

Министерство образования Российской Федерации

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

А.В. Шарапов, Ю.Н. Тановицкий

АНАЛОГОВАЯ СХЕМОТЕХНИКА

Учебное методическое пособие

2003

Рецензенты: доцент кафедры «Промышленная электроника» ТУСУР,
канд. техн. наук Воронин А.И.

Корректор: Красовская Е.Н.

Шарапов А.В., Тановицкий Ю.Н.

Аналоговая схемотехника: Учебное методическое пособие. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. – 60 с.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся с использованием дистанционных образовательных технологий, и содержит методические указания к организации самостоятельной работы по одноименной дисциплине.

Приведены примеры решения задач по усилительным устройствам, программа выполнения компьютерных лабораторных работ, варианты заданий и пример выполнения контрольной работы, описание компьютерных обучающих и моделирующих программ.

Приведены варианты технических заданий на курсовой проект и методические рекомендации к его выполнению.

© Шарапов А.В., Тановицкий Ю.Н., 2003

© Томский межвузовский центр
дистанционного образования, 2003

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	4
2 Программа лекционного курса	5
3 Список рекомендуемой литературы	6
4 Компьютерные обучающие и контролирующие программы	7
5 Компьютерный практикум по аналоговой схемотехнике	8
5.1 Цель практикума	8
5.2 Программа моделирования схем ASIMEC	8
6 Лабораторная работа №1. Исследование усилительных каскадов на биполярных транзисторах	13
7 Лабораторная работа №2. Усилители и преобразователи сигналов на операционных усилителях	17
8 Лабораторная работа №3. Избирательные усилители и генераторы гармонических колебаний	20
9 Примеры решения задач	23
10 Варианты заданий контрольной работы №1	36
11 Пример выполнения контрольной работы №1	40
12 Рекомендации по выполнению курсового проекта	44
12.1 Цель курсового проектирования.....	44
12.2 Конкретизация технического задания	44
12.3 Выбор элементов выходного каскада	45
12.4 Компоновка схемы усилителя с последовательной ООС по напряжению	50
12.5 Экспериментальная часть курсового проекта	53
12.6 Техническое задание на курсовой проект	53
Приложение А Пример оформления технического задания	56
Приложение Б Пример оформления электрической принципиальной схемы	57
Приложение В Пример оформления перечня элементов для электрических принципиальных схем	58
Приложение Г Характеристики и параметры биполярного транзистора	59
Приложение Д Характеристики и параметры операционного усилителя	60

1 ВВЕДЕНИЕ

В дисциплине «Аналоговая схемотехника» рассматриваются усилительные устройства, генераторы гармонических колебаний и стабилизаторы постоянного напряжения. В процессе ее изучения приобретаются навыки расчета и проектирования аналоговых электронных устройств.

Данное пособие включает материалы, необходимые для организации самостоятельной работы при дистанционной технологии изучения дисциплины с использованием компьютерных обучающих, моделирующих и контролирующих программ.

Отчеты по лабораторным работам и контрольной работе №1 оформляются в виде текстовых файлов в формате Word и пересылаются на проверку.

2 ПРОГРАММА ЛЕКЦИОННОГО КУРСА

1. Классификация и обзор усилительных устройств.
2. Обратные связи в усилителях.
3. Эквивалентные схемы и малосигнальные параметры усилительных приборов.
4. Усилительный каскад по схеме с общим эмиттером.
5. Температурная стабилизация режима работы биполярного транзистора.
6. Каскад с общим эмиттером при работе в режиме большого сигнала.
7. Коррекция частотных характеристик.
8. Усилительные каскады УНЧ по схемам с общей базой и общим коллектором.
9. Усилительные каскады на полевых транзисторах.
10. Усилители мощности.
11. Операционные усилители.
12. Примеры применения операционных усилителей.
13. Избирательные усилители.
14. Генераторы гармонических колебаний.
15. Стабилизаторы постоянного напряжения.

