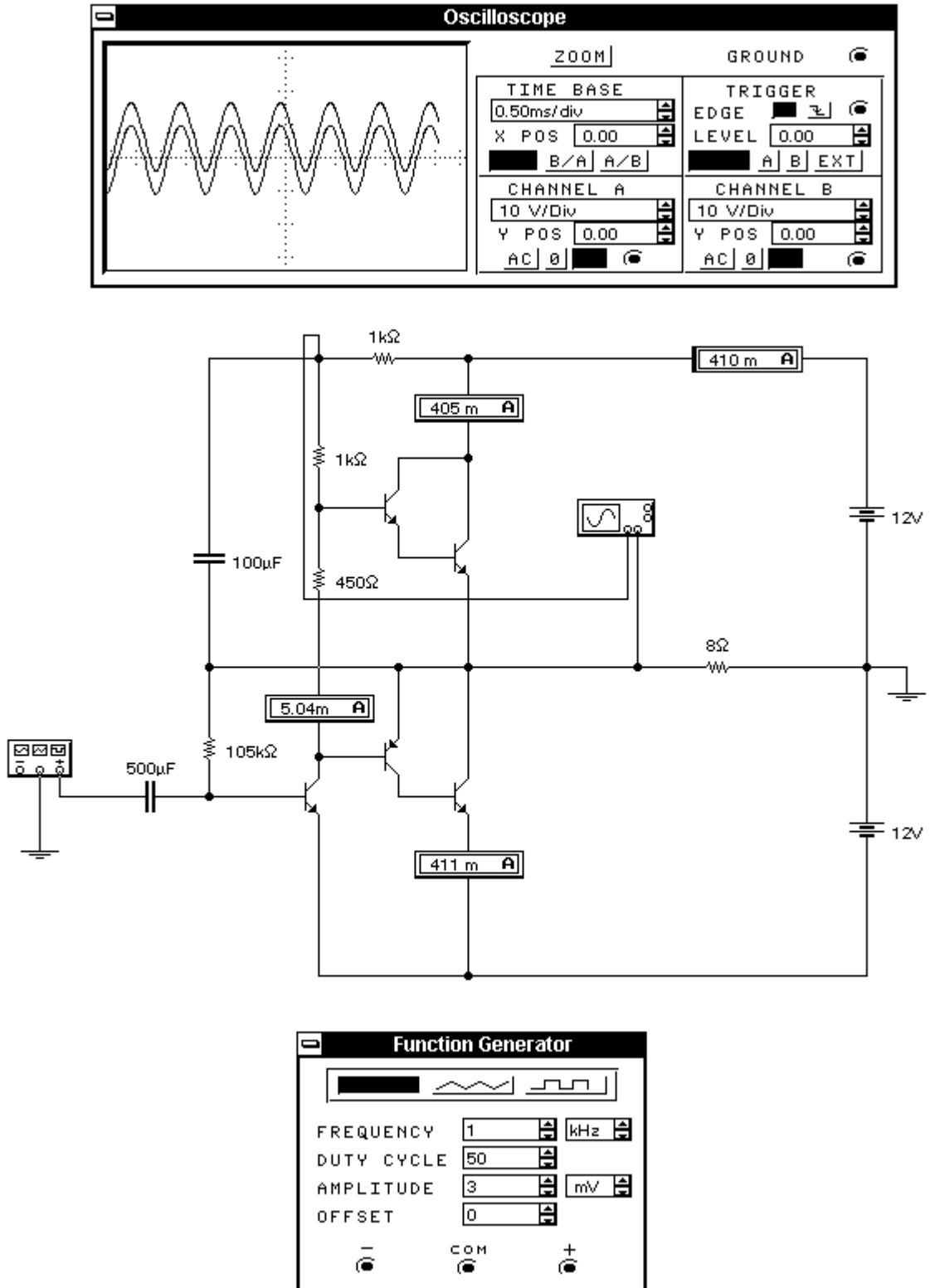


Рис. 3 – Результаты макетирования выходного каскада

## Лабораторная работа №4

### 3.2 Усилители и преобразователи сигналов на операционных усилителях

**Цель работы.** Целью лабораторной работы является экспериментальное исследование аналоговых устройств, построенных с использованием операционных усилителей (УПТ, фазовращатель, интегратор, ограничитель, генератор напряжения прямоугольной и треугольной формы).

#### Программа работы

1. Собрать схему неинвертирующего УПТ на идеальном операционном усилителе (рис. 1). На вход каскада подать синусоидальный сигнал амплитудой 0,5 В и частотой 1кГц.

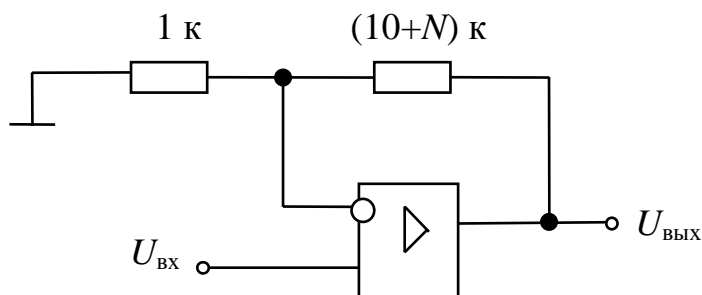


Рис. 1

Зафиксировать напряжение в точке покоя. Оценить коэффициент усиления по напряжению и сравнить с расчетным значением.

Увеличить амплитуду  $U_{ВХ}$  до 2 В. Объяснить временную диаграмму выходного напряжения. Снять амплитудную характеристику каскада.

Задать операционному усилителю напряжение смещения 5 мВ. Измерить уровень  $U_{ВЫХ}$  при нулевом напряжении на входе и сравнить его с расчетным значением.

2. Собрать схему фазовращателя (рис. 2). Снять его ЛАЧХ и ЛФЧХ. Определив передаточную функцию устройства, получить выражения для частотной и фазовой характеристик фазовращателя и сравнить их с экспериментальными, измерить фазовое запаздывание выходного сигнала на частотах 50 и 500 Гц.

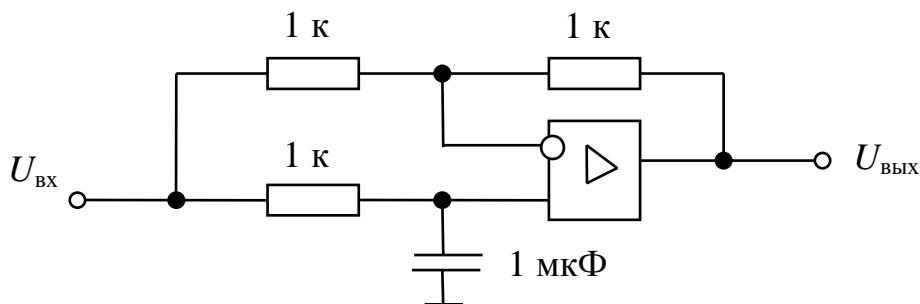


Рис. 2

3. Собрать схему интегратора на идеальном ОУ (рис. 3). Проанализировать осциллограмму  $U_{\text{ВЫХ}}$  при подаче на вход симметричных разнополярных прямоугольных импульсов с амплитудой 1 В и частотой 500 Гц.

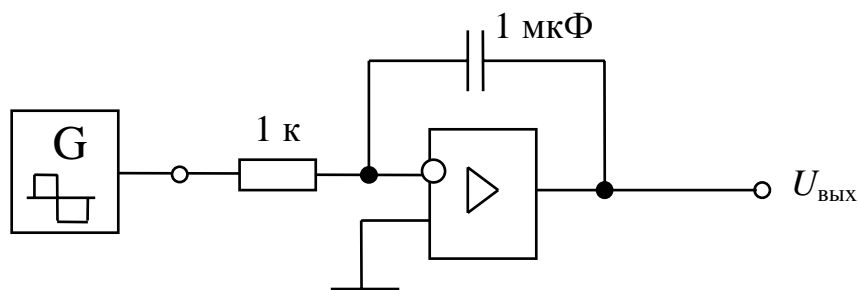


Рис. 3

Проанализировать переходный процесс изменения выходного напряжения при относительной длительности импульсов 40 %.

4. Проанализировать диаграммы выходных напряжений при подаче синусоидальных сигналов амплитудой 5 В на входы каскадов, изображенных на рис. 4. Повторить эксперимент, изменив полярность включения диода.

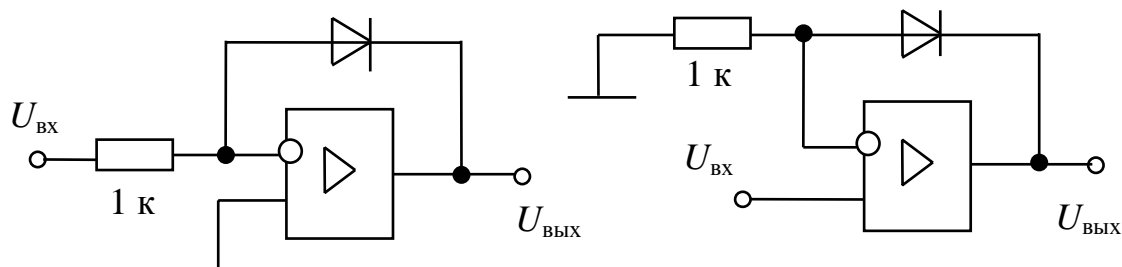


Рис. 4

5. Собрать и испытать генератор напряжений треугольной и прямоугольной формы (рис. 5). Напряжение смещения установить равным  $U_{\text{см}}=1$  мВ. Оценить частоту и амплитуду генерируемых колебаний. Сравнить с расчетными значениями. Привести в отчете совмещенные временные диа-

граммы  $U_{\text{ВЫХ1}}$  и  $U_{\text{ВЫХ2}}$ . Какие устройства собраны на левом и правом операционном усилителе? Почему схема не возбуждается на идеальных операционных усилителях при  $U_{\text{см}}=0$ ?

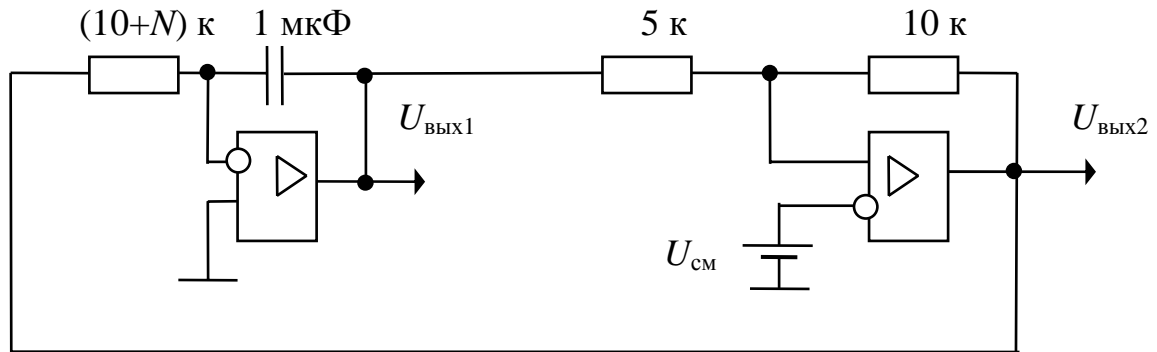


Рис. 5

### Контрольные вопросы

1. Каким путем можно уменьшить ошибку сдвига и дрейфа нулевого уровня УПТ за счет влияния входных токов реального ОУ?
2. Как оценить верхнюю рабочую частоту на уровне  $M_{\text{в}}=3$  дБ усилителя постоянного тока, собранного по схеме рис. 1 на реальном ОУ?
3. Назовите достоинства и недостатки неинвертирующего УПТ по сравнению с инвертирующим.
4. Какие требования предъявляются к резисторам измерительных усилителей, выполненных на ОУ?
5. Каким путем устраняется ошибка сдвига напряжения на выходе ОУ?

### Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы исследуемых усилительных каскадов, основные экспериментальные данные и их сравнение с расчетными величинами, выводы по пунктам программы работы, а также ответы на контрольные вопросы. Результаты моделирования в виде экспериментальных схем и осциллограмм вставляются в текст отчета, который оформляется как документ формата Word.

## Лабораторная работа №5

### 3.3 Избирательные усилители и генераторы гармонических колебаний

**Цель работы.** Целью лабораторной работы является экспериментальное исследование характеристик избирательного усилителя с параллельным и последовательным колебательным контуром и построение  $LC$ - и  $RC$ -генераторов гармонических колебаний.

#### Программа работы

1. Собрать избирательный усилитель с параллельным колебательным контуром (рис. 1, где  $N$  – номер варианта от 0 до 9). Снять ЛАЧХ и ЛФЧХ. Оценить резонансную частоту, коэффициент усиления на частоте резонанса и добротность каскада. Добротность определяется отношением резонансной частоты к полосе пропускания на уровне 3 дБ.

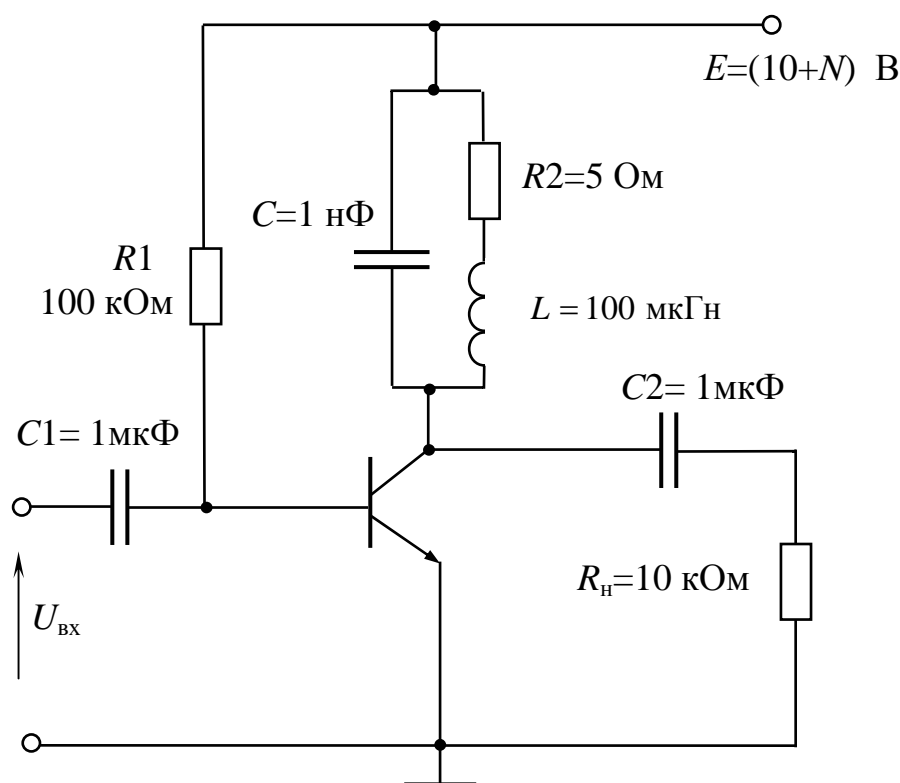


Рис. 1 – Резонансный усилитель с параллельным  $LC$ -контуром

2. Исследовать частотную характеристику избирательного усилителя с последовательным колебательным контуром (рис. 2).  $C=1+N$  нФ,  $L=200$  мкГн,  $R_1=10$  Ом,  $R_2=10$  кОм. Оценить избирательность усилителя по отношению ко второй гармонике резонансной частоты.

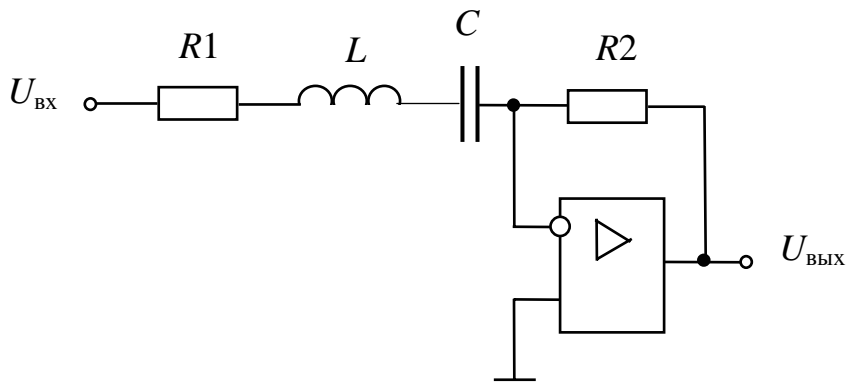


Рис. 2 – Избирательный усилитель с последовательным  $LC$ -контуром

3. Собрать трехточечный  $LC$ -генератор по схеме Колпитца (рис. 3).  $C_1=C_2=100$  пФ,  $R_1=R_2=5$  кОм,  $L=1+N$  мГн,  $E=E_1=10$  В. Пронаблюдать работу схемы. Оценить амплитуду и частоту генерируемых колебаний. Объяснить явления, которые происходят при замене резистора  $R_1$  номиналом 5 кОм на резисторы номиналом 4 кОм и 6 кОм?

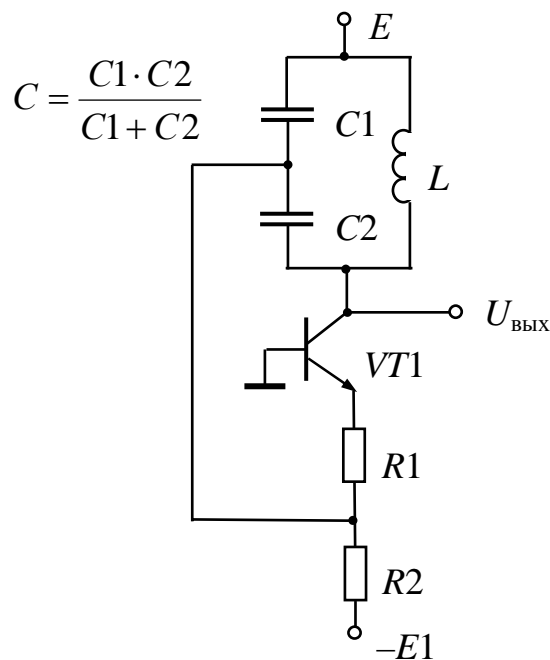


Рис. 3 – Трехточечный генератор

4. Собрать пассивную цепь (рис. 4) и снять ее ЛАЧХ и ЛФЧХ (логарифмические амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики). Принять  $R=20+N$  кОм,  $C=1000$  пФ. Зафиксировать частоту квазирезонанса и сравнить ее с расчетным значением ( $\omega_0=1/RC$ ). Оценить коэффициент передачи на этой частоте.

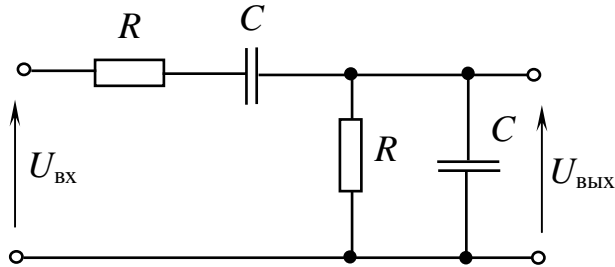


Рис. 4

5. Собрать и испытать генератор гармонических колебаний с мостом Вина (рис. 5). Принять  $R=20+N$  кОм,  $C=1000$  пФ. Источник  $E$  напряжением 5 В используется совместно с диодом для ограничения амплитуды колебаний. Оценить частоту и амплитуду генерируемых колебаний. Во сколько раз амплитуда колебаний на неинвертирующем входе ОУ меньше, чем на выходе?

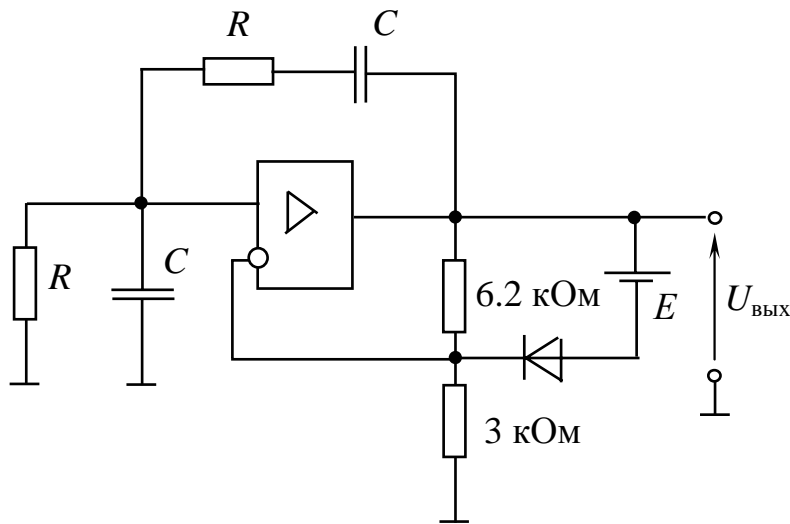


Рис. 5 – LC-генератор с мостом Вина

## Контрольные вопросы

1. Назовите известные вам области применения избирательных усилителей.
2. Поясните различие между фильтрами верхних и нижних частот.
3. Нарисуйте зависимость от частоты модуля комплексного сопротивления последовательного и параллельного колебательных контуров.
4. Сформулируйте условия баланса фаз и амплитуд, необходимые для возникновения колебаний в автогенераторах.
5. Какие средства используются для получения хорошей формы синусоидальных колебаний в генераторах с мостом Вина?

## Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы исследуемых устройств, основные экспериментальные данные и их сравнение с расчетными величинами, выводы по пунктам программы работы, а также ответы на контрольные вопросы. Результаты моделирования в виде экспериментальных схем и осциллограмм вставляются в текст отчета, который оформляется как документ формата Word.



## Лабораторная работа №6

### 3.4 Измерительные устройства на операционных усилителях

**Цель работы.** Целью лабораторной работы является экспериментальное исследование стабилизатора тока, пикового детектора, прецизионного выпрямителя среднего значения, построенных с использованием операционных усилителей. Производится сравнение экспериментальных данных с основными параметрами устройств, рассчитанных теоретически.

#### Программа работы

1. Собрать устройство, показанное на рис. 1, полагая  $U_2 = (5 + N)$  В,  $U_1 = (U_2 - 3)$  В,  $R = 10$  кОм,  $R_H = 1$  кОм. Вариант задания  $N = 0-9$  задает преподаватель. Убедиться, что ток в нагрузке равен  $i_H = \frac{U_2 - U_1}{R}$ . Изменяя  $R_H$  в диапазоне до 5 кОм, убедиться, что ток  $i_H$  не зависит от сопротивления нагрузки. При какой величине  $R_H$  напряжение на выходе ОУ достигает уровня положительного ограничения? Назвать типы обратных связей, используемых в устройстве.