3 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.Г., Войшвилло Г.В., Трискало И.А. Усилительные устройства. Сборник задач и упражнений: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 160 с.
2. Варакин Л.В. Бестрансформаторные усилители мощности: Справочник. – М.: Радио и связь, 1984. – 128 с.
3. Воробьев Н.И. Проектирование электронных устройств. – М.: Высшая школа, 1989. – 223 с.
4. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с.
5. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
6. Денисов Н.П., Шарапов А.В., Шибяев А.А. Электроника и схемотехника. Учебное пособие: в 2 частях. – Томск: ТМЦ ДО, 2002. – Ч.2. – 220 с.
7. Изъюрова Г.И., Королев Г.В., Терехов В.А. Расчет электронных схем. Примеры и задачи. – М.: Высшая школа, 1987. – 335 с.
8. Краткий справочник конструктора РЭА. / Под ред. Р.Г. Варламова. – М.: Советское радио, 1972. – 673 с.
9. Остапенко Г.С. Усилительные устройства: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1980. – 400 с.
10. Образовательный стандарт вуза ОС ТУСУР 01-2013. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления.
11. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 320 с.
12. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник / Под ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 902 с.
13. Проектирование транзисторных усилителей низкой частоты. / Под ред. Н.А. Безладного. – М.: Связь, 1978. – 368 с.
14. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
15. Транзисторы широкого применения. Справочник. / Под ред. Б.Л. Перельмана. – М.: Радио и связь, 1981. – 656 с.
16. Усатенко С.Т., Каченюк Т.К., Терехова М.В. Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справочник. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 325 с.
17. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 598 с.
18. Шарапов А.В. Аналоговая схемотехника: Учебное пособие. – Томск.: ТМЦ ДО, 2003. – 128 с.
19. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1991. – 446 с.

4 КОМПЬЮТЕРНЫЕ ОБУЧАЮЩИЕ И КОНТРОЛИРУЮЩИЕ ПРОГРАММЫ

Отчет по контрольной работе №1 с анализом предложенных схем усилительных каскадов на биполярном транзисторе и операционном усилителе оформляется и пересылается на проверку в виде текстового файла в формате Word.

Лабораторные работы выполняются с использованием пакета ASIMES. В учебном методическом пособии приведены 10 вариантов индивидуальных заданий для каждой лабораторной работы.

Выбор варианта лабораторных работ осуществляется по общим правилам с использованием следующей формулы:

$$V = (N \times K) \text{ div } 100,$$

где V — искомый номер варианта,
 N — общее количество вариантов,
 div — целочисленное деление,
при $V = 0$ выбирается максимальный вариант,
 K — код варианта.

На проверку необходимо отправить файлы исследуемых схем и текстовые отчеты по выполнению лабораторных работ, рецензирование которых проводит преподаватель.

5 КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО АНАЛОГОВОЙ СХЕМОТЕХНИКЕ

5.1 Цель практикума

Целью лабораторного практикума является приобретение навыков создания и анализа электронных схем на экране персонального компьютера с помощью пакета ASIMEC. Этот пакет содержит необходимые инструменты для создания графических образов схем, их моделирования и визуализации результатов.

5.2 Программа моделирования схем ASIMEC

Чтобы установить ASIMEC на компьютере, запустите дистрибутив программы asimec_nnn.exe (nnn – номер версии), выберите директорию, в которой будут храниться файлы, следуйте инструкциям. Последнюю версию программы можно скачать с официального сайта программы: <http://www.asimec.com> или с сайта университета: <http://www.ie.tusur.ru/content.php?id=490>

После инсталляции программы рекомендуем запустить исполняемый файл asimec.exe, визуально исследовать интерфейс программы, загрузить несколько примеров со схемами из каталога DEMO (и его подкаталогов) командой *Открыть* из главного меню *Файл*, запустить процесс моделирования (кнопка *Анализ*), попытаться изменить параметры элементов схемы и снова провести моделирование. После этого вернуться к изучению описания.

После запуска ASIMEC перед Вами открывается *основное окно*. Его вид представлен на рис. 5.1.

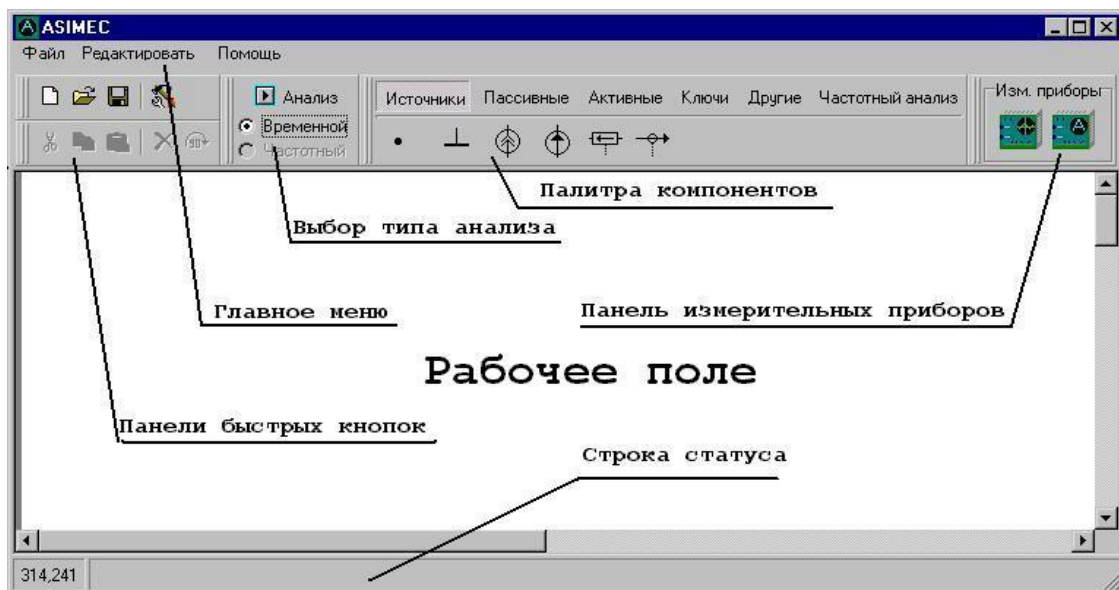


Рисунок 5.1

В верхней части окна ASIMEC вы видите *полосу главного меню*. Элементы главного меню предоставляют возможность вызывать все основные команды. Ниже полосы главного меню расположены *инструментальные панели*. На левой панели друг под другом находятся два ряда *быстрых кнопок*, дублирующих некоторые, наиболее часто используемые команды меню. Правее них расположена инструментальная панель, позволяющая выбрать тип анализа (временной/частотный), и кнопка запуска. Далее располагается самая крупная панель, содержащая *палитру электронных компонентов*. Небольшая инструментальная панель, располагающаяся справа, содержит набор компонентов – измерительных приборов. Основное ("*Рабочее*") поле окна представляет собой область размещения компонентов из палитры и их соединения. Краткие подсказки по элементам управления можно получить во всплывающих окнах, если на некоторое время поместить на них курсор мыши. Подсказки отображаются также в *строке статуса*.

Раздел главного меню **Файл** позволяет создать новый проект, открыть ранее созданный проект, сохранить текущий проект в файле с заданным именем и выйти из системы. Функции команд понятны по названию. В нижней части панели меню находится список проектов, с которыми проводилась работа в последнее время. Запоминаются четыре последних проекта. Ряд элементов меню имеет комбинацию "горячих клавиш", позволяющих быстро выполнять те или иные операции простым нажатием их на клавиатуре. Такие комбинации отображаются в меню справа от команд. Пиктограммы на инструментальных панелях соответствуют изображениям в главном меню.