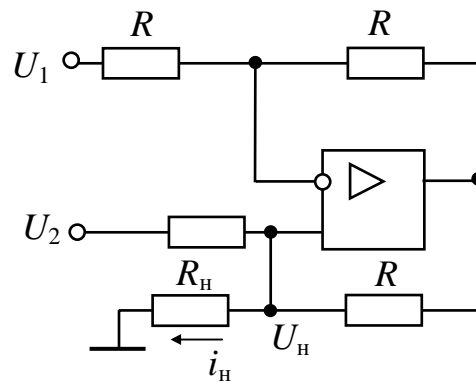


Рис. 1 – Усилитель с токовым выходом

2. Собрать пиковый детектор, показанный на рис. 2. Подав на вход синусоидальный сигнал амплитудой  $(1+N)$  В и частотой  $100(1+N)$  Гц зафиксировать осциллограммы входного и выходного напряжений. Увеличить скачком амплитуду  $U_{вх}$  на 1 В и проследить за изменением  $U_{вых}$ . Уменьшить скачком амплитуду  $U_{вх}$  на 1 В и проследить за изменением  $U_{вых}$ . Что происходит при нажатии кнопки S1? Пояснить назначение транзистора VT1.

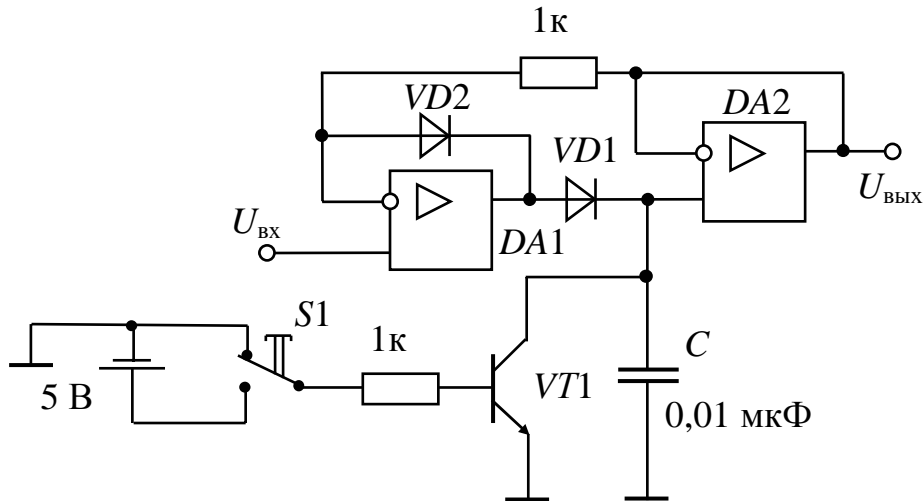


Рис. 2 – Пиковый детектор положительного уровня

3. Собрать устройство, показанное на рис. 3 при  $R1=R2=R3=10$  кОм. Подать на вход синусоидальный сигнал амплитудой  $(1+N)$  В и частотой 1 кГц. Снять и объяснить осциллограммы напряжений  $U_{ВХ}$ ,  $U_{ВЫХ}$  и сигнала на выходе операционного усилителя  $DA1$ . Что произойдет при увеличении сопротивления резистора  $R3$  в два раза? Посмотреть осциллограммы сигналов при треугольной форме входного напряжения.

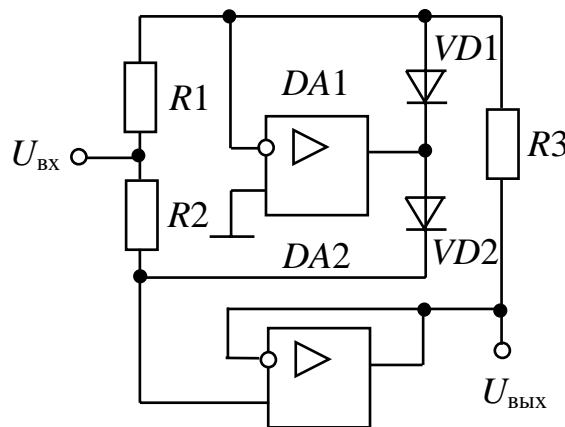


Рис. 3 – Выпрямитель среднего значения

### Контрольные вопросы

1. Что дает применение операционных усилителей в измерительных устройствах?
2. Привести пример устройства для измерения постоянного напряжения с помощью стрелочного прибора.

3. Привести пример устройства для измерения сопротивления резисторов с помощью стрелочного прибора.

### **Содержание отчета**

Отчет должен содержать схемы исследуемых устройств, основные экспериментальные данные и их сравнение с расчетными величинами, выводы по пунктам программы работы, а также ответы на контрольные вопросы. Результаты моделирования в виде экспериментальных схем и осциллограмм вставляются в текст отчета, который оформляется как документ формата Word.

## Лабораторная работа №7

### 3.5 Стабилизаторы постоянного напряжения

**Цель работы.** Целью лабораторной работы является экспериментальное исследование параметрического стабилизатора постоянного напряжения, выполненного на кремниевом стабилитроне, и компенсационных стабилизаторов последовательного типа. Производится оценка основных параметров стабилизаторов – коэффициента стабилизации напряжения и выходного сопротивления.

#### Программа работы

1. Собрать экспериментальную установку (рис. 1) для исследования параметрического стабилизатора напряжения на кремниевом стабилитроне.

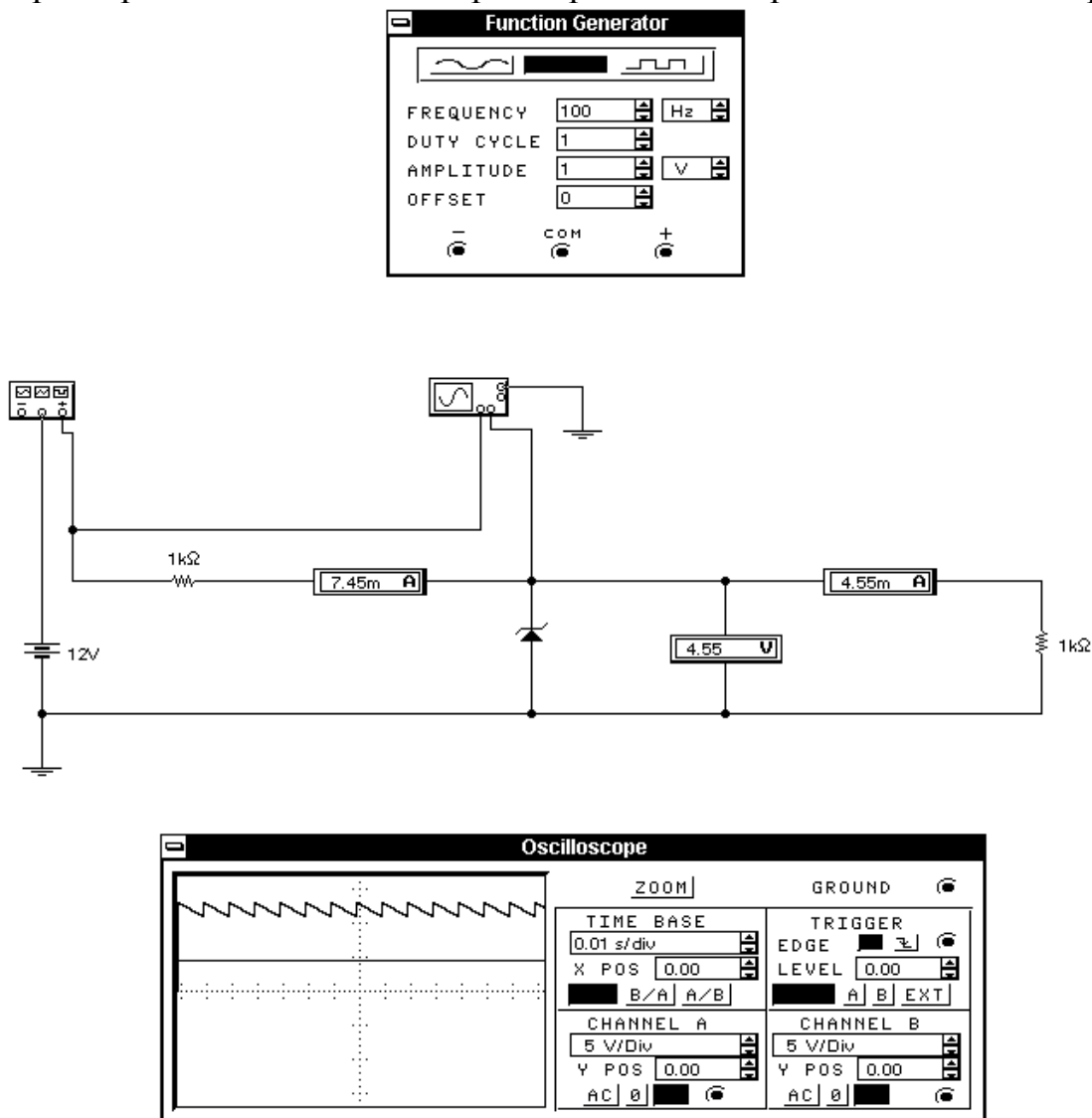


Рис. 1 – Параметрический стабилизатор напряжения

Генератор имитирует пульсации входного напряжения (частота 100 Гц, амплитуда 1 В), которые обычно остаются на выходе сетевого выпрямителя с фильтром. Стабилизатор является электронным сглаживающим фильтром, эффективно подавляющим эти пульсации.

Оценить коэффициент стабилизации напряжения. На сколько изменится величина выходного напряжения при изменении входного на 1 В? Оценить величину выходного сопротивления стабилизатора (изменение выходного тока обеспечить увеличением сопротивления нагрузки до 2 кОм).

Что происходит при уменьшении сопротивления нагрузки до 500 Ом? Что необходимо сделать, чтобы обеспечить качественную работу стабилизатора при таком сопротивлении нагрузки?

2. Оценить основные параметры компенсационного стабилизатора напряжения, выполненного по простейшей схеме (рис. 2).

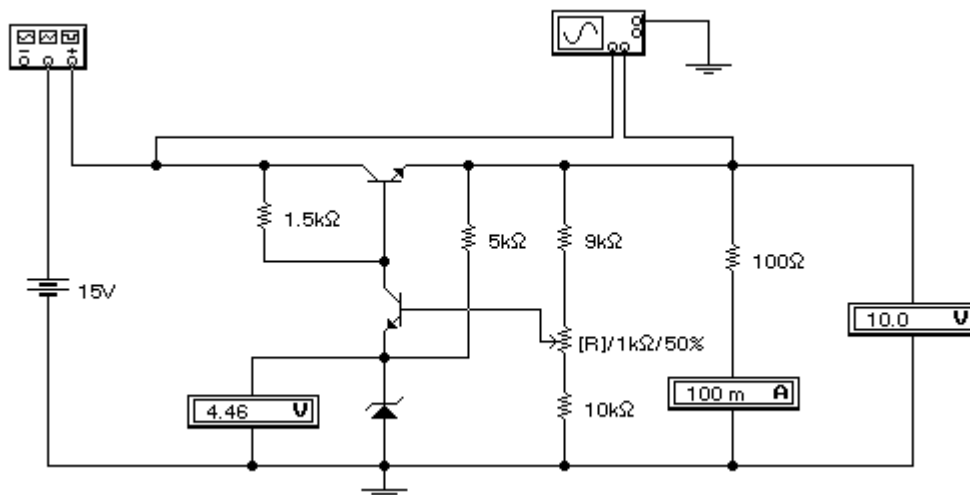


Рис. 2 – Компенсационный стабилизатор напряжения

Изменить параметры схемы так, чтобы обеспечить стабилизацию выходного напряжения  $U_{\text{вых}}=(11+N)$  В при токе в нагрузке 100 мА.

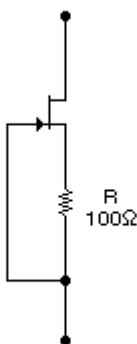


Рис. 3 – Стабилизатор тока

Заменить резистор в цепи базы регулирующего транзистора стабилизатором тока (рис. 3), выполненным на полевом транзисторе. Величину стабилизируемого тока подбором сопротивления резистора  $R$  установить равной 5 мА. Оценить коэффициент стабилизации и выходное сопротивление стабилизатора и сравнить их с параметрами схемы простейшего компенсационного стабилизатора.

3. Собрать экспериментальную схему для исследования компенсационного стабилизатора постоянного напряжения на операционном усилителе (рис. 4) при  $L=200$  мГн,  $C=100$  мкФ,  $R_1=2$  кОм,  $R_2=15$  кОм,  $R_3=10$  кОм,  $R_H=100$  Ом. Напряжение стабилизации опорного источника выбрать равным 5 В. Параметры генератора синусоидального напряжения настроить на 20 В, 60 Гц. Зафиксировать осциллограммы напряжений  $U_{ВХ}$  и  $U_{ВЫХ}$ . Оценить коэффициент сглаживания пульсаций  $LC$ -фильтра и электронного фильтра, роль которого выполняет стабилизатор напряжения. Рассчитать коэффициент стабилизации напряжения, измерив уровень пульсаций и величины  $U_{ВХ}$  и  $U_{ВЫХ}$ . Экспериментально оценить величину выходного сопротивления стабилизатора, уменьшив сопротивление нагрузки до 50 Ом.

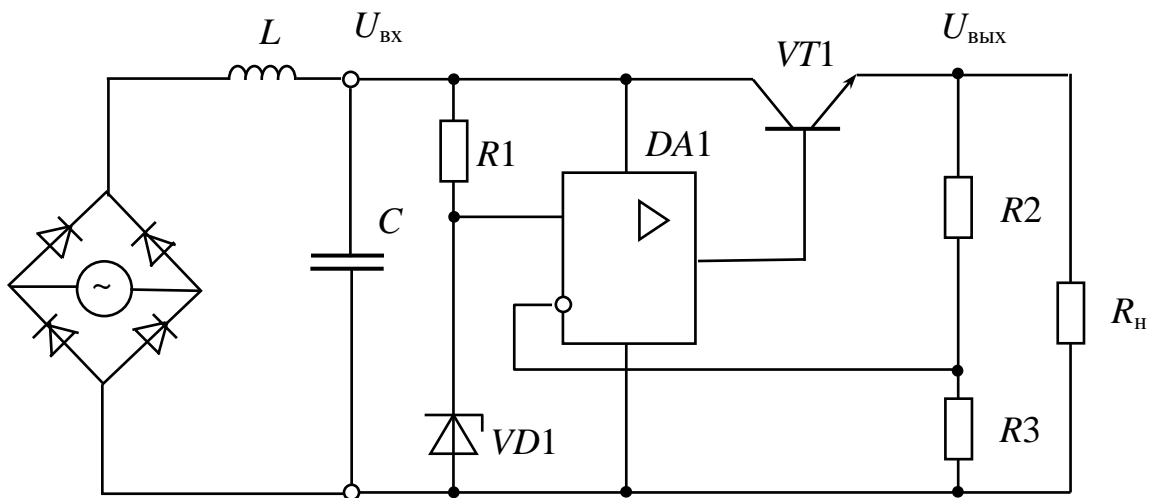


Рис. 4 – Стабилизатор напряжения на ОУ

### Контрольные вопросы

1. Дайте классификацию стабилизаторов постоянного напряжения.
2. Каким путем организуется защита компенсационного стабилизатора последовательного типа от коротких замыканий в нагрузке?
3. Приведите пример построения схемы прецизионного источника опорного напряжения величиной 10,24 В.
4. Какие параметры схем определяют температурную нестабильность выходного напряжения стабилизаторов?

### Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы исследуемых устройств, основные экспериментальные данные и их сравнение с расчетными величинами, выводы по пунктам программы работы, а также ответы на контрольные вопросы. Результаты моделирования в виде экспериментальных схем и осциллограмм вставляются в текст отчета, который оформляется как документ формата Word.

#### 4 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Задача 1.** Фазовый сдвиг сигнала частотой 100 кГц на выходе УПТ, передаточная функция которого описывается соотношением

$$K(p) = \frac{K_0}{1 + p\tau},$$

составил минус 60 эл. град. Оценить коэффициент частотных искажений УПТ на этой частоте и время установления фронта выходного сигнала, если на вход УПТ подать прямоугольный импульс.

**Решение.** Из выражения для фазовой характеристики

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \omega\tau = -\pi/3 \text{ определяем } \omega\tau = \sqrt{3} \text{ и}$$

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{2\pi \cdot 100 \cdot 10^{-3}} = 2,76 \text{ мкс.}$$

Рассчитаем коэффициент частотных искажений  $M = \sqrt{1 + (\omega\tau)^2} = \sqrt{1 + 3} = 2$ .

Определим время установления фронта импульса

$$t_y = 2,2\tau = 2,2 \cdot 2,76 = 6,1 \text{ мкс.}$$

**Задача 2.** На частоте  $f = 10$  Гц амплитуда синусоидального сигнала при прохождении разделительной цепи падает на 3 дБ. Оценить относительный спад вершины прямоугольного импульса длительностью  $t_{\text{и}} = 1$  мс при прохождении этой цепи.

**Решение.** Передаточная функция разделительной цепи определяется выражением  $K(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{p\tau}}$ . Трех децибелам соответствует коэффициент

частотных искажений  $M = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2} = \sqrt{2}$ , откуда следует, что постоянная времени цепи  $\tau = \frac{1}{2\pi f} = \frac{1000}{6,28 \cdot 10} = 15,92$  мс. Относительный спад

вершины импульса  $\Delta = \frac{t_{\text{и}}}{\tau} = \frac{1}{15,92} = 0,0628$  или примерно 6 %.

**Задача 3.** При подаче входного синусоидального напряжения амплитуды первых четырех гармоник сигнала на выходе двухтактного выходного каскада, работающего в режиме класса В, при выходной мощности 10 Вт составили соответственно 10 В, 2 В, 3 В и 1 В. Оценить коэффициент нелинейных искажений усилителя.

**Решение.** Коэффициент гармоник можно определить по формуле:

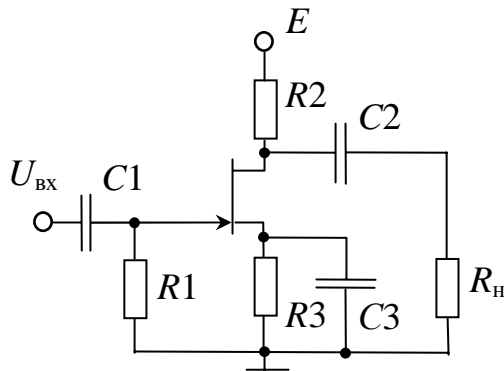
$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + U_{4m}^2}}{U_{1m}} = \frac{\sqrt{2^2 + 3^2 + 1^2}}{10} = 0,374 \text{ или } 37,4 \%$$

**Задача 4.** Оценить коэффициент полезного действия выходного каскада, если амплитуды напряжения и тока синусоидального сигнала в нагрузке равны 10 В и 1 А, а среднее значение тока в цепи источника питания напряжением  $E=15$  В составило 0,7 А.

**Решение.** КПД определяется отношением полезной мощности, отдаваемой в нагрузку, к полной мощности, потребляемой от источника питания:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\Sigma}} = \frac{U_m \cdot I_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2} \cdot EI_0} = \frac{10 \cdot 1}{2 \cdot 15 \cdot 0,7} = 0,476 \text{ или } 47,6 \%$$

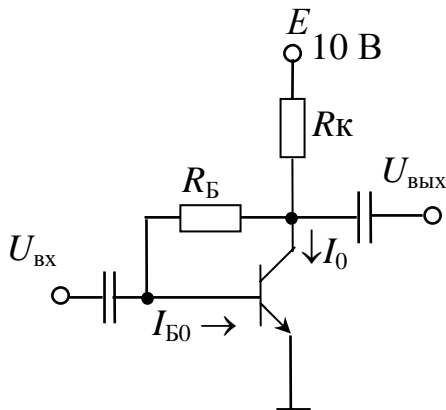
**Задача 5.** Оценить коэффициент усиления каскада в рабочем диапазоне частот, если  $\mu = 50$ ,  $R_i = 20$  кОм,  $R_2 = R_{\text{н}} = 5$  кОм.



**Решение.** Крутизна характеристик полевого транзистора определяется соотношением  $S = \mu/R_i$ , а эквивалентное сопротивление выходной цепи  $R_{\text{экв}} = R_i \parallel R_{\text{пер}}$ , где  $R_{\text{пер}} = R_2 \parallel R_{\text{н}} = 2,5$  кОм. Следовательно, коэффициент усиления на средних частотах

$$K_0 = -SR_{\text{экв}} = -\frac{\mu}{R_i} \cdot \frac{R_i \cdot R_{\text{пер}}}{R_i + R_{\text{пер}}} = -\frac{2,5 \cdot 20 \cdot 2,5}{20 + 2,5} \cong -5,6$$

**Задача 6.** Рассчитать координаты рабочей точки транзистора в схеме усилительного каскада, если  $\beta = 100$ ,  $R_{\text{к}} = 2$  кОм,  $R_{\text{б}} = 500$  кОм,  $U_{\text{ЭБ}} = 0,7$  В.



**Решение.** Рабочую точку транзистора определяют значения коллекторного тока  $I_0 = I_{\text{к}}$  и напряжения  $U_0 = U_{\text{кЭ}}$ . Их связывает следующая система уравнений:

$$E = U_0 + (I_0 + I_{\text{Б0}}) R_{\text{к}};$$

$$E = U_{\text{ЭБ}} + I_{\text{Б0}} R_{\text{б}} + (I_0 + I_{\text{Б0}}) R_{\text{к}};$$

$$I_0 = \beta I_{\text{Б0}}.$$

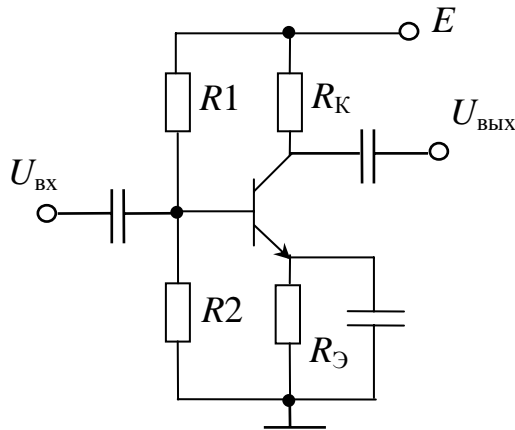


Отсюда определяем

$$I_0 = \frac{\beta(E - U_{ЭБ})}{R_B + R_K(1 + \beta)} = \frac{100(10 - 0,7)}{500 + 2 \cdot 101} = 1,32 \text{ мА};$$

$$U_0 = E - \frac{I_0 R_K (1 + \beta)}{\beta} = 10 - \frac{1,32 \cdot 2 \cdot 101}{100} = 7,33 \text{ В.}$$

**Задача 7.** Определить координаты рабочей точки транзистора в схеме усилителя, если  $\beta=100$ ,  $R_1=2R_2=10 \text{ кОм}$ ,  $E=15 \text{ В}$ ,  $R_Э=R_К=5 \text{ кОм}$ ,  $U_{ЭБ}=0,7 \text{ В}$ .