Раздел меню **Редактировать** позволяет выполнять операции копирования, удаления выделенных элементов, их вращения, зеркального отображения. Вид раздела представлен на рис. 5.2.

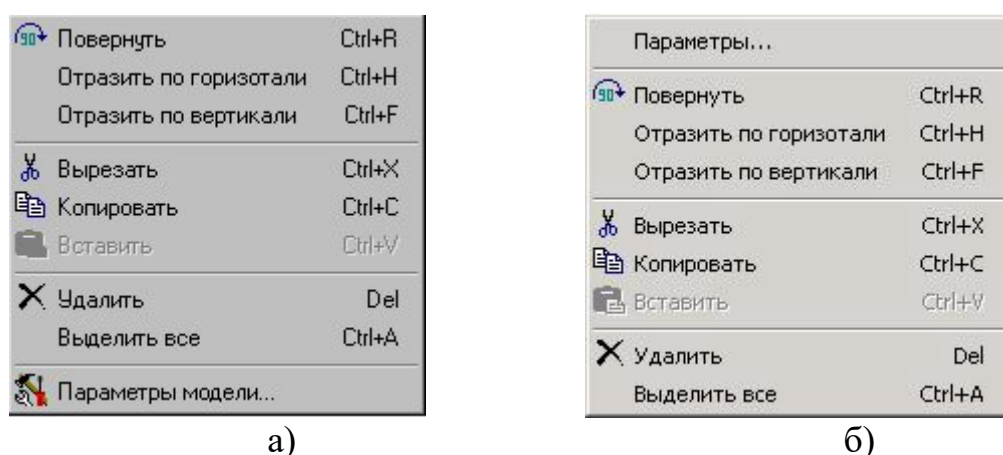


Рисунок 5.2. – Раздел «Редактировать» главного меню (а) и всплывающее меню (б)

Раздел меню **Помощь** позволяет вызвать встроенную справочную систему.

Помимо главного меню, в ASIMEC имеется несколько *контекстных всплывающих меню*. Контекстное меню вызывается нажатием правой кнопки мыши в *рабочей области* основного окна – рабочее поле. Наиболее полный вариант меню соответствует нажатию правой кнопки мыши на элементе, размещенном в рабочей области. Вид всплывающего окна меню приведен на рисунке. Команды **Вставить**, **Вырезать**, **Копировать**, **Удалить**, **Выделить все** присутствуют во всех вариантах всплывающего меню. Их назначение – работа с внутренним буфером обмена ASIMEC. Команды изменения положения графического изображения элемента на схеме соответствуют командам раздела **Редактировать** главного меню. Команда **Параметры** вызывает окно настройки параметров элементов. Его вид зависит от типа компонента.

Палитра компонентов разделена на шесть групп, переключение между которыми осуществляется щелчком мыши на соответствующем названии группы (**Источники/Пассивные/Активные/Ключи/Другие/Частотный анализ**). Состав каждой группы можно увидеть после запуска программы.

Создание схемы состоит из следующих этапов: размещение необходимых компонентов и измерительных приборов на *рабочем поле*; соединение выводов компонентов проводниками и задание параметров компонентов.

Для того чтобы поместить компонент на рабочее поле, необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по его изображению на палитре компонентов. После этого переместить курсор на то место в рабочей области, где нужно поместить элемент, и щелкнуть еще раз.

После того как компоненты размещены в рабочей области, их можно объединить в группу (выделить). Для этого достаточно щелкнуть левой кнопкой мыши в рабочей области и, не отпуская, потянуть вправо вниз. При этом появится прерывистый прямоугольник, и после отпускания кнопки мыши компоненты схемы, оказавшиеся внутри его, окажутся выделены. Щелчок мышью на пустом месте рабочей области убирает выделение. Выделенные компоненты можно перемещать, копировать, удалять, вращать и т.д.

Для того чтобы соединить два вывода, необходимо подвести курсор мыши к первому выводу до появления синей точки (рис. 5.3). Далее щелкните мышью и, не отпуская, тяните проводник ко второму выводу. Когда на нем появится синяя точка, отпустите клавишу мыши – на схеме появится проводник.

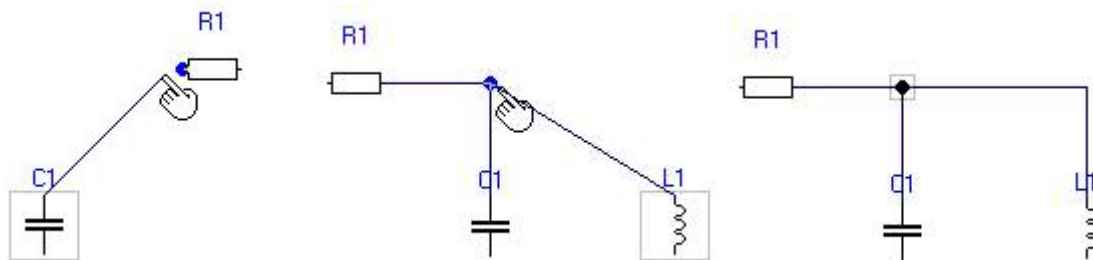


Рисунок 5.3

Для удаления соединения между выводами, подведите курсор мыши к концу вывода элемента, в том месте, где он соединяется с проводником, и после появления синей точки нажмите левую клавишу мыши. Далее, не отпуская клавишу, оттащите указатель соединения на пустое место в сторону от вывода элемента и, после того как синяя точка пропадет, отпустите клавишу.

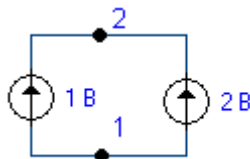
Если при протягивании соединения подвести курсор мыши к проводнику и после появления синей точки отпустить клавишу мыши, автоматически создастся точка и к ней подсоединится проводник.

Параметры размещенных на схеме компонентов можно задать в меню, которое появляется после двойного щелчка мыши по компоненту.

Чтобы скопировать схему в отчет, выделите ее прямоугольником, образованным при нажатии левой кнопки мыши и ее перемещении (кнопку мыши необходимо при этом удерживать). Нажмите клавишу Alt и только после этого отпустите кнопку мыши. Рисунок схемы будет скопирован в буфер Windows. Далее его можно вставить, например, в документ Word.

Допустимое и недопустимое расположение элементов на схеме

Поскольку имеется возможность создавать произвольные схемы, не исключено, что могут быть созданы и *топологически некорректные* схемы. Пример такой схемы –



Напряжение между узлами 1 и 2 должно быть равно значению источников напряжения, но поскольку их два, то возникает неразрешимое противоречие. Если попытаться создать физический аналог такой схемы, то возникнет короткое замыкание, разрушительные эффекты которого будут тем сильнее, чем «чище» эксперимент. ASIMES при попытке моделирования такой схемы выдаст сообщение об ошибке: «Недопустимое расположение элемента Е...» Помимо описанной, возможны и другие варианты некорректных схем. Более подробная информация содержится в одноименном разделе *Справки*.

Для **задания входных воздействий** на схему используйте источники напряжения или тока – после двойного щелчка по ним открывается меню, которое позволит выбрать тип источника, включая синусоидальный или прямоугольный. Исключение составляет *частотный анализ*, для проведения которого следует разместить на схеме «генератор напряжения (тока) с переменной частотой» . Приборы (амперметры или вольтметры) при частотном анализе будут показывать отношение измеряемых величин к выходной величине такого генератора (см. пример в файле RLC-цепочка.ASC).