**Решение.** Определим потенциал базы транзистора, пренебрегая базовым током по сравнению с током делителя:

$$U_B = \frac{ER_2}{R_1 + R_2} = \frac{15 \cdot 5}{10 + 5} = 5 \text{ В.}$$

Рассчитаем ток эмиттера:

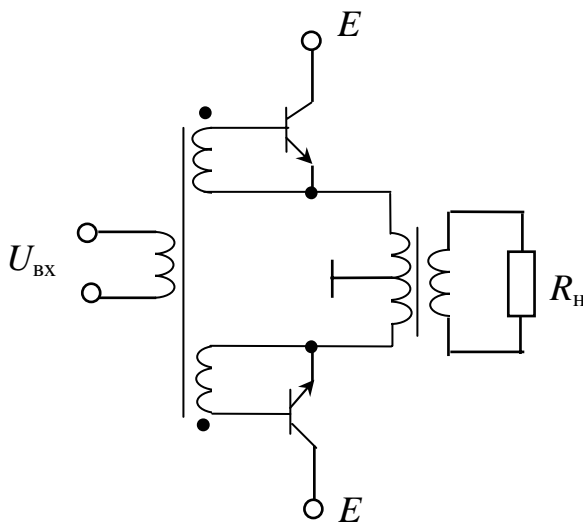
$$I_Э = \frac{U_B - U_{ЭБ}}{R_Э} = \frac{5 - 0,7}{5} = 0,86 \text{ мА.}$$

Координаты рабочей точки транзистора:

$$I_0 = I_K = I_Э \cdot \alpha = I_Э \frac{\beta}{1 + \beta} = 0,86 \cdot \frac{100}{101} = 0,85 \text{ мА};$$

$$U_0 = U_{КЭ} = E - I_0 R_K - I_Э R_Э = 15 - 4,26 - 4,3 = 6,44 \text{ В.}$$

**Задача 8.** Определить способ включения транзистора в схеме усилителя.



**Решение.**

Транзисторы включены по схеме с общим эмиттером, т.к. эмиттер является общим электродом для источника сигнала и нагрузки.

На рисунке представлен трансформаторный двухтактный выходной каскад на транзисторах по схеме с ОЭ в режиме класса В.

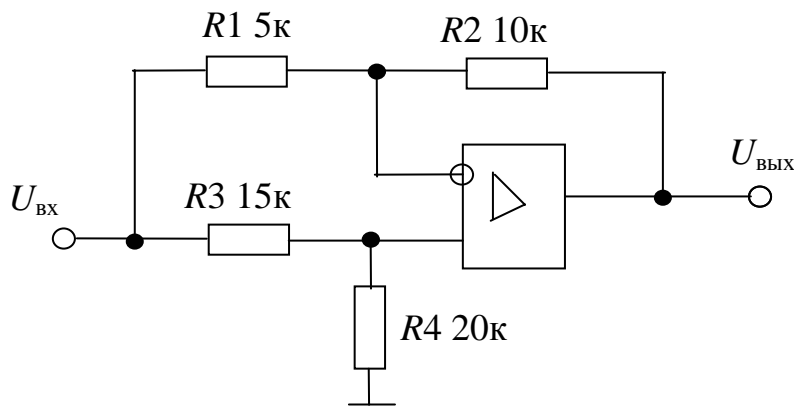
**Задача 9.** Какой глубины ООС нужно ввести в усилитель, чтобы уменьшить погрешность коэффициента усиления до 1%, если температурная нестабильность  $\delta K_{\text{темп}}=50\%$ , технологический разброс  $\delta K_{\text{техн}}=50\%$ , а погрешность коэффициента передачи цепи обратной связи  $\delta\gamma=0,5\%$ .

**Решение.** Результирующая нестабильность коэффициента усиления усилителя до введения обратной связи  $\delta K = \sqrt{\delta K_{\text{темп}}^2 + \delta K_{\text{техн}}^2} = 70,7\%$ .

Требуемая глубина обратной связи

$$A = \frac{\delta K}{\delta K_{\text{ОС}} - \delta\gamma} = \frac{70,7}{1 - 0,5} = 141,4.$$

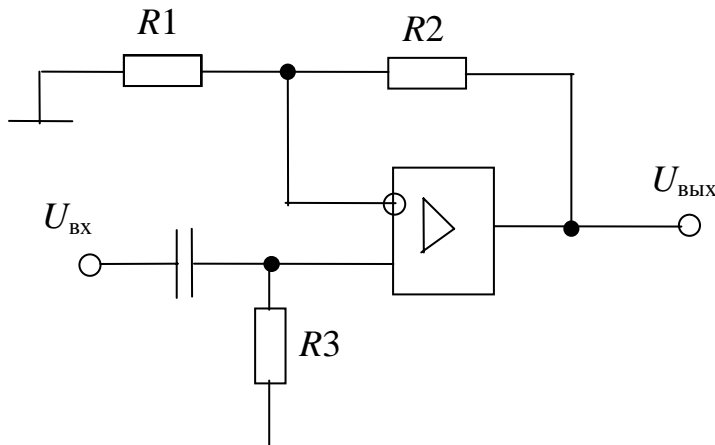
**Задача 10.** Оценить  $U_{\text{ВЫХ}}$  при  $U_{\text{ВХ}}=1$  В.



**Решение.** В данном примере используются и инвертирующее и неинвертирующее включения операционного усилителя. Входное сопротивление ОУ со стороны неинвертирующего входа практически равно бесконечности.

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \frac{R4}{R3 + R4} \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) - U_{\text{ВХ}} \frac{R2}{R1} = \frac{20}{15 + 20} \left(1 + \frac{10}{5}\right) - \frac{10}{5} = -0,29 \text{ В.}$$

**Задача 11.** Оценить возможную величину сдвига нулевого уровня на выходе операционного усилителя.



**Решение.** Сдвиг нулевого уровня обусловлен не равными нулю значениями напряжений смещения и входных токов реального ОУ. Наибольшая величина сдвига определяется суммированием модулей этих двух составляющих

$$U_{\text{ВЫХ СДВ}} = U_{\text{СМ}} \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) + \left| I_+ R3 \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) - I_- R2 \right|.$$

Если бы последовательно с  $R1$  был включен конденсатор, то по постоянному току ООС была бы более глубокой, чем по переменному. Ошибка сдвига уменьшилась бы и определялась соотношением

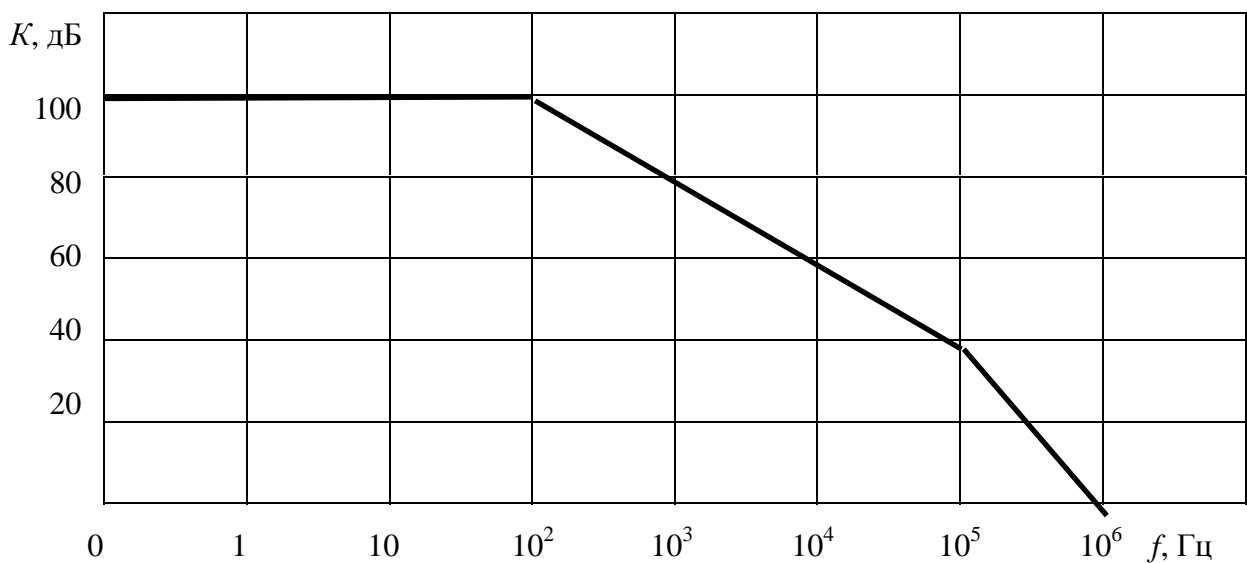
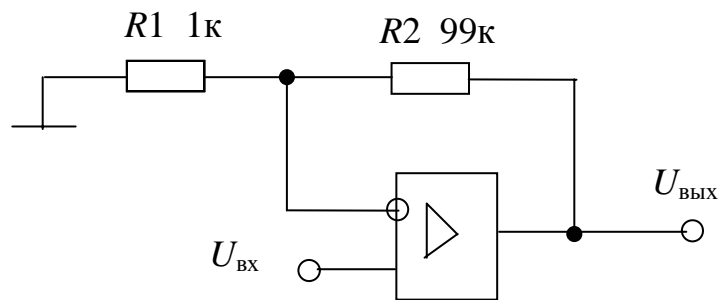
$$U_{\text{ВЫХ СДВ}} = U_{\text{СМ}} + |I_+ R3 - I_- R2|.$$

При  $R3=R2$  ошибка сдвига была бы минимальной:

$$U_{\text{ВЫХ СДВ}} = U_{\text{СМ}} + \Delta I_{\text{ВХ}} R2,$$

где  $\Delta I_{\text{ВХ}} = |I_+ - I_-|$  – разность входных токов операционного усилителя.

**Задача 12.** Оценить запас устойчивости по фазе УПТ, асимптотическая ЛАЧХ (логарифмическая амплитудно-частотная характеристика) операционного усилителя которого приведена на чертеже.



**Решение.** Коэффициент усиления УПТ равен  $K_{OC} = 1 + R2/R1 = 100$  или  $K_{OC} = 40$  дБ. Если перенести на этот уровень ось абсцисс, то изображенный на чертеже график будет соответствовать ЛАЧХ петлевого усиления  $T = K\beta$ . На частоте среза  $f = 10^5$  Гц дополнительный фазовый сдвиг примерно равен  $135^\circ$  ( $90^\circ$  за счет постоянной времени  $\tau_1$ , дающей наклон  $-20$  дБ/дек начиная с частоты  $10^2$  Гц, и  $45^\circ$  за счет постоянной времени  $\tau_2$ , увеличивающей наклон ЛАЧХ до  $-40$  дБ/дек, начиная с частоты  $f = 10^5$  Гц). Следовательно, запас устойчивости по фазе равен  $45^\circ$ .

**Задача 13.** Параллельный  $LC$ -контур с конденсатором емкостью  $C = 1$  нФ настроен на резонансную частоту  $1$  МГц. При этом полоса пропускания на уровне  $3$  дБ составила  $10$  кГц. Определить сопротивление контура на частоте  $500$  кГц.

**Решение.** Добротность контура определяется выражением

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f} = \frac{10^6}{10 \cdot 10^3} = 100.$$

Волновое сопротивление контура

$$\rho = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{6.28 \cdot 10^6 \cdot 10^{-9}} = 159,2 \text{ Ом.}$$

Сопротивление активных потерь, равное сопротивлению контура на резонансной частоте

$$R = \rho Q = 15920 \text{ Ом.}$$

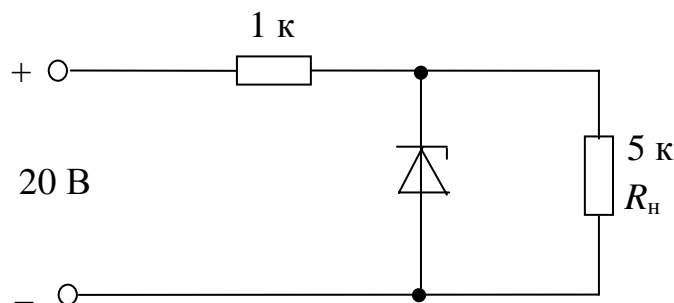
Относительная расстройка частоты

$$X = \frac{f_0}{fn} - \frac{fn}{f_0} = \frac{1000}{500} - \frac{500}{1000} = 1,5.$$

Сопротивление контура на частоте  $500$  Гц

$$|Z| = \frac{R}{\sqrt{1+(QX)^2}} = \frac{15920}{150} = 106 \text{ Ом.}$$

**Задача 14.** Оценить изменение напряжения на стабилитроне при отключении нагрузки, если напряжение стабилизации  $U_{\text{вых}} = U_{\text{ст}} = 10$  В, а динамическое сопротивление стабилитрона  $r_{\text{ст}} = 10$  Ом.



**Решение.**

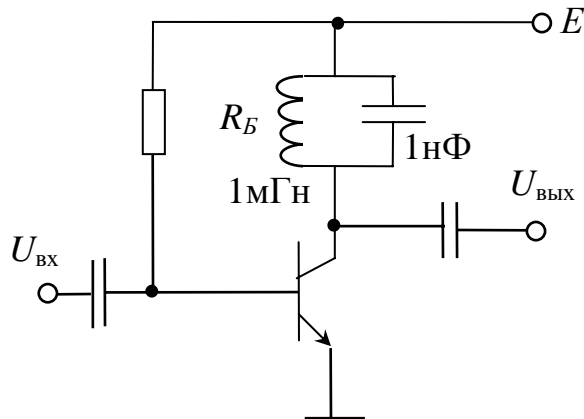
Изменение тока через стабилитрон составит

$$\Delta I_H = U_{CT} / R_H = 10 / 5 = 2 \text{ мА.}$$

Изменение напряжения на стабилитроне равно

$$\Delta U_{ВЫХ} = r_{CT} \cdot \Delta I_H = 10 \cdot 2 = 20 \text{ мВ.}$$

**Задача 15.** Оценить добротность каскада, если полоса пропускания на уровне 3 дБ составила  $2\Delta f = 2 \text{ кГц}$ .

**Решение.**

Определим резонансную частоту

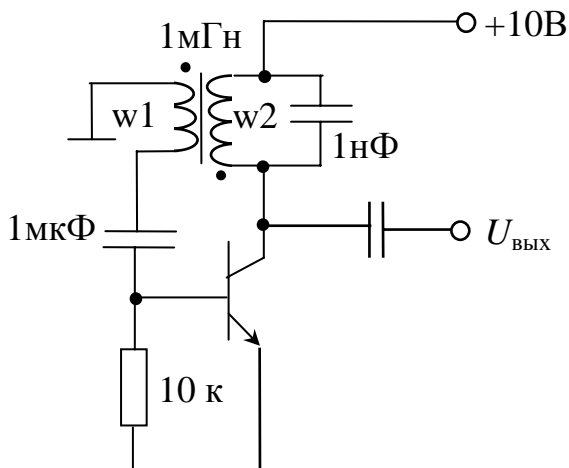
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} =$$

$$= \frac{1}{6,28\sqrt{10^{-3} \cdot 10^{-9}}} = \frac{10^6}{6,28} = 159,2 \text{ кГц.}$$

Эквивалентная добротность каскада

$$Q_{\text{ЭКВ}} = \frac{f_0}{2\Delta f} = \frac{159,2}{2} = 79,6.$$

**Задача 16.** Будет ли генерировать схема, изображенная на рисунке, если  $\beta = 100$ ,  $n = w_2/w_1 = 10$ .

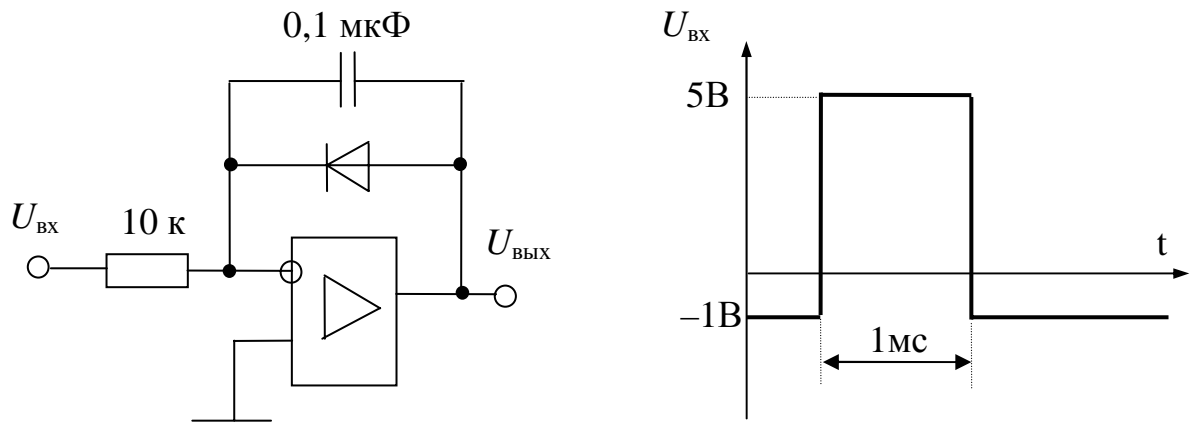


**Решение.** Для возникновения автоколебаний необходимо выполнение условий баланса фаз и амплитуд.

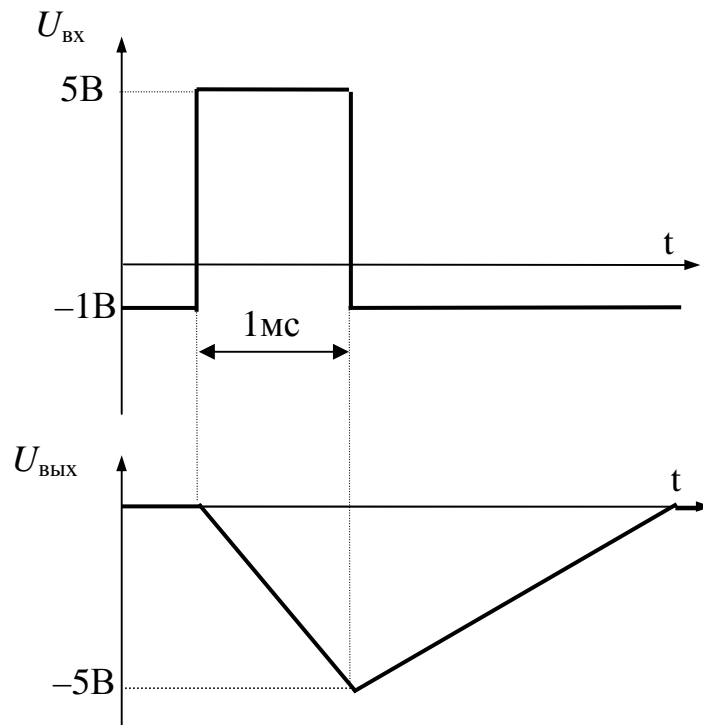
Условие баланса фаз выполняется (инвертирующий усилитель и инвертирующий трансформатор дают в петле обратной связи фазовый сдвиг, кратный  $2\pi$ , обеспечивающий положительную обратную связь).

Но транзистор закрыт, так как на базу не подано положительное смещение. Поэтому усилитель не дает коэффициент усиления  $K > 10$ , необходимый для выполнения условий баланса амплитуд. Автоколебания в схеме не возникнут.

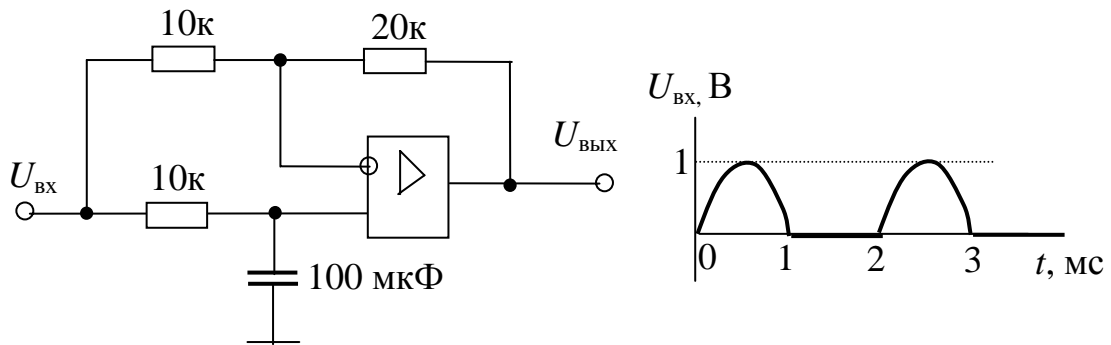
**Задача 17.** Построить временную диаграмму выходного напряжения.



**Решение.** Полагаем диод и ОУ идеальными. В исходном состоянии при отрицательном напряжении на входе  $U_{\text{ВЫХ}}$  должно быть положительным, но открывается диод и ограничивает выходное напряжение на уровне  $U_{\text{ВЫХ}}=0$ . При подаче  $U_{\text{ВХ}}=5 \text{ В}$  напряжение на выходе интегратора меняется со скоростью  $-U_{\text{ВХ}}/\tau=-5 \text{ В/мс}$  и за длительность импульса достигает значения минус  $5 \text{ В}$  ( $\tau = RC = 10 \text{ кОм} \cdot 0,1 \text{ мкФ} = 1 \text{ мс}$ ). Затем оно изменяется со скоростью  $1 \text{ В/мс}$  и за  $5 \text{ мс}$  достигает исходного значения, при котором открывается диод.



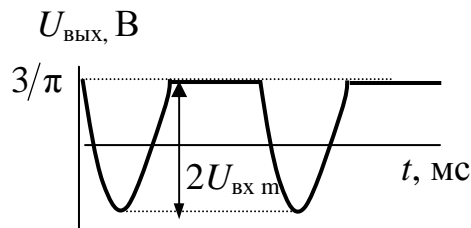
**Задача 18.** Построить временную диаграмму выходного напряжения.



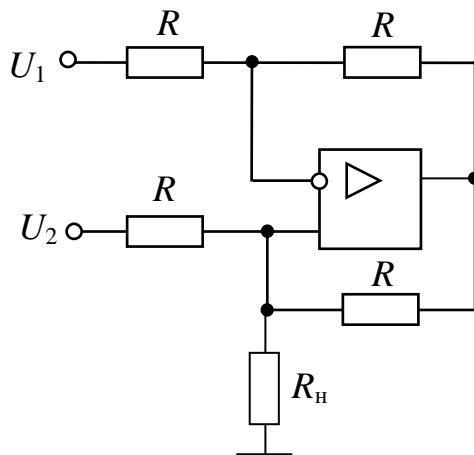
**Решение.** Так как постоянная времени  $RC$ -цепи

$$\tau = 10\text{к} \cdot 100\text{ мкФ} = 1000\text{ мс}$$

значительно больше периода входного сигнала  $T = 2\text{ мс}$ , на конденсаторе фильтра установится напряжение, равное постоянной составляющей  $U_{вх}$ , т.е. его среднему значению  $U_{вх\text{м}}/\pi = 1/\pi\text{ В}$ . Оно даст на выходе положительное смещение  $3/\pi\text{ В}$ , относительно которого будет расположен проинвертированный входной сигнал, усиленный в два раза.



**Задача 19.** Определить напряжение на инвертирующем входе операционного усилителя, если  $U_1 = 5\text{ В}$ ,  $U_2 = 7\text{ В}$ ,  $R = 20\text{ кОм}$ ,  $R_H = 15\text{ кОм}$ .

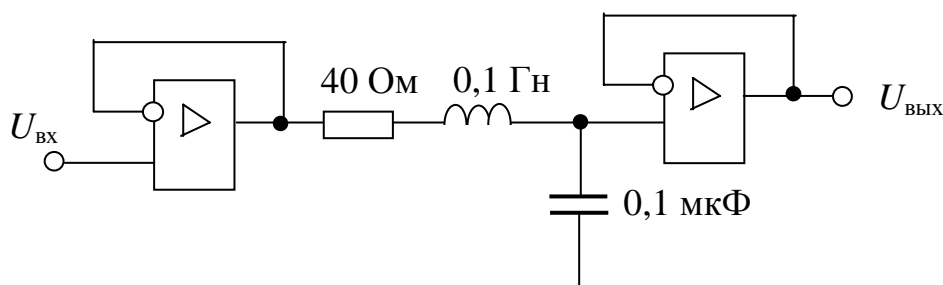


**Решение.** Схема является стабилизатором тока. Ток в нагрузке не зависит от величины сопротивления  $R_H$  и определяется соотношением

$$I_H = \frac{U_2 - U_1}{R} = \frac{7 - 5}{20} = 0,1 \text{ мА.}$$

На неинвертирующем входе ОУ напряжение равно  $U_+ = I_H R_H = 1,5 \text{ В}$ . Так как разность напряжений между входами ОУ, находящегося в линейном режиме, близка к нулю, точно такое же напряжение будет и на инвертирующем входе ОУ, т.е.  $U_- = 1,5 \text{ В}$ .

**Задача 20.** Определить коэффициент передачи цепи на резонансной частоте контура.



**Решение.** Для источника входного сигнала последовательный колебательный контур на резонансной частоте представляет собой чисто активное сопротивление  $R = 40 \text{ Ом}$ . Поэтому ток в контуре равен  $U_{\text{ВХ}}/R$ . Сопротивление конденсатора на резонансной частоте равно волновому сопротивлению контура  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ . Поэтому напряжение на конденсаторе

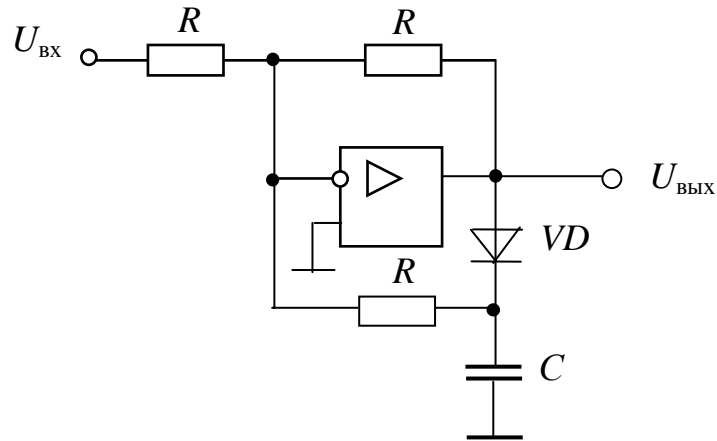
$$U_C = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}. \text{ Оно повторяется на выходе.}$$

Следовательно, коэффициент передачи цепи

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} = \frac{1000}{40} = 25.$$

**Задача 21.** Построить временную диаграмму выходного напряжения, если на вход подается синусоидальное напряжение  $U_{\text{ВХ}}(t) = 5 \sin \frac{2\pi}{T} t \text{ В}$ , а  $\tau = RC \gg T$ . Операционный усилитель и диод считать идеальными.

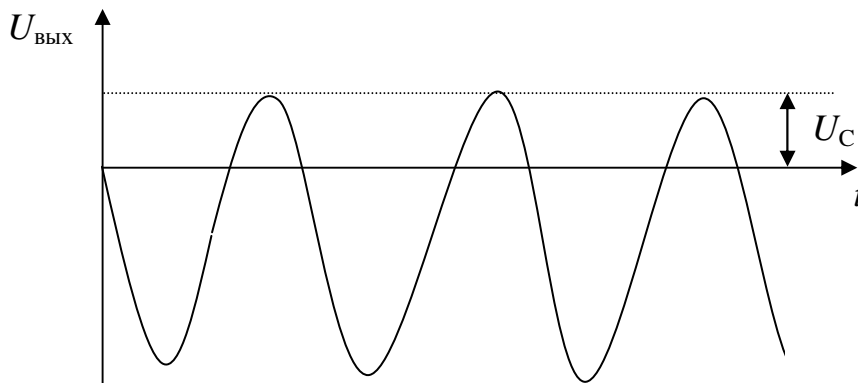
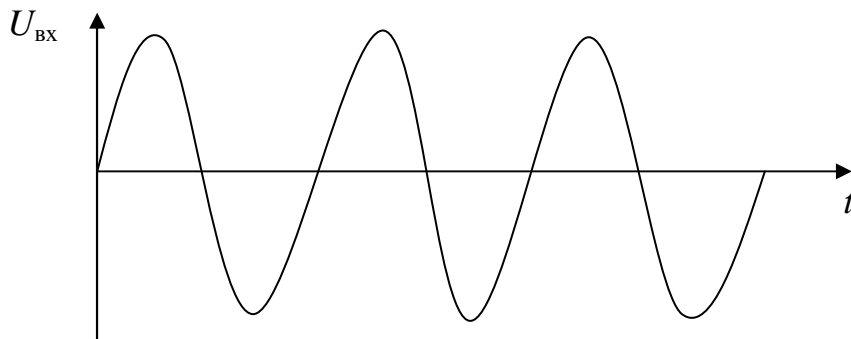




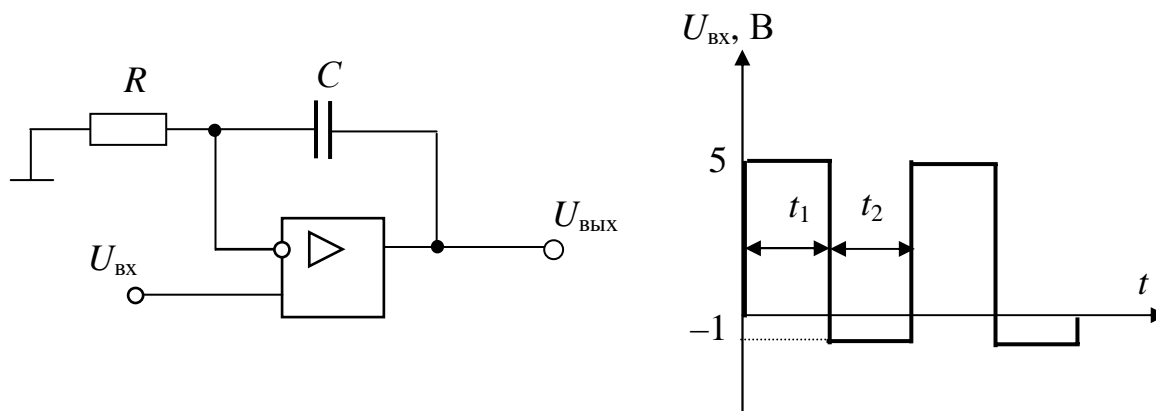
**Решение.** Конденсатор  $C$  и диод  $VD$  образуют схему пикового детектора. Конденсатор стремится зарядиться до максимального значения выходного напряжения. Если бы напряжение  $U_C$  не подавалось на инвертирующий вход ОУ, выходное напряжение было бы равно минус  $U_{ВХ}(t)$ , а конденсатор зарядился до плюс 5 В. Но, подаваемое на инвертирующий вход ОУ, напряжение  $U_C$  создает на выходе отрицательное смещение и проинвертированная синусоида начинает опускаться на  $U_C$ .

Следовательно,  $U_C = 5 \text{ В} - U_C$  или  $U_C = 2,5 \text{ В}$ , а

$$U_{ВЫХ}(t) = -U_{ВХ}(t) - 2,5 \text{ В}.$$



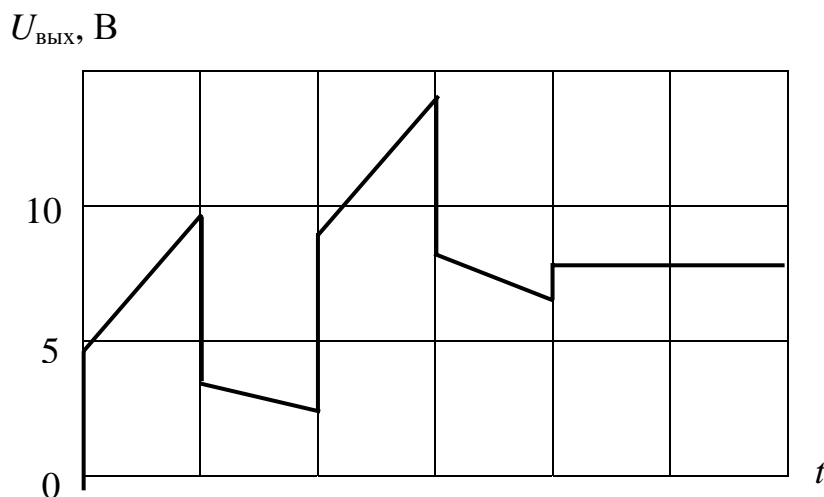
**Задача 22.** Построить  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  после подачи на вход двух импульсов  $U_{\text{ВХ}}(t)$ . Выполняется условие  $\tau = RC = t_1 = t_2$ .



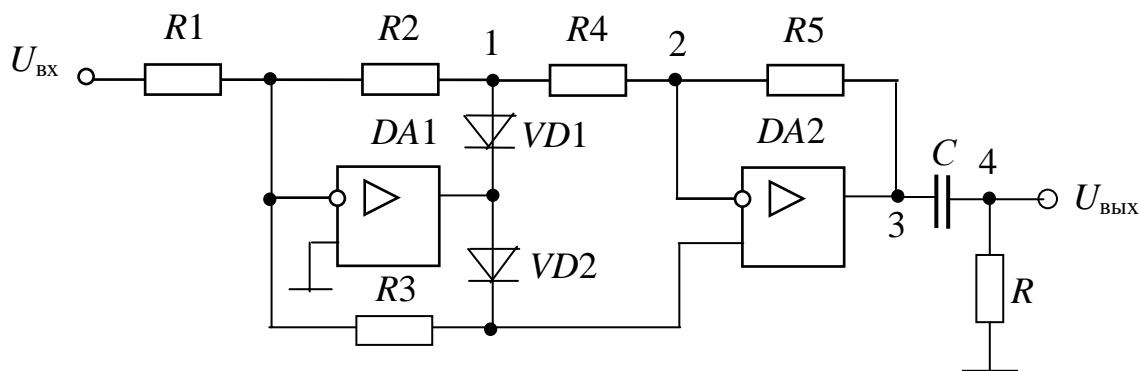
**Решение.** Передаточная функция цепи

$$\frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = 1 + \frac{1/pC}{R} = 1 + \frac{1}{pRC} = 1 + \frac{1}{p\tau}.$$

Следовательно, схема совмещает функции неинвертирующего интегратора и повторителя. Скорость изменения напряжения на конденсаторе определяется величиной  $U_{\text{вх}}(t)/\tau$ . За время  $t_1$  напряжение на конденсаторе нарастает на 5 В, за время  $t_2$  спадает на 1 В. После окончания импульсов напряжение на выходе интегратора не изменяется.



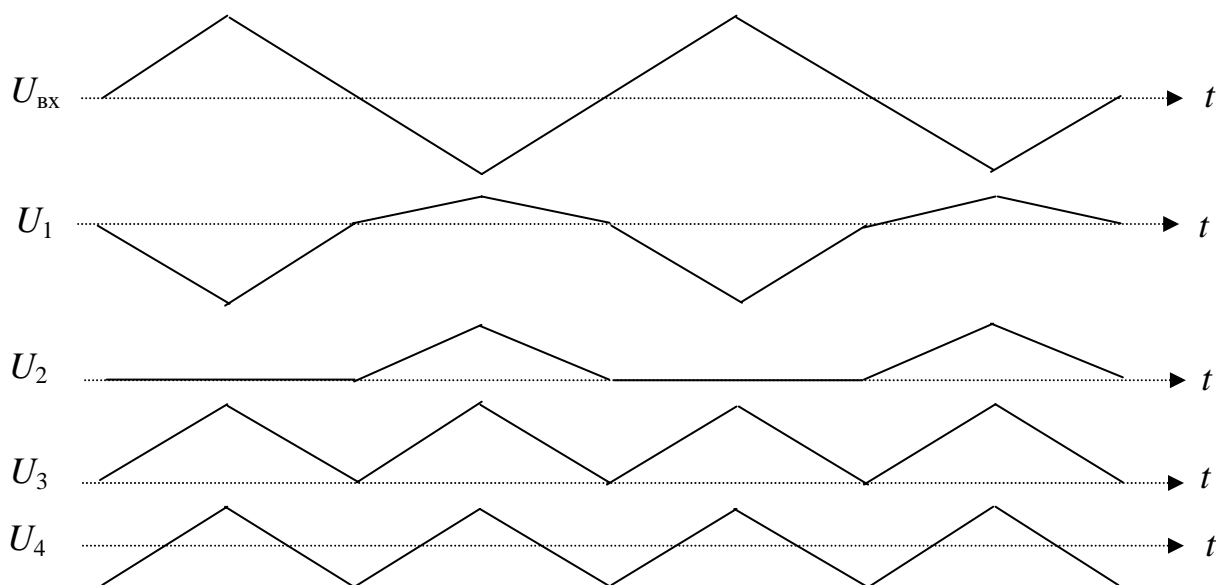
**Задача 23.** Построить временные диаграммы напряжений в точках 1, 2, 3 и 4 при подаче на вход симметричного треугольного напряжения с амплитудным значением  $U_{\text{ВХм}} = 6$  В ( $\tau = RC \gg T$ ,  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5$ ).



### Решение.

При  $U_{\text{ВХ}} > 0$  открывается диод  $VD1$ . В точке 1 получаем проинвертированное  $U_{\text{ВХ}}$ , диод  $VD2$  закрыт, на обоих входах операционного усилителя  $DA2$  нули, в точке 3 повторяется  $U_{\text{ВХ}}$ .

При  $U_{\text{ВХ}} < 0$  открывается диод  $VD2$ . В точке 2 повторяется выходное напряжение операционного усилителя  $DA1$ , которое можно рассчитать по формуле  $U_2 = U_{\text{ВХ}} \left( -\frac{(R_2 + R_4) \parallel R_3}{R_1} \right) = -\frac{2}{3} U_{\text{ВХ}}$ , а в точке 1 в два раза меньше. Напряжение в точке 3 можно рассчитать по формуле  $U_3 = U_2 \left( 1 + \frac{R_5}{R_2 + R_4} \right) = -U_{\text{ВХ}}$ . Таким образом, в точке 3 напряжение равно модулю входного (схема является двухполупериодным выпрямителем). Конденсатор уберет постоянную составляющую и на выходе в точке 4 снова получаем симметричное треугольное напряжение, амплитуда которого в два раза меньше, а частота в два раза больше частоты входного сигнала.



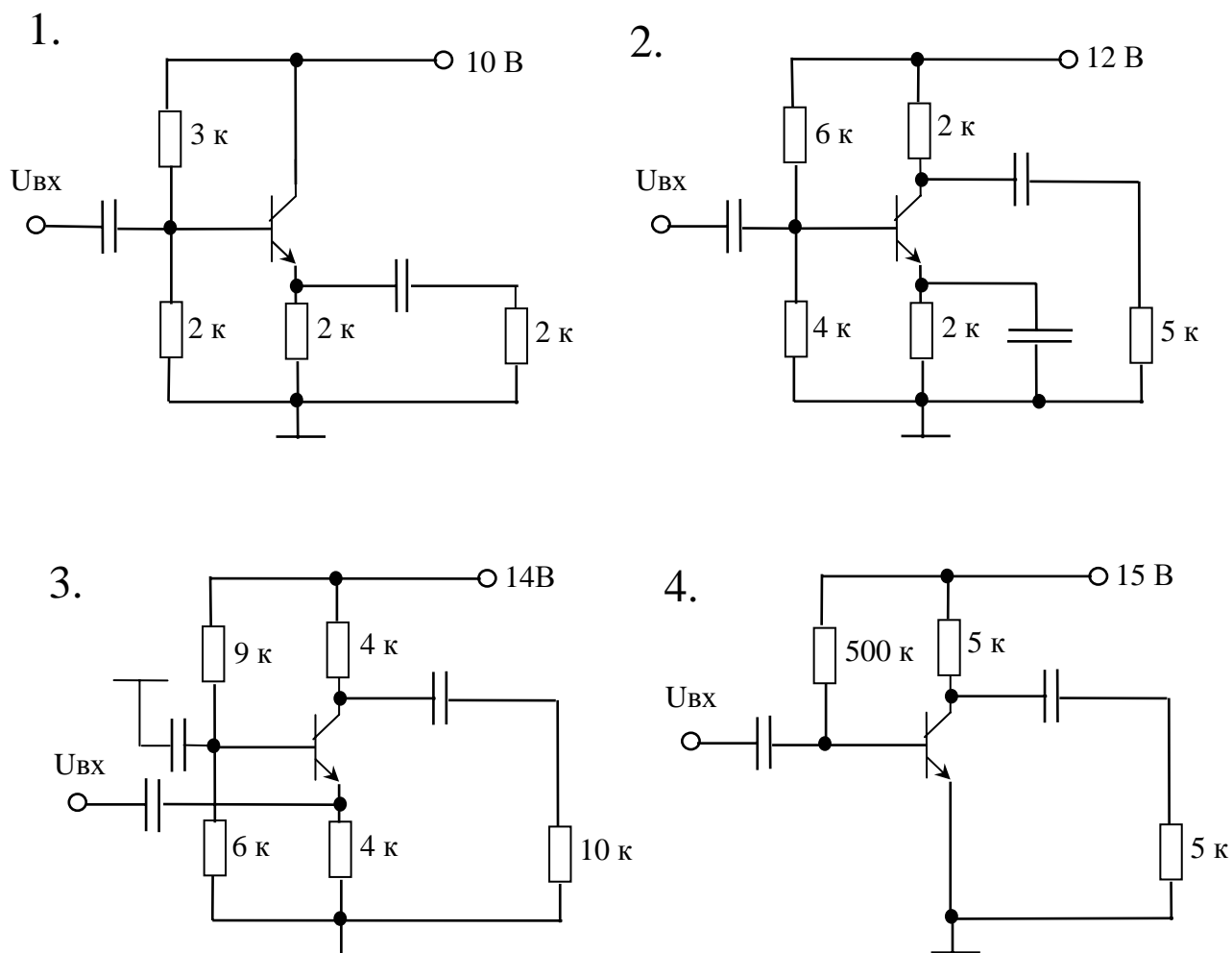
## 5 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №1

Контрольная работа №1 предполагает выполнение задачи по анализу усилительного каскада на биполярном транзисторе.

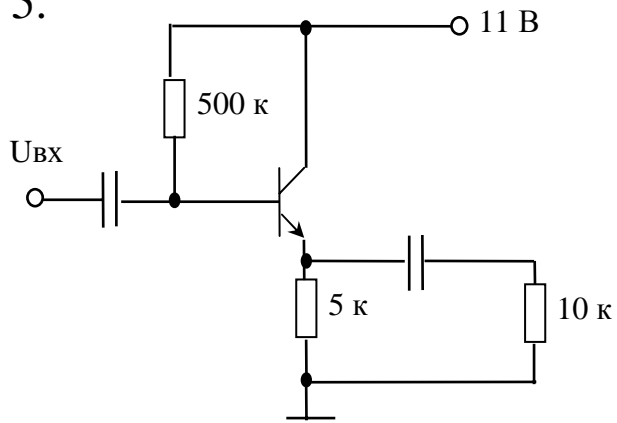
### Задание

1. Указать способ включения транзистора. Рассчитать координаты точки покоя (напряжение и ток в выходной цепи транзистора до подачи входного сигнала) и их нестабильность в диапазоне температур (20...50) °С.
2. Построить нагрузочные прямые постоянного и переменного тока.
3. Изобразить эквивалентную схему каскада УНЧ для рабочего диапазона частот (области средних частот). Оценить коэффициент усиления по напряжению, входное и выходное сопротивления.
4. Характеристики и параметры транзистора приведены в приложении Г.