После задания параметров схемы, воздействий, размещения измерительных приборов и выбора типа анализа (Временной или Частотный) она го-

това для моделирования. Однако нельзя забывать о **параметрах моделирования**. Для задания параметров нажмите кнопку . В появившемся окне *Параметры моделирования* будет активирована вкладка *Общие параметры*. Обратите внимание на параметр *Продолжительность моделирования* – он определяет соответствующий временной интервал, который для разных задач может изменяться в очень широких пределах и определяется пользователем. Если вы не являетесь опытным пользователем, то среди численных методов рекомендуем GEAR2 и TRAPEZOIDAL – Гира и трапеций, а параметр *точность интегрирования* выбирать равным 0.001. При моделировании во временной области шаг интегрирования выбирается автоматически, в зависимости от состояния схемы и требований по точности. Имеется также возможность ограничить шаг интегрирования – параметр *максимальный шаг*, что, однако, может повлечь существенный рост времени моделирования. Важными параметрами для частотного анализа (вкладка ЛАЧХ, ЛФЧХ) являются *Минимальная* и *Максимальная* частоты, ограничивающие диапазон анализа.

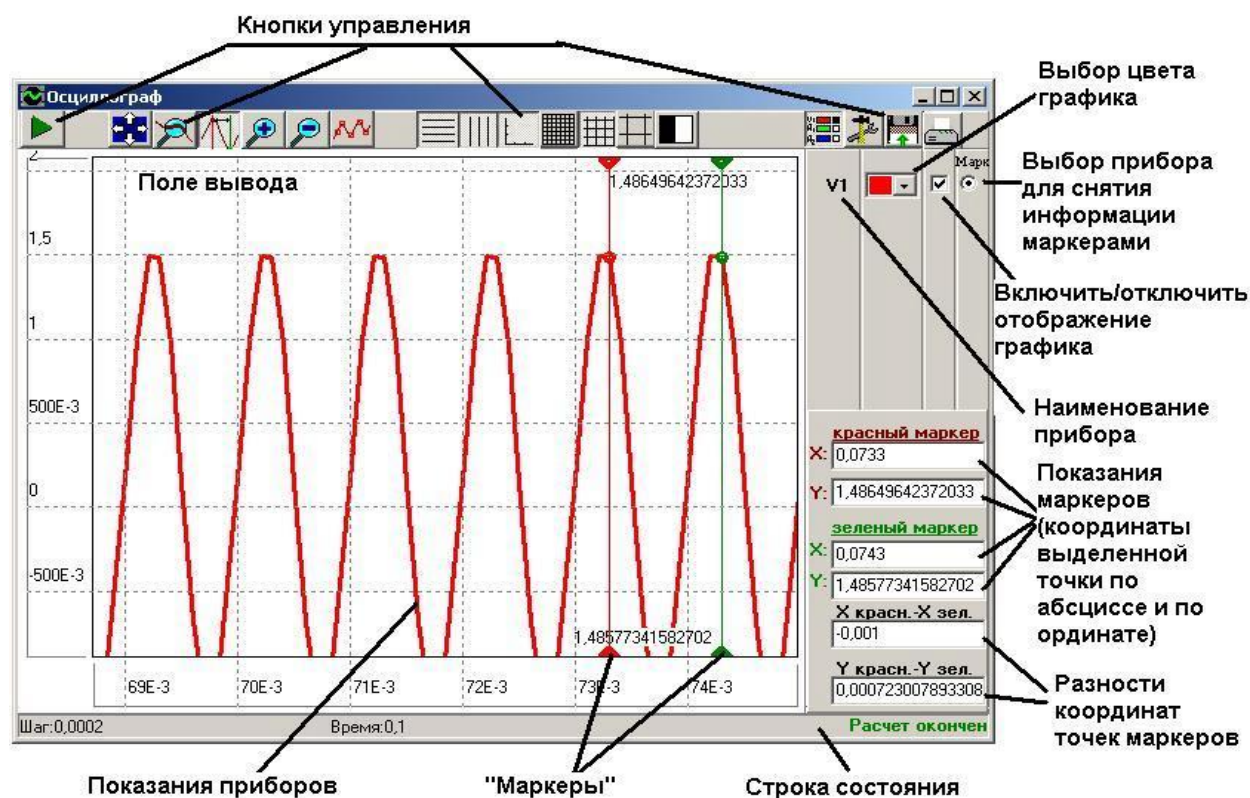


Рисунок 5.4

После запуска моделирования (кнопка Анализ) появляется окно осциллографа (рис. 5.4), на котором будут построены графики, соответствующие показаниям измерительных приборов. Если интересуют мгновенные значения измеряемых величин, воспользуйтесь маркерами. Для копирования результатов в отчет используйте сочетание клавиш Ctrl+C. При этом иногда, например при выводе на печать, предварительно лучше инвертировать фон, – кнопка .