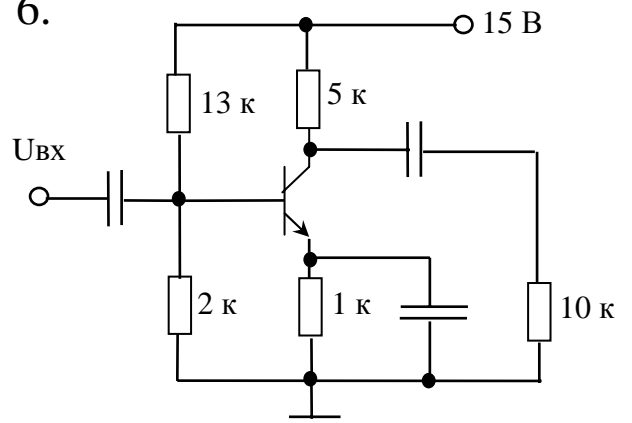
### Варианты заданий



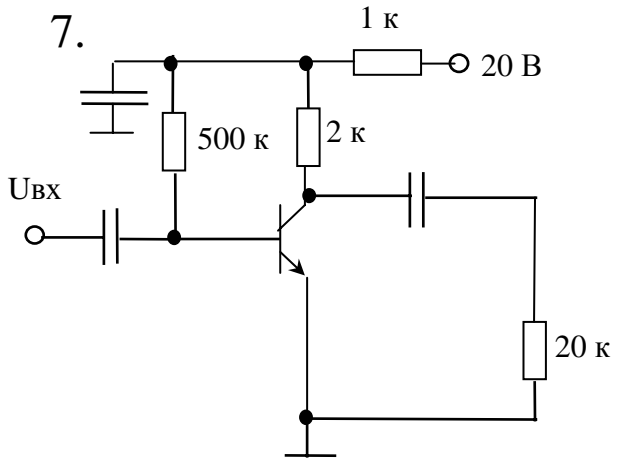
5.



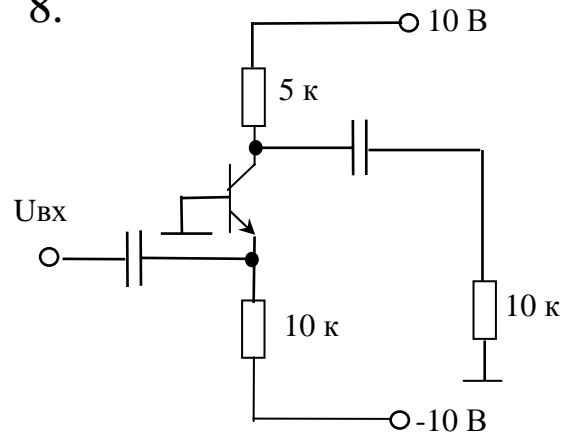
6.



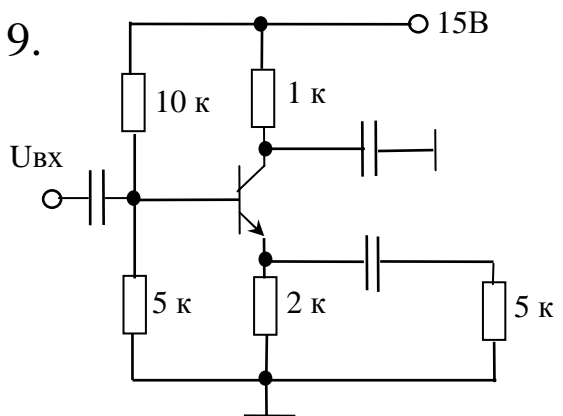
7.



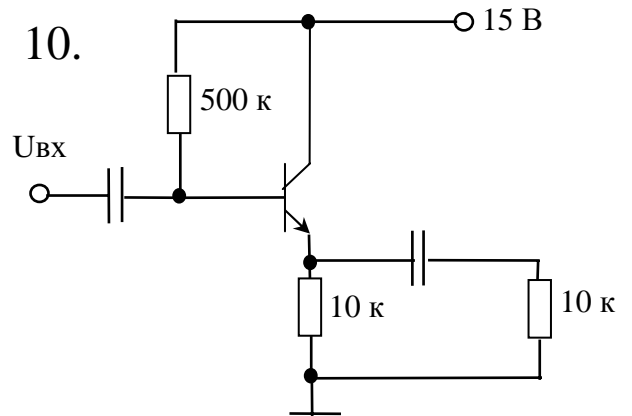
8.



9.



10.



## 6 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №1

Схема анализируемого усилительного каскада приведена на рис. 6.1. Транзистор включен по схеме с общим эмиттером. Введем обозначения и поясним назначение элементов схемы:

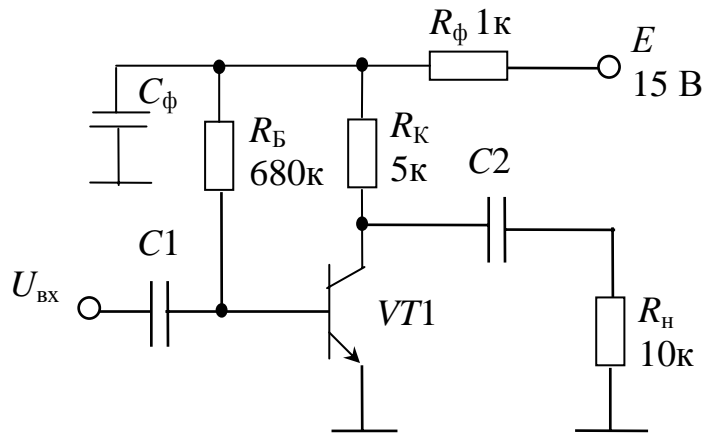


Рисунок 6.1

$R_\phi C_\phi$  – фильтр в цепи питания, за счет  $R_\phi$  действует ООС по постоянному току, стабилизирующая режим работы  $VT1$ ;  
 $R_K$  – сопротивление коллекторной цепи, с помощью которого формируется переменная составляющая напряжения на коллекторе  $VT1$ ;  
 $R_H$  – сопротивление нагрузки;

$R_B$  – базовое сопротивление, задающее режим работы транзистора по постоянному току;

$C1, C2$  – разделительные конденсаторы.

1. Определим координаты рабочей точки транзистора  $U_0 = U_{КЭ}$  и  $I_0 = I_K$ . Для этого запишем систему уравнений, связывающих токи и напряжения транзистора в рабочей точке:

$$E = R_\phi (I_0 + I_B) + R_K I_0 + U_0;$$

$$E = R_\phi (I_0 + I_B) + R_B I_B + U_{ЭБ};$$

$$I_0 = \beta I_B.$$

Полагая  $\beta = 100$  и  $U_{ЭБ} = 0,7$  В, определяем:

а) ток базы в рабочей точке

$$I_B = \frac{E - U_{ЭБ}}{R_B + R_\phi (1 + \beta)} = \frac{15 - 0,7}{680 + 1 \cdot 101} = 18,3 \text{ мкА};$$

б) ток коллектора в рабочей точке

$$I_0 = \beta I_B = 100 \cdot 18,3 = 1,83 \text{ мА};$$

в) напряжение между коллектором и эмиттером  $VT1$

$$U_0 = E - R_\phi (I_0 + I_B) - R_K I_0 = 15 - 1(1,83 + 0,02) - 5 \cdot 1,83 = 4 \text{ В}.$$

Сопротивление выходной цепи постоянному току

$$R_{=} \approx R_K + R_\phi = 6 \text{ кОм}.$$

Нагрузочная прямая постоянного тока проходит через точку  $E = 15 \text{ В}$  на оси абсцисс и точку  $I_{к} = E/R_{\sim} = 15/6 = 2,5 \text{ мА}$  на оси ординат (см. приложение Г). Отмечаем на характеристиках транзистора положение рабочей точки  $A$ .

Сопротивление выходной цепи переменному току

$$R_{\sim} = R_{\text{К}} \parallel R_{\text{Н}} = \frac{5 \cdot 10}{5 + 10} = 3,33 \text{ кОм.}$$

Через рабочую точку  $A$  и точку  $U_{\text{КЭ}} = U_0 + R_{\sim} I_0 = 6,1 \text{ В}$  на оси абсцисс проводим нагрузочную прямую переменного тока.

2. Температурная нестабильность коллекторного тока

$$\Delta I_{\text{К}} = S_{\text{T}} \left( \Delta I_{\text{T}} - \frac{\alpha \Delta U_{\text{T}}}{R_{\text{Б}} + R_{\text{Ф}}} \right) = 87 \left( 27,5 + \frac{0,99 \cdot 60}{681} \right) = 2400 \text{ мкА,}$$

где  $S_{\text{T}} = \frac{1}{1 - \frac{\alpha R_{\text{Б}}}{R_{\text{Ф}} + R_{\text{Б}}}} = \frac{1}{1 - \frac{0,99 \cdot 680}{681}} = 87$  – коэффициент температурной не-

стабильности каскада;

$\Delta I_{\text{T}} = I_0 \cdot \Delta \alpha = 1,83(50 - 30) \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 27,5 \text{ мкА}$  – температурное смещение выходных характеристик транзистора;

$\Delta U_{\text{T}} = -2 \cdot 30 = -60 \text{ мВ}$  – температурное смещение входных характеристик транзистора.

**Вывод.** Схема неработоспособна в заданном диапазоне температур. Транзистор с ростом температуры заходит в режим насыщения и перестает усиливать сигналы.

3. При построении эквивалентной схемы для средних частот закорачиваем  $E$ ,  $C1$ ,  $C2$ ,  $C_{\text{Ф}}$ , а транзистор заменяем его эквивалентной схемой (рис. 11.2).

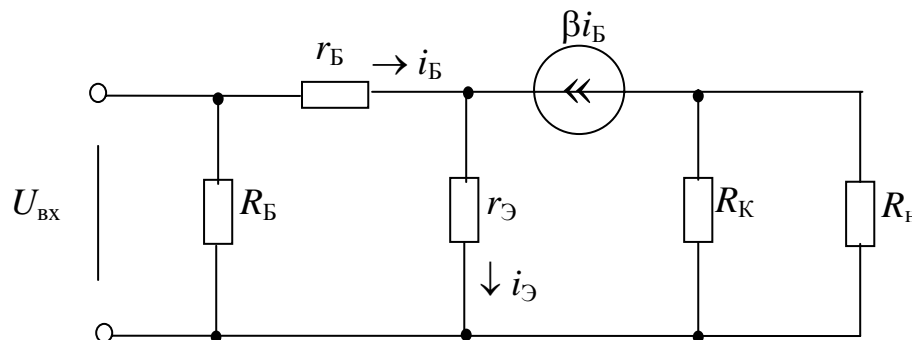


Рисунок 6.2

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{\beta \cdot R_{\sim}}{r_B + r_{\Theta}(1 + \beta)} = \frac{100 \cdot 3,33}{100 + 14(1 + 100)} = 216,$$

где  $r_{\Theta} = 26/I_0 = 14$  Ом.

Входное сопротивление усилителя

$$R_{\text{вх}} = R_B \parallel [r_B + r_{\Theta}(1 + \beta)] = 1,53 \text{ кОм.}$$

Выходное сопротивление каскада

$$R_{\text{вых}} = R_K \parallel r_K / (1 + \beta) = 4,5 \text{ кОм.}$$



## 7 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №2

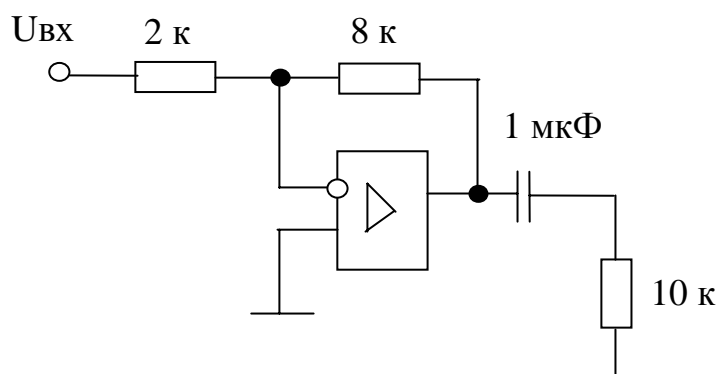
Контрольная работа №2 предполагает выполнение задачи по анализу усилительного каскада на операционном усилителе.

### Задание

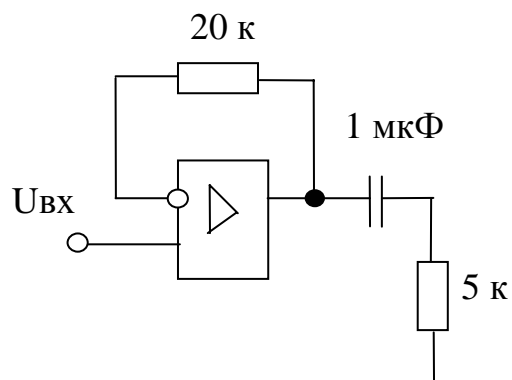
1. Определить коэффициент усиления по напряжению на средних частотах.
2. Определить входное и выходное сопротивления.
3. Оценить полосу пропускания на уровне 3 дБ.
4. Оценить возможную ошибку смещения нуля и дрейф нулевого уровня на выходе операционного усилителя в диапазоне температур (20...50)°С.
5. Характеристики и параметры ОУ приведены в приложении Д.

### Варианты заданий

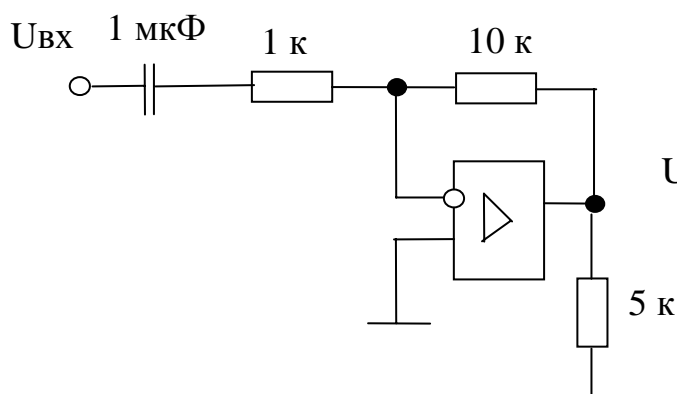
1.



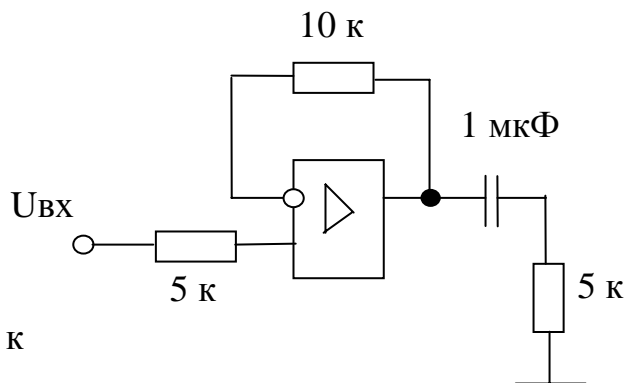
2.



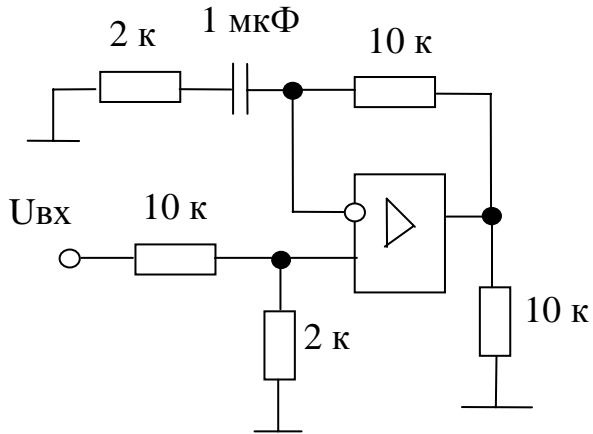
3.



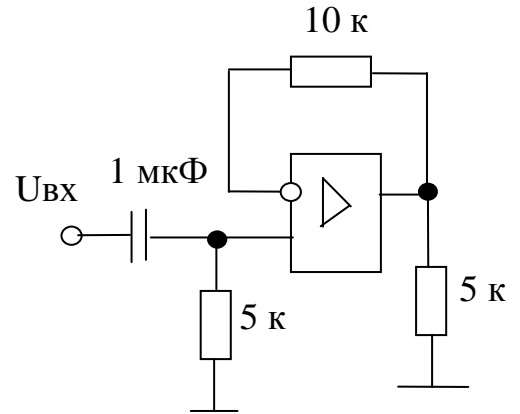
4.



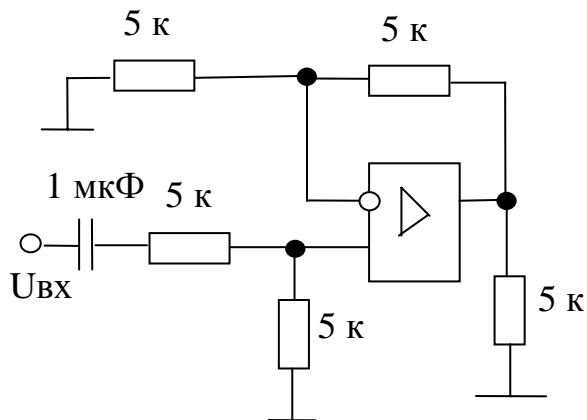
5.



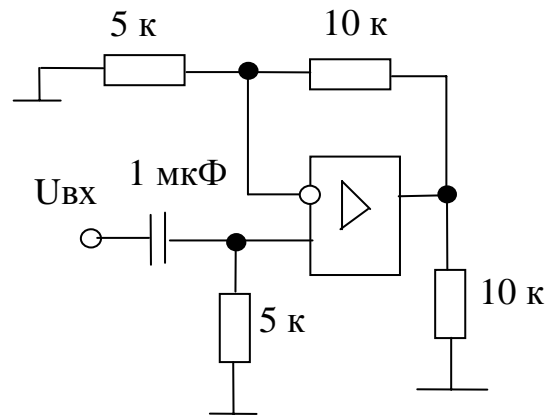
6.



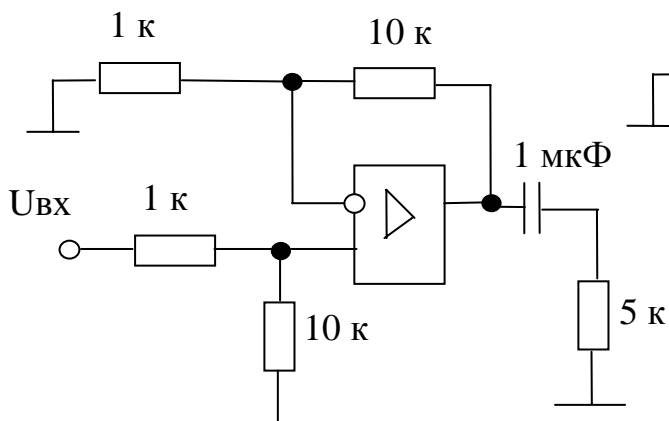
7.



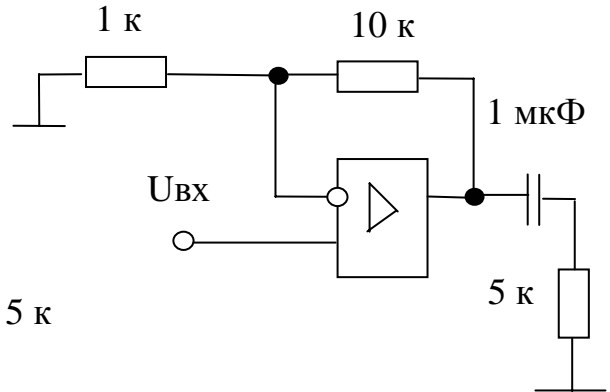
8.



9.



10.



## 8 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №2

Схема анализируемого усилителя приведена на рис. 8.1. Введены обозначения элементов. Влияние конденсатора  $C1$  проявляется в том, что схема передает на выход с разными коэффициентами усиления постоянную и переменную составляющие  $U_{\text{вх}}$ .

1. На постоянном токе схема является повторителем напряжения. Переменная составляющая  $U_{\text{вх}}$  усиливается в

$$K_{\text{ОС}} = 1 + \frac{R2}{R1} = 11 \text{ раз.}$$

2. Входное сопротивление каскада

$$R_{\text{вх}} = R3 + r_{\text{сф}} \parallel [r_{\text{вх}} (1 + K\gamma)] \approx r_{\text{сф}} = 100 \text{ МОм.}$$

где  $A = 1 + K\gamma = K/K_{\text{ОС}} = 9090$  – глубина ООС.

3. Выходное сопротивление каскада

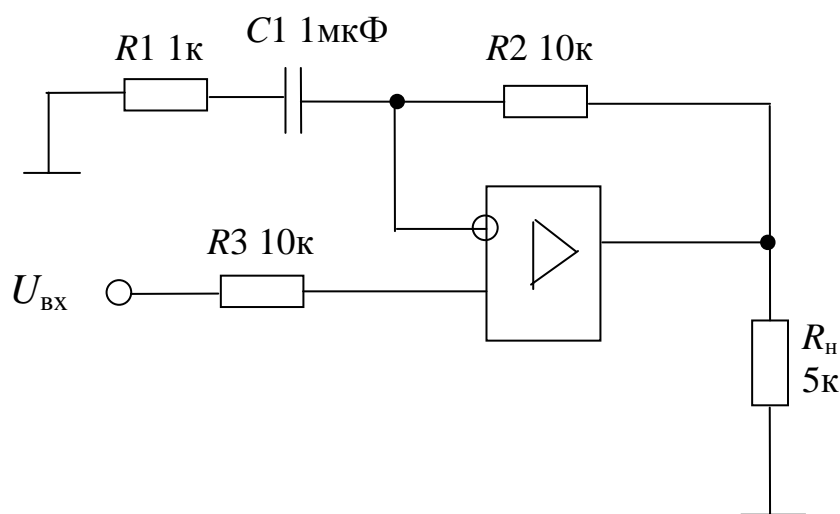


Рисунок 8.1

$$R_{\text{ВЫХ}} = r_{\text{ВЫХ}} / A = 100 / 9090 = 0,01 \text{ Ом.}$$

4. Нижняя рабочая частота при  $M_{\text{н}} = 3$  дБ

$$f_{\text{н}} = \frac{\omega_{\text{н}}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R1C1} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} = 159,2 \text{ Гц.}$$

5. Верхняя рабочая частота при  $M_B = 3$  дБ

$$f_B = \frac{f_1}{K_{OC}} = \frac{1000}{11} = 90,9 \text{ кГц},$$

где  $f_1 = 1$  МГц – частота единичного усиления.