6 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы: знакомство со схемами, задающими режим работы транзистора по постоянному току, исследование усилительных каскадов по схемам с общим эмиттером и общим коллектором, дифференциального усилительного каскада.

Программа работы

6.1 Собрать цепь, задающую усилительный режим транзистора (рис. 6.1, где N – номер варианта от 0 до 9). С помощью маркеров измерить ток и напряжение в рабочей точке. Построить нагрузочную прямую постоянного тока и отметить на ней положение точки покоя. Измерить напряжение на участке база-эмиттер транзистора.

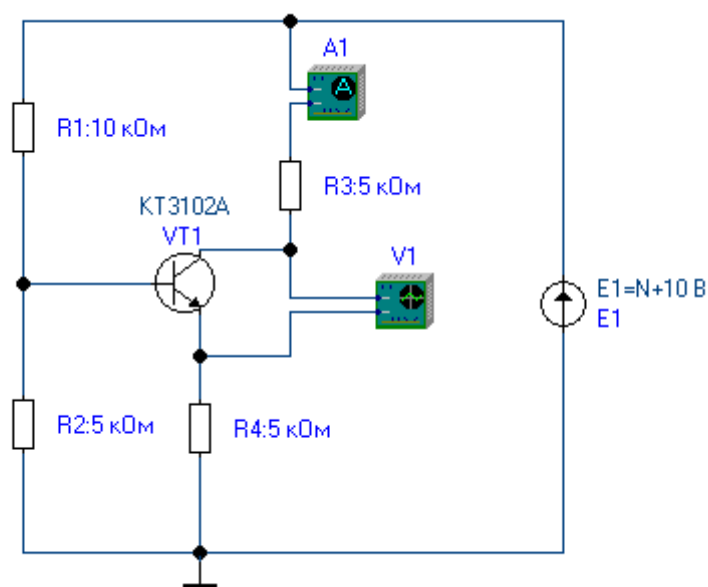


Рисунок 6.1 – Цепь смещения с эмиттерной стабилизацией рабочей точки транзистора

6.2 Исследовать усилительный каскад по схеме с общим эмиттером (рис. 6.2). Подав на вход синусоидальный сигнал частотой 1 кГц и амплитудой 1 мВ, оценить выходное напряжение и коэффициент усиления при двух значениях сопротивления нагрузки R_H (5 кОм, 50 кОм). Провести через рабочую точку нагрузочную прямую переменного тока для $R_H = 5$ кОм.