6. Ошибка смещения нуля

$$U_{\text{вых сдв}} \leq U_{\text{см}} + |I_+ R_3 - I_- R_2|.$$

Так как  $R_3 = R_2$ , можно упростить это выражение

$$U_{\text{вых сдв}} \leq U_{\text{см}} + \Delta I_{\text{вх}} R_2 = 5 + 1 \cdot 10 = 15 \text{ мВ}.$$

7. Дрейф выходного напряжения

$$U_{\text{вых др}} \leq \delta U_{\text{см}} \cdot \Delta T + \delta \Delta I_{\text{вх}} \cdot \Delta T \cdot R_2 = 50 \cdot 30 + 5 \cdot 30 \cdot 10 = 3000 \text{ мкВ}.$$

## 9 ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЗАДАНИЯ №1

9.1. Спроектировать усилитель с коэффициентом сквозного усиления не менее 10 (схема каскада и тип транзистора выбираются самостоятельно)

Вариант	Е, В	U <sub>вых</sub> , В	R <sub>н</sub> , кОм	R <sub>с</sub> , Ом	f <sub>н</sub> , Гц	T <sub>мин</sub> , °С	T <sub>макс</sub> , °С
1	5	1	0.1	10	10	-10	40
2	6	1	0.2	20	15	0	50
3	7	2	0.3	30	20	10	60
4	8	2	0.4	40	25	-10	70
5	9	2	0.5	50	30	0	80
6	10	3	0.6	60	25	10	40
7	11	3	0.7	70	20	-20	50
8	12	3	0.8	80	15	-10	60
9	13	4	0.9	90	10	0	70
10	14	4	1	100	15	10	80
11	15	4	2	90	20	-20	40
12	16	5	1	80	25	-10	50
13	17	5	2	70	30	0	60
14	18	5	3	60	35	10	70
15	19	6	2	50	40	-20	80
16	20	6	3	40	45	-10	40
17	21	6	6	30	50	0	50
18	22	6	3	20	45	10	60
19	23	7	7	10	40	-20	70
20	24	7	2	20	35	-10	80
21	25	7	5	30	30	0	40
22	26	8	4	40	25	10	50
23	27	8	6	50	20	-20	60
24	28	9	5	60	15	-10	70
25	29	9	9	70	10	0	80
26	30	9	3	80	15	10	40
27	10	2	1	90	20	-20	50
28	12	3	1	80	25	-10	60
29	14	4	1	70	30	0	70
30	16	5	1	60	25	10	80
31	18	5	2	50	20	-20	40
32	20	6	3	40	15	-10	50
33	22	6	4	30	10	0	60
34	24	7	7	20	15	10	70

9.2. Спроектировать усилитель с коэффициентом сквозного усиления не менее 100 (схема усилителя и тип транзисторов выбираются самостоятельно).

Вариант	Е, В	U <sub>ВЫХ</sub> , В	R <sub>Н</sub> , кОм	R <sub>с</sub> , Ом	f <sub>н</sub> , Гц	T <sub>мин</sub> , °С	T <sub>макс</sub> , °С
41	5	1	0.1	10	10	-10	40
42	6	1	0.2	20	15	0	50
43	7	2	0.3	30	20	10	60
44	8	2	0.4	40	25	-10	70
45	9	2	0.5	50	30	0	80
46	10	3	0.6	60	25	10	40
47	11	3	0.7	70	20	-20	50
48	12	3	0.8	80	15	-10	60
49	13	4	0.9	90	10	0	70
50	14	4	1	100	15	10	80
51	15	4	2	90	20	-20	40
52	16	5	1	80	25	-10	50
53	17	5	2	70	30	0	60
54	18	5	3	60	35	10	70
55	19	6	2	50	40	-20	80
56	20	6	3	40	45	-10	40
57	21	6	6	30	50	0	50
58	22	6	3	20	45	10	60
59	23	7	7	10	40	-20	70
60	24	7	2	20	35	-10	80
61	25	7	5	30	30	0	40
62	26	8	4	40	25	10	50
63	27	8	6	50	20	-20	60
64	28	9	5	60	15	-10	70
65	29	9	9	70	10	0	80
66	30	9	3	80	15	10	40
67	10	2	1	90	20	-20	50
68	12	3	1	80	25	-10	60
69	14	4	1	70	30	0	70
70	16	5	1	60	25	10	80
71	18	5	2	50	20	-20	40
72	20	6	3	40	15	-10	50
73	22	6	4	30	10	0	60
74	24	7	7	20	15	10	70
75	26	7	3	10	20	-20	80
76	28	8	4	100	25	-10	40

9.3. Спроектировать усилитель с коэффициентом сквозного усиления не менее 0.9 (схема каскада и тип транзистора выбираются самостоятельно)

Вариант	Е, В	U <sub>ВЫХ</sub> , В	R <sub>Н</sub> , кОм	R <sub>с</sub> , кОм	f <sub>н</sub> , Гц	T <sub>мин</sub> , °С	T <sub>макс</sub> , °С
81	5	1	0.1	1	10	-10	40
82	6	1	0.2	2	15	0	50
83	7	2	0.3	3	20	10	60
84	8	2	0.4	4	25	-10	70
85	9	2	0.5	5	30	0	80
86	10	3	0.6	6	25	10	40
87	11	3	0.7	7	20	-20	50
88	12	3	0.8	8	15	-10	60
89	13	4	0.9	9	10	0	70
90	14	4	1	10	15	10	80
91	15	4	2	19	20	-20	40
92	16	5	1	18	25	-10	50
93	17	5	2	17	30	0	60
94	18	5	3	16	35	10	70
95	19	6	2	15	40	-20	80
96	20	6	3	14	45	-10	40
97	21	6	6	13	50	0	50
98	22	6	3	12	45	10	60
99	23	7	7	15	40	-20	70
100	24	7	2	20	35	-10	80
101	25	7	5	30	30	0	40
102	26	8	4	40	25	10	50
103	27	8	6	50	20	-20	60
104	28	9	5	60	15	-10	70
105	29	9	9	70	10	0	80
106	30	9	3	80	15	10	40
107	10	2	1	90	20	-20	50
108	12	3	1	80	25	-10	60
109	14	4	1	70	30	0	70
110	16	5	1	60	25	10	80
111	18	5	2	50	20	-20	40
112	20	6	3	40	15	-10	50
113	22	6	4	30	10	0	60
114	24	7	7	20	15	10	70
115	26	7	3	10	20	-20	80
116	28	8	4	40	25	-10	40

## 10 ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЗАДАНИЯ №2

10.1 Рассчитать инвертирующий масштабный усилитель. Входной сигнал подается с измерительного шунта (при токе 1000 А напряжение, снимаемое с шунта, равно 75 мВ).

Вариант	U <sub>вых</sub> , В	T <sub>мин</sub> , °С	T <sub>макс</sub> , °С	γ, %
1	2	-20	40	0.2
2	3	-10	50	0.3
3	4	0	30	0.4
4	5	10	30	0.5
5	6	-20	40	0.6
6	7	-10	50	0.7
7	8	0	60	0.8
8	9	10	30	0.9
9	10	-20	40	1
10	2	-10	50	0.9
11	3	0	60	0.8
12	4	10	30	0.7
13	5	-20	40	0.6
14	6	-10	50	0.5
15	7	0	60	0.4
16	8	10	30	0.3
17	9	-20	40	0.2
18	10	-10	50	1
19	1	0	60	0.2
20	2	10	30	0.3
21	3	-20	40	0.4
22	4	-10	50	0.5
23	5	0	60	0.6
24	6	10	30	0.7
25	7	-20	60	0.8
26	8	-10	50	0.9
27	9	0	40	1
28	10	10	60	0.2
29	3	-20	50	0.3
30	4	-10	40	0.4
31	5	0	30	0.5
32	6	10	60	0.6
33	7	-20	50	0.7
34	8	-10	40	0.8



10.2 Рассчитать измерительный дифференциальный усилитель для прочностных испытаний. Входной сигнал подается с тензометрического моста. Входное сопротивление по каждому входу не менее 1 МОм. Амплитуда выходного напряжения – 5 В.

Вариант	Кос	Усф, В	$\gamma$ , %	Tмин, °С	Tмакс, °С
36	10	1	0.1	-30	60
37	20	2	0.2	-20	50
38	30	3	0.3	-10	40
39	40	4	0.4	0	30
40	50	5	0.5	-30	40
41	60	6	0.6	-20	50
42	70	5	0.7	-10	60
43	80	4	0.8	0	50
44	90	3	0.9	10	40
45	100	2	1	-20	30
46	10	1	0.1	-10	30
47	20	2	0.2	0	40
48	30	3	0.3	10	50
49	40	4	0.4	-30	60
50	50	5	0.5	-20	30
51	60	6	0.6	-10	40
52	70	5	0.7	0	50
53	80	4	0.8	10	60
54	90	3	0.9	0	30
55	100	2	1	-10	40
56	10	1	0.9	-20	50
57	20	2	0.8	-30	60
58	30	3	0.7	0	30
59	40	4	0.6	-10	40
60	50	5	0.5	-20	50
61	60	1	0.4	-30	60
62	70	2	0.3	0	30
63	80	3	0.2	-10	40
64	90	4	0.1	-20	50
65	100	5	1	-30	60
66	50	5	0.9	0	50
67	40	4	0.8	-10	40
68	30	3	0.7	-20	30
69	20	2	0.6	-30	40
70	10	1	0.5	0	50

10.3 Рассчитать измерительный УНЧ. Амплитуда выходного напряжения – 10 В. Диапазон рабочих температур – от нуля до плюс 40 °С. Полоса частот задана на уровне 3 дБ.

Вариант	$f_n$ , Гц	$f_v$ , кГц	Кос	$\gamma$ , %	$R_c$ , кОм	$R_n$ , кОм
71	10	10	-10	0.2	1	5
72	20	20	-15	0.3	2	6
73	30	30	-20	0.4	3	7
74	40	40	-25	0.5	4	8
75	50	50	-30	0.6	5	9
76	60	60	-35	0.7	6	10
77	70	70	-40	0.8	7	5
78	80	80	-45	0.9	8	6
79	90	90	-50	1	9	7
80	100	80	10	0.2	10	8
81	10	70	20	0.3	20	9
82	20	60	30	0.4	30	10
83	30	50	40	0.5	40	5
84	40	40	50	0.6	50	6
85	50	30	60	0.7	1	7
86	60	20	70	0.8	2	8
87	70	10	80	0.9	3	9
88	80	20	90	1	4	10
89	90	30	100	0.2	5	5
90	100	40	-10	0.3	6	6
91	10	50	-20	0.4	7	7
92	20	60	-30	0.5	8	8
93	30	70	-40	0.6	9	9
94	40	80	-50	0.7	10	10
95	50	90	-60	0.8	1	5
96	60	80	-70	0.9	2	6
97	70	70	-80	1	3	7
98	80	60	-90	0.5	4	8
99	90	50	-100	0.4	5	9
100	100	40	10	0.3	6	10
101	10	30	-10	0.2	7	5
102	20	20	20	0.6	8	6
103	30	10	-20	0.7	9	7
104	40	90	30	0.8	10	8
105	50	80	-30	0.9	1	9

## 11 ТВОРЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Рассчитать стабилизатор постоянного напряжения на выходное напряжение  $30 \text{ В} \pm 1\%$ . Ток нагрузки меняется в диапазоне (0–1) А. Нестабильность входного напряжения  $\pm 15\%$ . Диапазон температур (30–50)°С.

2. Спроектировать стабилизатор тока. Нестабильность входного напряжения  $\pm 10\%$ . Стабилизируемый ток – 0.1 А. Точность – не хуже 1% в диапазоне температур (0–40)°С. Нагрузка – аккумулятор напряжением 1.5 В.

3. Спроектировать двуполярный стабилизатор напряжения ( $\pm 15 \text{ В} \pm 1\%$ ). Питание от сети переменного тока 220 В  $\pm 15\%$ . Ток нагрузки – до 200 мА. Диапазон температур (20 $\pm$ 10)°С.

4. Рассчитать стабилизатор постоянного напряжения на выходное напряжение  $20 \text{ В} \pm 1\%$ . Ток нагрузки меняется в диапазоне (0–0.5) А. Нестабильность входного напряжения  $\pm 15\%$ . Диапазон температур (30–50)°С.

5. Спроектировать стабилизатор тока. Нестабильность входного напряжения  $\pm 10\%$ . Стабилизируемый ток – 0.2 А. Точность – не хуже 1% в диапазоне температур (0–40)°С. Диапазон изменения сопротивления нагрузки (5–20) Ом.

6. Рассчитать стабилизатор постоянного напряжения на выходное напряжение  $30 \text{ В} \pm 1\%$ . Ток нагрузки меняется в диапазоне (0–0.3) А. Нестабильность входного напряжения  $\pm 15\%$ . Диапазон температур (30–50)°С.

7. Спроектировать стабилизатор тока. Нестабильность входного напряжения  $\pm 10\%$ . Стабилизируемый ток – 0.5 А. Точность – не хуже 1% в диапазоне температур (0–40)°С. Нагрузка – пара последовательно включенных аккумуляторов напряжением 1.5 В.

8. Спроектировать двуполярный стабилизатор напряжения ( $\pm 8 \text{ В} \pm 1\%$ ). Питание от сети переменного тока 220 В  $\pm 15\%$ . Ток нагрузки – до 500 мА. Диапазон температур (20 $\pm$ 10)°С.

9. Рассчитать стабилизатор постоянного напряжения на выходное напряжение  $15 \text{ В} \pm 1\%$ . Ток нагрузки меняется в диапазоне (0–0.1) А. Нестабильность входного напряжения  $\pm 15\%$ . Диапазон температур (30–50)°С.

10. Спроектировать стабилизатор тока. Нестабильность входного напряжения  $\pm 10\%$ . Стабилизируемый ток – 0.4 А. Точность – не хуже 1% в диапазоне температур (0–40)°С. Сопротивление нагрузки меняется от 1 до 10 Ом.

11. Спроектировать двуполярный стабилизатор напряжения ( $\pm 5$  В  $\pm 1\%$ ). Питание от сети переменного тока 220 В  $\pm 15\%$ . Ток нагрузки – до 1 А. Диапазон температур (20 $\pm$ 30)°С.

12. Спроектировать двуполярный стабилизатор напряжения ( $\pm 10$  В  $\pm 1\%$ ). Питание от сети переменного тока 220 В  $\pm 15\%$ . Ток нагрузки – до 300 мА. Диапазон температур (20 $\pm$ 20)°С.

13. Рассчитать усилитель промежуточной частоты транзисторного радиоприемника. Частота преобразования – 465 кГц, полоса частот –  $\pm 20$  кГц. Избирательность по отношению к частоте помехи 1 МГц не хуже 40 дБ. Коэффициент усиления не ниже 100. Диапазон рабочих температур – от нуля до 40 °С.

14. Рассчитать генератор гармонических колебаний для снятия АЧХ. Диапазон перестройки частоты – от 10 Гц до 100 кГц. Амплитуда выходного напряжения – 10 В. Коэффициент гармоник – не хуже 1 %.

15. Рассчитать полосовой фильтр ( $f_n = 20$  кГц,  $f_v = 100$  кГц). Крутизна характеристики на границах полосы пропускания – не ниже 60 дБ/дек. Коэффициент передачи – 1. Сопротивление нагрузки – 5 кОм.

16. Рассчитать избирательный усилитель. Резонансная частота – 3 кГц. Полоса пропускания на уровне 3 дБ – 100 Гц. Коэффициент усиления – 100. Сопротивление нагрузки – 1 кОм.

17. Рассчитать прецизионный двухполупериодный выпрямитель блока обратной связи стабилизатора сетевого напряжения. Амплитуда напряжения – 10 В. Погрешность – не более 1%. Диапазон температур – от нуля до 40 °С.

18. Спроектировать амплитудный детектор. Длительность контролируемых импульсных сигналов – 100 мкс, амплитуда – до 1 В. Погрешность – не более 1%. Сопротивление нагрузки – 1 кОм. Диапазон рабочих температур – 20 $\pm$ 10 °С.

## 12 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

### 12.1 Цель курсового проектирования

Целью курсового проектирования является закрепление знаний по схемотехнике аналоговых электронных устройств, выбору их элементов, расчету качественных характеристик, приобретению навыков моделирования, оформления пояснительной записки и чертежей. В число проектируемых устройств входят различные усилители, генераторы гармонических колебаний, стабилизаторы постоянного напряжения.

Точный анализ аналоговых устройств приводит к громоздким соотношениям, мало пригодным для практики инженерных расчетов. Рекомендуем использовать приближенные эквивалентные схемы и методы анализа, позволяющие получить простые и наглядные соотношения для параметрического синтеза устройств. Уточненный анализ и подгонку значений элементов спроектированных таким образом устройств можно выполнить затем путем компьютерного моделирования с помощью пакетов Electronics Workbench или ASIMEC.

### 12.2 Конкретизация технического задания

Типовое задание на курсовой проект предполагает проектирование усилителя звуковых частот на выходную мощность в единицы-десятки ватт. Однако студент может предложить и конкретизировать свой вариант технического задания или выбрать курсовой проект по предлагаемой ниже тематике и согласовать его с руководителем курсового проектирования:

- Усилитель низкой частоты для магнитофона с регулировкой тембра.
- Усилитель низкой частоты для радиоприемника.
- УНЧ для системы автоматического управления.
- Измерительный преобразователь для прочностных испытаний.
- Широкодиапазонный генератор гармонических колебаний.
- Двухполярный стабилизатор постоянного напряжения с регулировкой выходного напряжения.
- Электронный термометр.
- Стереофонический УНЧ с регулировкой уровня громкости, баланса и тембра.
- Усилитель промежуточной частоты для радиоприемника.
- Усилитель биопотенциалов для кардиографа.
- Линейный импульсный усилитель.

Выбор нетипового задания возможен только при наличии у студента соответствующей литературы по проектированию аналогового электронного устройства. В качестве основной элементной базы используются операционные усилители, биполярные и полевые транзисторы.

В задании указываются основные параметры нагрузки (выходного сигнала) и датчика (источника входного сигнала). Расчет и выбор элементов проектируемого устройства начинают с выходного каскада.

### 12.3 Выбор элементов выходного каскада

12.3.1 Пусть стоит задача выбора основных элементов двухтактного выходного каскада усилителя звуковых частот (рис.12.1) с выходной мощностью  $P_H = 10$  Вт и сопротивлением нагрузки  $R_H = 8$  Ом. Усилитель низкой частоты выполнен по схеме с квазидополнительной симметрией выходных транзисторов. Усилитель питается от двухполярного источника. В точке покоя напряжение на нагрузке устанавливается равным нулю. В УНЧ используется цепь параллельной отрицательной обратной связи по напряжению через резистор  $R1$  и вольтодобавочная цепь положительной обратной связи за счет элементов  $C2$  и  $R6$  [11,18].

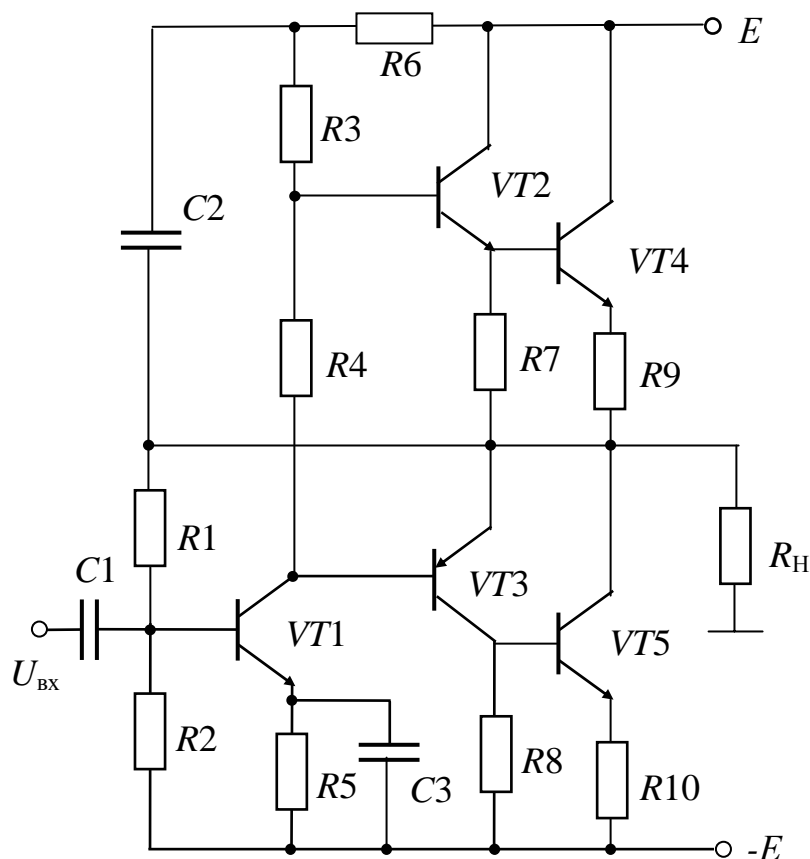


Рисунок 12.1 – Выходной каскад УНЧ

12.3.2 Для получения хороших энергетических показателей и небольших нелинейных искажений выбираем режим  $AB$ . Резисторы  $R9$  и  $R10$ , служащие для температурной стабилизации исходных рабочих точек оконечных транзисторов  $VT4$  и  $VT5$ , берут порядка (5...15)% от  $R_H$  (чтобы они

не сильно уменьшали КПД). Выбираем  $R9 = R10 = 1$  Ом из ряда E12 с номинальной мощностью рассеяния 1 Вт.

Тогда полное сопротивление нагрузки одного плеча составит

$$R'_H = R_H + R9 = 8 + 1 = 9 \text{ Ом.}$$

12.3.3 Требуемая максимальная выходная мощность, которую должны обеспечить транзисторы:

$$P_{\sim max} = P_H R'_H / R_H = 10 \cdot 9 / 8 = 11,25 \text{ Вт.}$$

12.3.4 Максимальная амплитуда тока нагрузки

$$I_{H max} = \sqrt{2P_H / R_H} = \sqrt{2 \cdot 10 / 8} = 1,58 \text{ А.}$$

12.3.5 Требуемая величина напряжения источника питания

$$E \geq I_{H max} R'_H + U_{ост} = 1,58 \cdot 9 + 1,3 = 15,5 \text{ В,}$$

где  $U_{ост} = U_{КЭ2 min} + U_{ЭБ4 нас} \approx 0,5 + 0,8 = 1,3 \text{ В.}$

Выбираем  $E = 16 \text{ В.}$

12.3.6 Максимальная мощность потерь в каждом из выходных транзисторов [11]:

$$P_{K4 max} = 0,2 P_{\sim max} / \psi^2 = 0,2 \cdot 11,25 / 0,85 = 2,65 \text{ Вт,}$$

где  $\psi = \frac{E - U_{ост}}{E} = \frac{16 - 1,3}{16} = 0,92$  – коэффициент использования напряжения источника питания.

12.3.7 Максимальное напряжение на оконечном транзисторе каждого плеча примерно равно удвоенному напряжению источника питания (когда один из транзисторов закрыт, а другой почти открыт):

$$U_{K4 max} \approx 2E = 32 \text{ В.}$$

12.3.8 По значениям  $P_{K4 max}$ ,  $U_{K4 max}$  и  $I_{H max}$  выбираем оконечные транзисторы типа КТ817В ( $I_{K max} = 3 \text{ А}$ ,  $U_{КЭ max} = 60 \text{ В}$ ,  $P_{K max}$  без радиатора 1 Вт,  $P_{K max}$  с радиатором 25 Вт,  $\beta_{min} = 30$ , тепловое сопротивление переход-корпус  $R_{ПК} = 5 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ ,  $C_K = 60 \text{ пФ}$ ,  $f_\beta = 3 \text{ МГц}$ , максимальная температура перехода  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

12.3.9 Необходимая поверхность пластинчатого радиатора в квадратных сантиметрах при условии, что максимальная температура окружающей среды  $T_{C max} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура перехода не превысит  $T_{\Pi} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$S_P = \frac{1500}{\frac{T_{\Pi} - T_{C max}}{P_{K4 max}} - R_{ПК}} = \frac{1500}{\frac{120 - 60}{2,65} - 5} = 85 \text{ см}^2.$$

Роль такого радиатора может выполнить алюминиевая пластина со сторонами 10 и 4 см.

12.3.10 Ток покоя оконечных транзисторов выбирают в диапазоне (3...10)% от максимального тока нагрузки. Примем

$$I_{K4} = 0,05I_{H \max} = 0,05 \cdot 1580 = 79 \text{ мА.}$$

Исходный ток через резистор  $R7$  примем равным 10% от  $I_{K4}$  (токи через резисторы  $R7$  и  $R8$  выбирают в несколько раз больше, чем токи баз  $VT4$  и  $VT5$ ):

$$I_{R7} = 0,1 \cdot I_{K4} = 7,9 \text{ мА.}$$

Исходное напряжение на резисторе  $R7$

$$U_{R7} = U_{BЭ4} + I_{K4}R9 \approx 650 + 79 \cdot 1 = 729 \text{ мВ,}$$

где  $U_{BЭ4}$  – пороговое напряжение входной характеристики транзистора.

Величина сопротивления резистора  $R7$

$$R7 = \frac{U_{R7}}{I_{R7}} = \frac{729}{7,9} = 92 \text{ Ом.}$$

Выбираем  $R7=R8=100$  Ом из ряда E12 с допустимым отклонением 10%.

12.3.11 Максимальное напряжение на резисторе  $R7$

$$U_{R7 \max} = I_{H \max}R9 + U_{ЭБ4 \text{ нас}} \approx 1,58 \cdot 1 + 0,8 = 2,4 \text{ В.}$$

Максимальные токи:

$$I_{R7 \max} = U_{R7 \max} / R7 = 2400/100 = 24 \text{ мА;}$$

$$I_{Э4 \max} = I_{H \max} - I_{R7 \max} = 1,58 - 0,024 = 1,56 \text{ А;}$$

$$I_{Б4 \max} = I_{Э4 \max} / (1 + \beta_{4 \min}) \approx 1560/31 = 50 \text{ мА.}$$

12.3.12 Максимальный ток транзистора  $VT2$

$$I_{Э2 \max} = I_{Б4 \max} + I_{R7 \max} = 50 + 24 = 74 \text{ мА.}$$

Максимальное напряжение на транзисторе  $VT2$

$$U_{КЭ4 \max} \approx 2E = 32 \text{ В.}$$

Напряжения на транзисторах  $VT2$  и  $VT4$  практически одинаковы. Поэтому их максимальные мощности потерь различаются во столько же раз, что и токи:  $P_{K2 \max} = P_{K4 \max} I_{Э2 \max} / I_{Э4 \max} = 2,65 \cdot 74/1,56 = 125 \text{ мВт.}$

По найденным значениям максимального тока, напряжения и мощности выбираем в качестве  $VT2$  транзистор типа КТ315В, а  $VT3$  – транзистор типа КТ361В. Это наиболее распространенные транзисторы разного типа проводимости с одинаковыми параметрами ( $I_{K \max}=100$  мА,  $U_{КЭ \max}=40$  В,  $P_{K \max}=150$  мВт,  $\beta = 40-120$ ,  $C_K = 7$  пФ,  $f\alpha = 250$  МГц).

12.3.13 Максимальный ток базы транзистора  $VT2$

$$I_{Б2 \max} = I_{Э2 \max} / (1 + \beta_{2 \min}) \approx 74/41 \approx 1,8 \text{ мА.}$$

12.3.14 Требуемый ток коллектора в рабочей точке транзистора  $VT1$

$$I_{K1} > 1,3 \cdot I_{Б2 \max} = 1,3 \cdot 1,8 = 2,3 \text{ мА.}$$



Принимаем ток  $I_{K1} = 3$  мА.

Максимальная мощность потерь в транзисторе  $VT1$

$$P_{K1 \max} = E \cdot I_{K1} = 16 \cdot 3 = 48 \text{ мВт.}$$

В качестве  $VT1$  выбираем транзистор КТ315В.

12.3.15 Для сохранения высокого коэффициента использования источника питания при открывании транзистора  $VT3$  потери постоянного напряжения на резисторе  $R5$  (он служит для температурной стабилизации режима  $VT1$ ) должны быть небольшими.

Принимаем  $U_{R5} = 0,9$  В. Тогда  $R5 = \frac{U_{R5}}{I_{K1}} = \frac{900}{3} = 300$  Ом.

12.3.16 Требуемое исходное напряжение смещения на резисторе  $R4$  близко к сумме пороговых напряжений база-эмиттер транзисторов  $VT2$ ,  $VT4$ ,  $VT3$ :

$$U_{\text{см}} \approx 3 \cdot 0,65 = 1,95 \text{ В.}$$

Отсюда находим  $R4 = \frac{U_{\text{см}}}{I_{K1}} = \frac{1950}{3} = 650$  Ом.

12.3.17 Суммарное падение напряжения на резисторах  $R3$  и  $R6$  определим как разность  $E - 2U_{\text{ЭБ пор}} = 16 - 2 \cdot 0,65 = 14,7$  В.

Следовательно,  $R3 + R6 = 14,7/3 = 4,9$  кОм.

Сопротивление резистора  $R6$  выбирается из условий [7]:

$$R6 > 30R_{\text{н}} \text{ и } R6 < R3/2.$$

Выберем  $R3=3,3$  кОм,  $R6=1,5$  кОм из ряда Е12.

Напряжение на вольтодобавочном конденсаторе  $C2$  составит

$$U_{C2} = R3 \cdot I_{K1} + 2U_{\text{ЭБ пор}} = 3,3 \cdot 3 + 1,3 = 11,2 \text{ В.}$$

Когда мгновенное значение напряжения на нагрузке достигает максимального значения

$$U_{\text{н max}} = I_{\text{н max}} R_{\text{н}} = 1,58 \cdot 8 = 12,6 \text{ В,}$$

напряжение в точке вольтодобавки составит

$$U_{\text{н max}} + U_{C2} = 12,6 + 11,2 = 23,8 \text{ В.}$$

12.3.18 Ток делителя, задающий режим работы транзистора  $VT1$ , выбираем на порядок больше тока базы этого транзистора:

$$I_{\text{Б1}} = I_{K1}/\beta_1 \approx 0,03 \text{ мА.}$$

Тогда легко рассчитать значения сопротивлений резисторов:

$$R2 = \frac{U_{\text{ЭБ1}} + U_{R5}}{I_{\text{дел}}} = \frac{0,7 + 0,3}{0,3} = 3,3 \text{ кОм;}$$

$$R1 = \frac{E - U_{\text{ЭБ1}} - U_{R5}}{I_{\text{дел}}} = \frac{16 - 0,7 - 0,3}{0,3} = 50 \text{ кОм.}$$

За счет резистора  $R1$  осуществляется общая параллельная ООС по постоянному напряжению, стабилизирующая начальный режим работы

всех транзисторов (в отсутствии входного сигнала регулировкой  $R1$  выставляется нулевое напряжение на нагрузке). Таким образом, режим транзистора  $VT1$  стабилизируется комбинированной ООС (еще есть ООС за счет  $R5$ ). Для температурной стабилизации начального смещения выходных транзисторов желательно вместо резистора  $R4$  применить три последовательно включенных диода с прямым падением напряжения  $0,65$  В (например, КД503А).

12.3.19 Основное достоинство рассчитываемого выходного каскада – обеспечение высокого коэффициента полезного действия. Оценим его величину.

Суммарная мощность потерь в выходных транзисторах –  $2 \cdot 2,65 = 5,3$  Вт, в транзисторах предоконечного каскада –  $2 \cdot 0,125 = 0,25$  Вт, в резисторах  $R9$  и  $R10$  –  $1,25$  Вт.

$$\text{КПД} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\Sigma}} = \frac{10}{10 + 5,3 + 0,25 + 1,25} \approx 0,6 \text{ или } 60\%.$$

12.3.20 Оценим качественно усилительные свойства каскада на средних частотах. Без цепи ПОС (если убрать конденсатор  $C2$ ) эквивалентное сопротивление нагрузки транзистора  $VT1$  по переменному току можно определить как  $(R3 + R6) \parallel \beta_2 \beta_4 R_{\text{н}}$ , где  $\beta_2 \beta_4 R_{\text{н}}$  – входное сопротивление эмиттерного повторителя на транзисторах  $VT2$  и  $VT4$ .

Цепь положительной обратной связи поддерживает неизменным напряжение на резисторе  $R3$ , создавая эффект динамической нагрузки. Переменная составляющая коллекторного тока, ответвляющаяся в резистор  $R3$ , резко уменьшается (в  $20$ – $50$  раз), что увеличивает эквивалентное сопротивление нагрузки для  $VT1$  и коэффициент усиления каскада с ОЭ по напряжению. При идеальном источнике входного сигнала ( $R_c = 0$ ) он может составлять несколько тысяч. Отрицательная обратная связь через резистор  $R1$  по переменному току в этом случае не работает.

При увеличении внутреннего сопротивления источника входного сигнала начинает проявляться параллельная ООС по напряжению через резистор  $R1$ . Она стабилизирует коэффициент усиления по току, который при большой глубине ООС стремится к величине  $K_{I \text{ ос}} = R1/R_{\text{н}}$  и уменьшает входное сопротивление каскада до значения  $R_{\text{вх ос}} = R1/K_U$ . Сквозной коэффициент усиления при большой глубине ООС стремится к величине

$$K_{e \text{ ос}} = \frac{U_{\text{н}}}{E_c} = \frac{R1}{R_c}.$$

12.3.21 В приложении Б приведен пример построения усилителя низкой частоты с регулировкой уровня громкости и тембра, использующий рассмотренный выходной каскад. Входной каскад с регулировкой коэффициента усиления обеспечивает предварительное усиление сигнала по напряжению. Он использует неинвертирующее включение операционного

усилителя DA1.1, что позволяет получить большое входное сопротивление УНЧ. Оно определяется величиной сопротивления резистора  $R3$  и может составлять сотни килоом. Практически близкое к нулю выходное сопротивление каскада превращает его в идеальный источник напряжения для каскада на операционном усилителе DA1.2, обеспечивающего регулировку тембра.

Применен активный симметричный регулятор тембра, не вносящий потерь в нейтральном положении. ОУ здесь охвачен цепями ООС, представляющими собой частотно зависимые делители напряжения нижних ( $R4...R7, C2...C3$ ) и верхних ( $R8...R10, C4$ ) частот.

При диапазоне регулирования тембра  $\pm 20$  дБ элементы схемы можно определить из следующих соотношений (здесь  $f_n$  и  $f_v$  – нижняя и верхняя частоты регулирования) [19]:

$$R4 = R6 = 0,11 \cdot R5;$$

$$C2 = C3 = \frac{159 \cdot 10^3}{f_n (\text{Гц}) \cdot R5 (\text{кОм})} \text{ (нФ)};$$

$$R7 = R4;$$

$$R8 = R9 = 0,33 \cdot R4;$$

$$C4 = \frac{4,34 \cdot 10^6}{f_v (\text{Гц}) \cdot R5 (\text{кОм})} \text{ (нФ)};$$

$$R10 \geq R5.$$

В выходном каскаде по переменному току действует глубокая параллельная ООС по напряжению. Коэффициент усиления выходного каскада по напряжению определяется отношением величин сопротивлений резисторов  $R12$  и  $R11$ :

$$K_{U \text{ OC}} = R12/R11.$$

## 12.4 Компоновка схемы усилителя с последовательной ООС по напряжению

В выходном каскаде без отрицательной обратной связи по переменному току в режиме АВ остается заметный уровень нелинейных искажений (5...15%). Так как в усилителях звукового сопровождения допустимая величина коэффициента нелинейных искажений не должна превышать 1%, необходимо вводить ООС глубиной не менее 10...15.

Наиболее эффективным путем улучшения качественных показателей УНЧ является введение в него общей последовательной ООС по напряжению, которая увеличивает входное сопротивление, уменьшает выходное сопротивление и стабилизирует коэффициент усиления по напряжению. Такую ООС удобно вводить, когда входной каскад УНЧ выполнен по схеме дифференциального усилителя. На один вход дифференциального уси-

лителя можно подавать входной сигнал, а на другой – сигнал обратной связи.

Рационально дифференциальный каскад подключить к выходному каскаду непосредственно (без разделительного конденсатора), построив таким образом своеобразный операционный усилитель с мощным выходом. Вариант принципиальной схемы УНЧ с последовательной ООС по напряжению приведен на рис. 12.2, а его функциональная схема с выделением операционного усилителя (гальванически связанные каскады на транзисторах  $VT1$ – $VT11$  образуют УПТ с дифференциальным входом и большим коэффициентом усиления по напряжению) – на рис. 12.3.

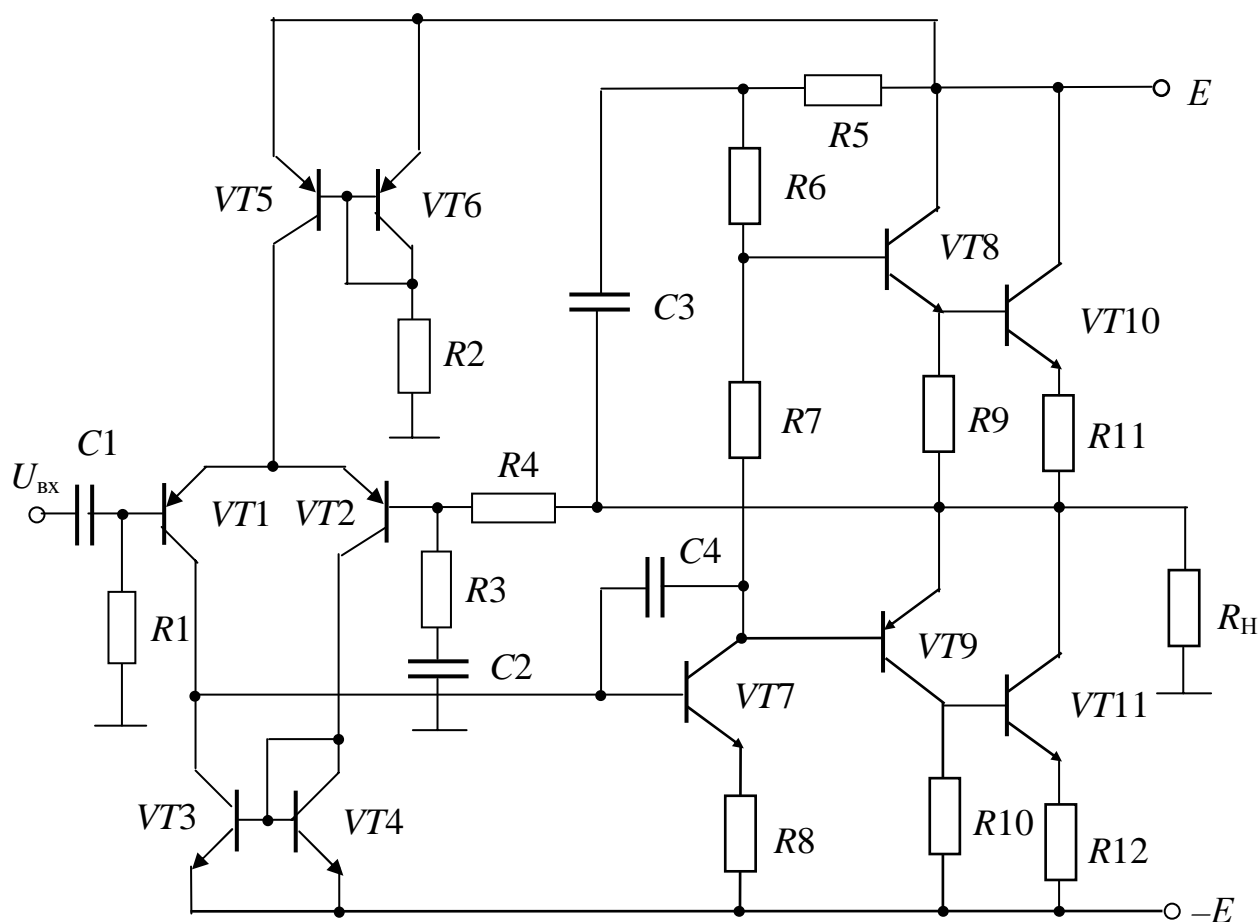


Рисунок 12.2 – УНЧ с последовательной ООС по напряжению

Используется неинвертирующее включение ОУ, при котором на средних частотах коэффициент усиления по напряжению определяется выражением (при большой глубине ООС):

$$K_{oc} = \frac{U_H}{U_{BX}} = 1 + \frac{R4}{R3}.$$

Конденсатор  $C2$  поставлен для того, чтобы ООС по постоянному току была стопроцентной. В этом случае исходное напряжение на нагрузке

автоматически устанавливается близким к нулю (отсутствует сдвиг нулевого уровня на выходе ОУ).

Входное сопротивление УНЧ определится как  $R_{\text{вх ос}} = R1$ , и желательно выбирать  $R4=R1$ . Тогда начальное смещение на выходе ОУ не превысит величины  $U_{\text{см}} + \Delta I_{\text{вх}} \cdot R4$ , где  $\Delta I_{\text{вх}}$  – разность входных токов ОУ (токов баз транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ ).

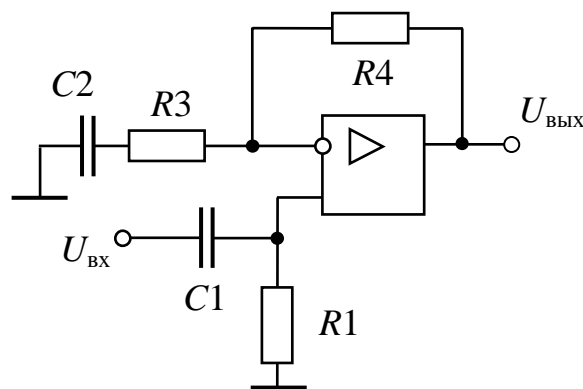


Рисунок 12.3 – Функциональная схема УНЧ

Стабилизатор общего тока эмиттеров  $VT1$  и  $VT2$  во входном дифференциальном каскаде выполнен на отражателе тока  $VT5$ ,  $VT6$ . Величину тока выбирают порядка долей миллиампера. Чем больше ток, тем больше коэффициент усиления дифференциального каскада по напряжению. Стабилизируемый ток задается резистором  $R2$ :

$$I_{\Gamma} = \frac{E - U_{\text{ЭБ}}}{R2}.$$

Роль динамической нагрузки каскада выполняет токовое зеркало на транзисторах  $VT3$ ,  $VT4$ . Коэффициент усиления по напряжению при этом удваивается (переменная составляющая тока транзистора  $VT2$  также участвует в усилении сигнала).

Резистор  $R8$  не зашунтирован блокирующим конденсатором и выполняет роль элемента местной ООС (последовательной по току), увеличивающей входное сопротивление каскада на транзисторе  $VT7$ , что позволяет повысить коэффициент усиления по напряжению входного дифференциального усилительного каскада.

Корректирующий конденсатор делает постоянную времени каскада на транзисторе  $VT7$  много большей, чем постоянные времени других усилительных каскадов в области верхних частот. Это позволяет сформировать желаемую ЛАЧХ операционного усилителя с наклоном минус 20 дБ/дек и обеспечить устойчивость УНЧ при большой глубине обратной связи.

Расчет емкостей конденсаторов  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  производится по допустимой величине частотных искажений на нижней частоте рабочего диапа-

зона, емкость конденсатора  $C4$  определяется по заданной величине  $f_b$  с учетом обеспечения устойчивости при рассчитанной глубине ООС.

## 12.5 Экспериментальная часть курсового проекта

После компоновки принципиальной схемы УНЧ, выбора транзисторов и расчета параметров пассивных элементов производится моделирование работы спроектированного устройства и экспериментальная подгонка некоторых величин.

Сначала необходимо проверить статический режим работы всех транзисторов, измерив значение коллекторного тока. Начальное значение тока оконечных транзисторов в режиме  $AB$  подгоняют регулировкой сопротивления резистора  $R7$  (см. схему рис. 12.2).

Затем следует зафиксировать амплитуду входного синусоидального сигнала на частоте 1 кГц (область средних частот), при которой получается максимальная неискаженная величина выходного сигнала. Этот эксперимент позволяет уточнить максимальную мощность, отдаваемую в нагрузку, и измерить коэффициент усиления по напряжению. Посмотрите осциллограмму напряжения в точке вольтодобавки.

Третий этап экспериментальных исследований производится путем снятия амплитудно-частотной характеристики усилителя и оценки верхней и нижней граничных частот рабочего диапазона. При необходимости подгоняются величины емкостей конденсаторов.

Результаты моделирования в виде экспериментальных схем и осциллограмм вставляются в текст пояснительной записки, который обычно оформляется в формате WORD. Чтобы скопировать схему, подготовленную на ASIMEC, необходимо выделить ее прямоугольником с помощью мыши и нажать клавишу Alt. После этого схему можно вставить из буфера Windows. Если моделирование производится с помощью WEWB, выберите строку Copybits меню Edit и, выделив мышкой прямоугольник, отпустите ее. После чего картинка вставляется в WORD из буфера.

## 12.6 Техническое задание на курсовой проект

В таблице 12.1 приведены варианты заданий на проектирование УНЧ при следующих исходных данных:

- 1)  $P_H$  – активная мощность в нагрузке;
- 2)  $R_H$  – активное сопротивление нагрузки;
- 3)  $E_c$  – ЭДС источника сигнала;
- 4)  $R_c$  – внутреннее сопротивление источника сигнала;
- 5)  $f_H$  – нижняя граничная частота полосы пропускания на уровне 3 дБ;
- 6)  $f_b$  – верхняя граничная частота полосы пропускания на уровне 3 дБ;
- 7)  $T_{C\ max}$  – максимальная температура окружающей среды.

Таблица 12.1 – Варианты заданий на курсовой проект

Вариант	$P_H$ , Вт	$R_H$ , Ом	$E_c$ , мВ	$R_c$ , Ом	$f_H$ , Гц	$f_B$ , кГц	$T_{Cmax}$ , °С
1	1	8	100	100	20	20	60
2	2	8	200	50	15	25	50
3	3	8	300	150	10	30	40
4	4	8	400	200	20	20	60
5	5	8	1000	300	15	25	50
6	6	10	200	400	10	30	40
7	7	10	300	500	20	20	60
8	8	10	400	600	15	25	50
9	9	10	100	700	10	30	40
10	10	10	200	800	20	20	60
11	11	8	300	100	15	25	50
12	12	8	400	50	10	30	40
13	13	8	100	150	20	20	60
14	14	8	200	200	15	25	50
15	15	8	300	300	10	30	40
16	16	4	400	400	20	20	60
17	17	4	100	500	15	25	50
18	18	4	200	600	10	30	40
19	19	4	300	700	20	20	60
20	20	4	400	800	15	25	50
21	21	8	100	100	10	30	40
22	22	8	200	50	20	20	60
23	23	8	300	150	15	25	50
24	24	8	400	200	10	30	40
25	25	8	100	300	20	20	60
26	26	10	200	400	15	25	50
27	27	10	300	500	10	30	40
28	28	10	400	600	20	20	60
29	29	10	100	700	15	25	50
30	30	10	200	800	10	30	40
31	31	4	300	100	20	20	60
32	32	4	400	50	15	25	50
33	33	4	100	150	10	30	40
34	34	4	200	200	20	20	60
35	35	4	300	300	15	25	50
36	36	4	400	400	10	30	40
37	37	4	100	500	20	20	60
38	38	4	200	600	15	25	50
39	39	4	300	700	10	30	40
40	40	4	400	800	20	20	40

Для всех вариантов допустимое значение коэффициента нелинейных искажений не более 1%.

Необходимо разработать принципиальную схему усилителя с перечнем элементов, оценить величины входного и выходного сопротивлений, построить амплитудно-частотную характеристику  $K_e(\omega)$ . Схема УНЧ обоснованно выбирается из двух-трех возможных вариантов.

Примерный перечень разделов пояснительной записки:

- 1 Введение
  - 2 Выбор и обоснование электрической принципиальной схемы
  - 3 Расчет усилителя низкой частоты
    - 3.1 Расчет выходного каскада
    - 3.2 Расчет предоконечного каскада
    - 3.3 Расчет входного каскада
    - 3.4 Расчет элементов цепи обратной связи
  - 4 Построение амплитудно-частотной характеристики сквозного коэффициента усиления, анализ устойчивости спроектированного усилителя, синтез корректирующей цепи
  - 5 Экспериментальная часть по моделированию работы УНЧ
  - 6 Заключение
- ФЭТ КП.5.034.015 ЭЗ Электрическая принципиальная схема УНЧ  
 ФЭТ КП.5.034.015 ПЭЗ Перечень элементов электрической принципиальной схемы УНЧ

Необходимо соблюдать требования и правила, оговоренные в стандарте вуза по оформлению курсовых и дипломных проектов [12].

Текст данного методического пособия может служить примером оформления текстовой части пояснительной записки. Обратите внимание на примеры оформления рисунков, формул, таблиц, содержания, списка литературы.

Пример оформления технического задания на курсовое проектирование приведен в приложении А. Чертежи схемы электрической принципиальной (код схемы ЭЗ) и перечня элементов (код схемы ПЭЗ) могут быть выполнены на листах формата А4 (см. приложения Б и В) и вложены в пояснительную записку, ориентировочный объем которой 10–15 страниц. Три последние цифры в обозначении документа должны соответствовать номеру задания, например 015 для варианта 15. Латинский алфавит определяет последовательность расположения обозначений в перечне элементов: конденсаторы (C1, C2), резисторы (R1, R2...R5), полупроводниковые приборы (VD1...VD3, VT1, VT2...VT6).

Для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ усилителя желательно использовать пакет MathCad.



## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
2. Изъюрова Г.И., Королев Г.В., Терехов В.А. и др. Расчет электронных схем. Примеры и задачи. – М.: Высшая школа, 1987. – 335 с.
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
5. Воробьев Н.И. Проектирование электронных устройств. – М.: Высшая школа, 1989. – 223 с.
6. Остапенко Г.С. Усилительные устройства: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1980. – 400 с.
7. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 320 с.
8. Денисов Н.П., Шарапов А.В., Шибяев А.А. Электроника и схемотехника: Учебное пособие. В 2-х частях. – Томск, ТМЦ ДО, 2002. – Ч.2. – 220 с.
9. Шарапов А.В., Тановицкий Ю.Н. Аналоговая схемотехника: Учебное методическое пособие. – Томск: ТМЦДО, 2003. – 60 с.
10. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 598 с.
11. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник / Под ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 902 с.
12. ОС ТАСУР 6.1-97. Работы студенческие учебные и выпускные квалификационные. Общие требования и правила оформления.
13. Усатенко С.Т., Каченюк Т.К., Терехова М.В. Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справочник. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 325 с.
14. Транзисторы широкого применения. Справочник / Под ред. Б.Л. Перельмана. – М.: Радио и связь, 1981. – 656 с.
15. Краткий справочник конструктора РЭА / Под ред. Р.Г. Варламова. – М.: Советское радио, 1972. – 673 с.
16. Варакин Л.В. Бестрансформаторные усилители мощности: Справочник. – М.: Радио и связь, 1984. – 128 с.
17. Проектирование транзисторных усилителей низкой частоты / Под ред. Н.А. Безладного. – М.: Связь, 1978. – 368 с.
18. Быстров Ю.А., Мироненко И.Г. Электронные цепи и микросхемотехника: Учебник для вузов. – Л.:, 2002. – 350 с.
19. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1991. – 446 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

(справочное)

Пример оформления технического задания

Федеральное агентство по образованию

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра промышленной электроники

Утверждаю:  
Зав. кафедрой ПрЭ  
\_\_\_\_\_ А.В.Кобзев

**ЗАДАНИЕ**

на курсовое проектирование по дисциплине  
«Аналоговая схемотехника»

студенту \_\_\_\_\_Иванову Петру Сидоровичу\_\_\_\_\_

группа \_\_\_\_\_365-5\_\_\_\_\_факультет\_\_\_\_\_ФЭТ\_\_\_\_\_

Тема проекта: \_\_\_\_\_Усилитель низкой частоты\_\_\_\_\_

Срок сдачи студентом законченного проекта \_\_\_\_\_26.05.07\_\_\_\_\_

Исходные данные к проекту:

Вариант	$P_n$ , Вт	$R_n$ , Ом	$E_c$ , мВ	$R_c$ , Ом	$f_n$ , Гц	$f_v$ , кГц	$T_{C\max}$ , °С
1	1	8	100	100	20	20	60

Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов): выбор и обоснование принципиальной электрической схемы УНЧ, расчет каскадов усилителя, анализ устойчивости и синтез корректирующей цепи, построение амплитудно-частотной характеристики.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей и схем): схема электрическая принципиальная, перечень элементов принципиальной электрической схемы УНЧ.

Дата выдачи задания: \_\_\_\_\_

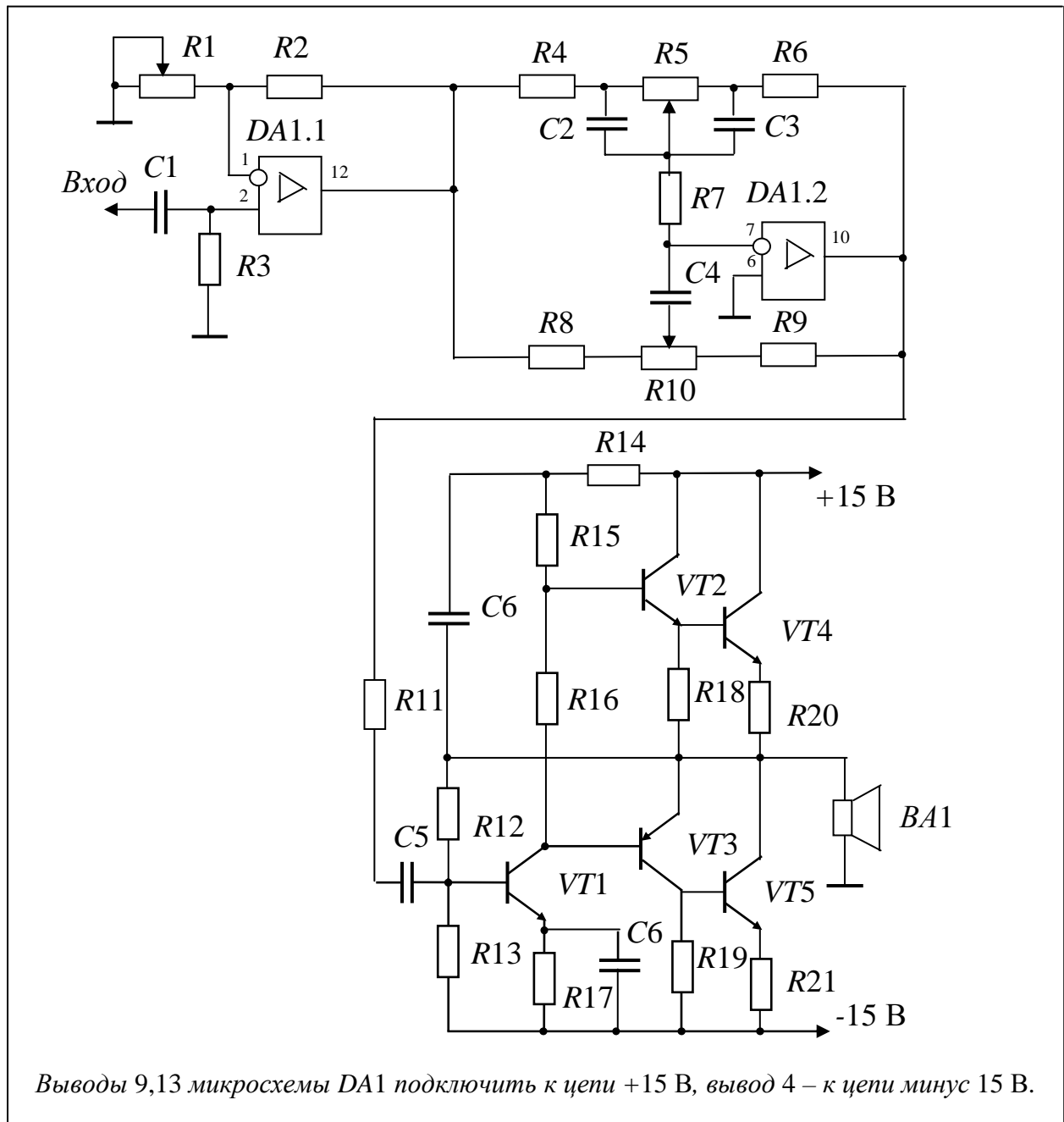
Руководитель  
профессор кафедры ПрЭ \_\_\_\_\_А.В. Шарапов

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_  
(дата и подпись студента)

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Пример оформления схемы электрической принципиальной



					ФЭТ КП.5.034.008 ЭЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Усилитель низкой частоты Схема электрическая принципиальная	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Иванов П.С.					Э		
Провер.	Шарапов АВ.							
Т. контр.						Лист	Листов 1	
Н. контр.					ТУСУР, гр. 360-2			
Утв.								

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**

(справочное)

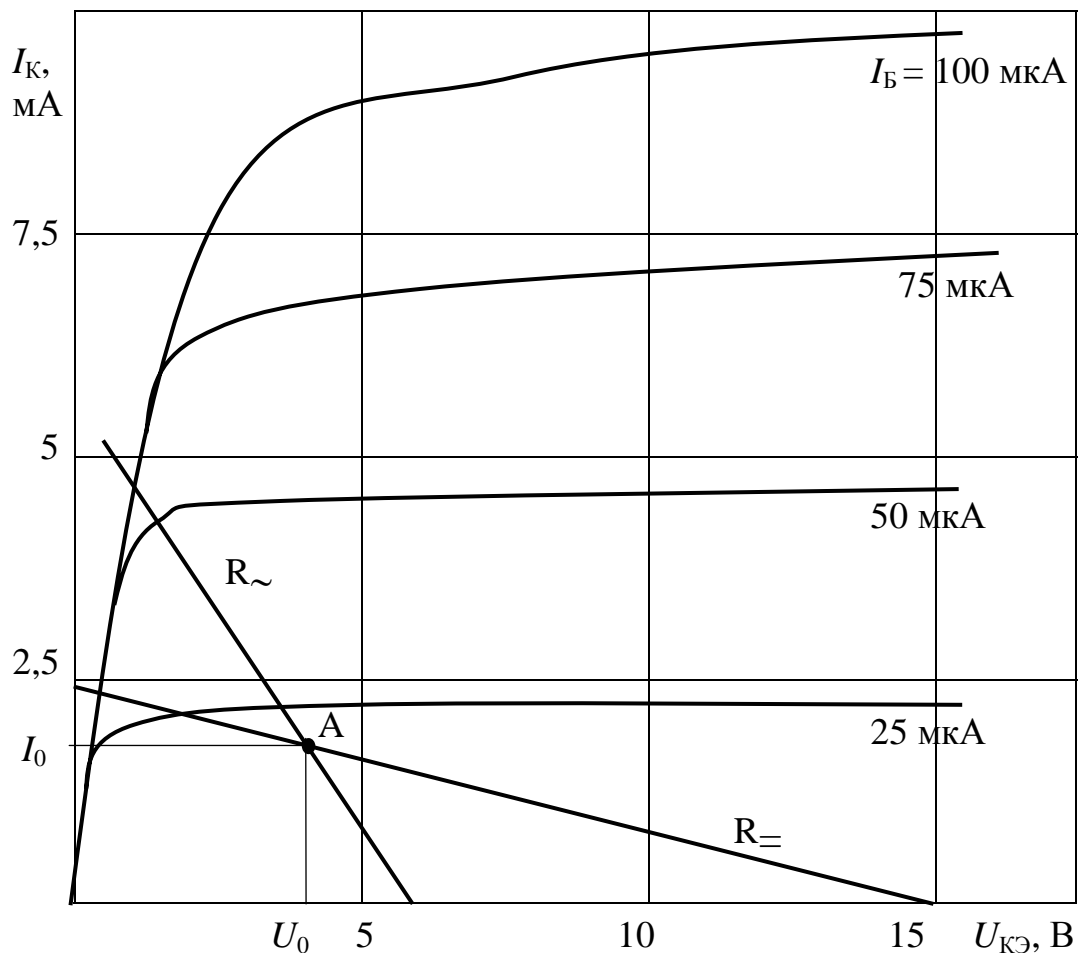
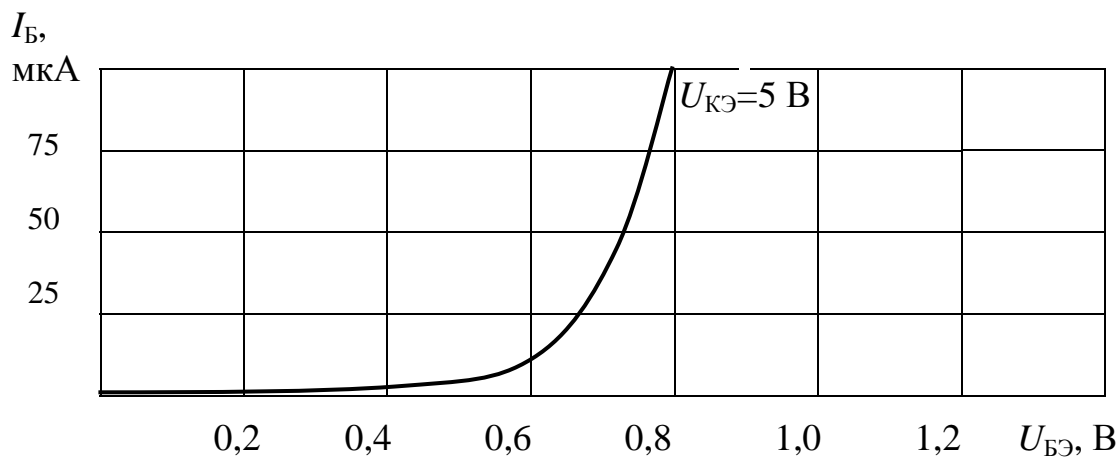
Пример оформления перечня элементов для электрических  
принципиальных схем

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание					
	Резонатор кварцевый							
BQ1	РК-169МА-14БП-12000 кГц-В ОД 0.338.003ТУ	1						
	Конденсаторы							
C1, C2	К10-7В-П33-30 пФ±10%	2						
C3	К53-14-6,3 В-10 мкФ±20% ОЖ 0.464.139ТУ	1						
C4	К50-16-16В-500 мкФ ОЖО.464.111ТУ	1						
C5	КМ-6А-Н90-1 мкФ ОЖО.460.061ТУ							
	Микросхемы							
DA1	К142ЕН1Б 6К 347.098 ТУ1	1						
DD1, DD2	К514ИД1 6К 0.348.006ТУ18	2						
	Индикатор АЛС324А аА 0.336367ТУ	2						
	Резисторы							
R1...R5	МЛТ-0,25-10кОм±10% ГОСТ 7113-77	5						
R6	С5-16-МВ-2Вт-0,1 Ом±5% ОЖО.467.513	1						
R7	СПЗ-226-470 Ом ОЖО.468.136ТУ	1						
	Приборы полупроводниковые							
VD1	Стабилитрон КС156А СМ3.362.812ТУ	1						
VT1	Транзистор КТ315А ЖК 3.365.200ТУ	1						
VT2	Транзистор КТ815Б ААО.336.106ТУ	1						
X1	Вилка СНП58-64/94х9В-23-2В КЕ 0.364.043ТУ	1						
ФЭТ КП.5.034.015 ПЭЗ								
Изм	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Усилитель низкой частоты Перечень элементов	Лит.	Лист	Листов
Разраб.	Иванов П.С.					Э		1
Пров.	Шарапов А.В.					ТУСУР, гр. 360-2		
Т.контр.								
Н.контр.								
Утв.								

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

Характеристики и параметры биполярного транзистора

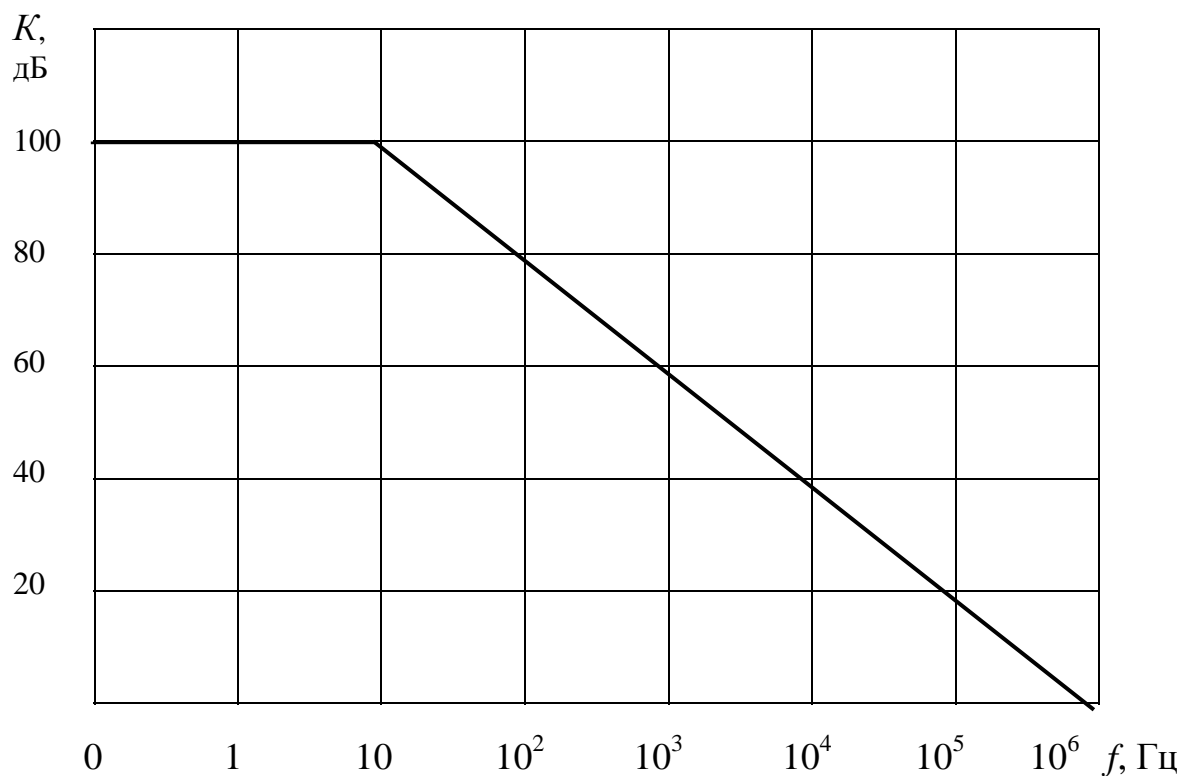


Коэффициент усиления тока базы  $\beta = 100$ . Омическое сопротивление области базы  $r_B = 100\ \Omega$ . Сопротивление коллекторного перехода  $r_K = 5\ \text{МОм}$ . Транзистор кремниевый.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(справочное)

Характеристики и параметры операционного усилителя



Входное сопротивление  $r_{\text{вх}}=100$  кОм.

Выходное сопротивление  $r_{\text{вых}}=100$  Ом.

Напряжение смещения  $U_{\text{см}} \leq 5$  мВ.

Дрейф напряжения смещения  $\delta U_{\text{см}} \leq 50$  мкВ/К.

Входной ток  $I_{\text{вх}} \leq 5$  мкА.

Разность входных токов  $\Delta I_{\text{вх}} \leq 1$  мкА.

Дрейф входного тока  $\delta I_{\text{вх}} \leq 10$  нА/К.

Дрейф разности входных токов  $\delta \Delta I_{\text{вх}} \leq 5$  нА/К.

Входное сопротивление для синфазного сигнала  $r_{\text{сф}}=100$  МОм.