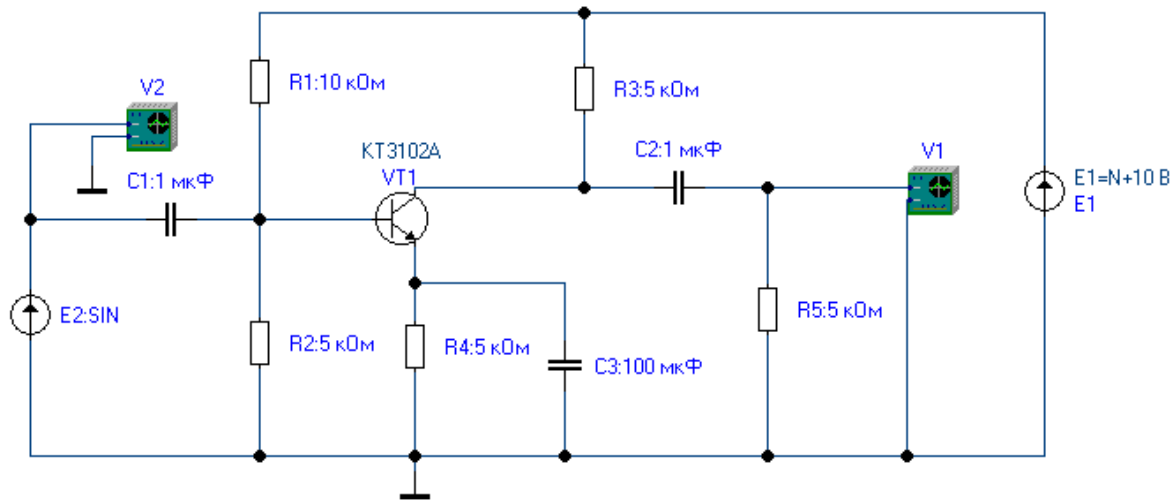


Рисунок 6.2 – Каскад с общим эмиттером

Воспользовавшись соотношением $K_0 = \frac{\beta R_{\sim}}{h_{11Э}}$, рассчитать по экспериментальным данным входное сопротивление транзистора $h_{11Э}$ ($\beta=185$).

6.3 Снять амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики каскада (схема экспериментальной установки приведена на рис. 6.3.).

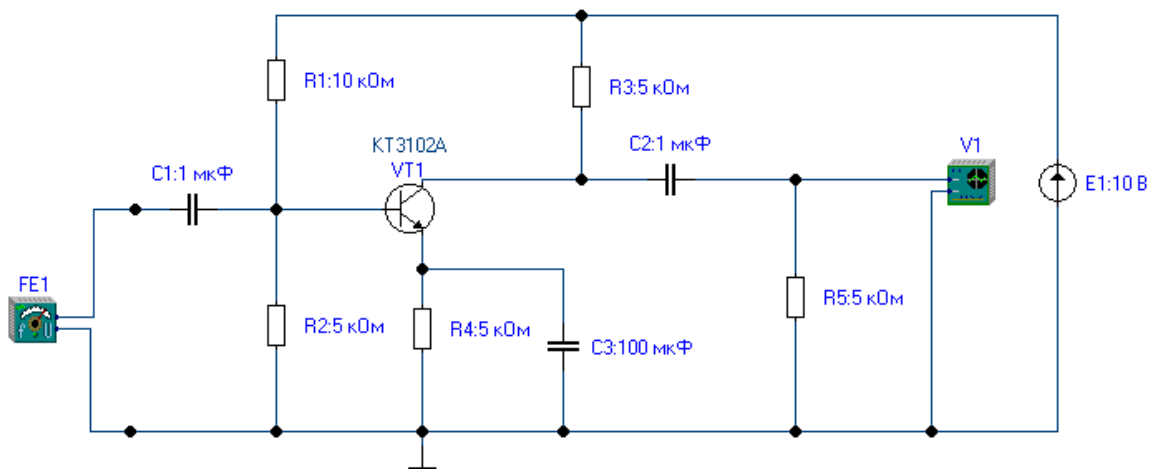


Рисунок 6.3 – Снятие АЧХ и ФЧХ каскада с ОЭ

При $R5=5$ кОм экспериментально оценить нижнюю частоту полосы пропускания на уровне $M_n = 3$ дБ. Для этого надо найти частоту входного сигнала, на которой амплитуда $U_{\text{вых}}$ падает на 30% относительно значения при $f = 1$ кГц. Как изменится нижняя частота при увеличении емкости разделительных конденсаторов до 10 мкФ? Какую функцию выполняет в схеме конденсатор емкостью 100 мкФ?

6.4 Исследовать эмиттерный повторитель (рис. 6.4). Изменился ли ток в рабочей точке транзистора по сравнению со схемой, приведенной на рис. 6.2?

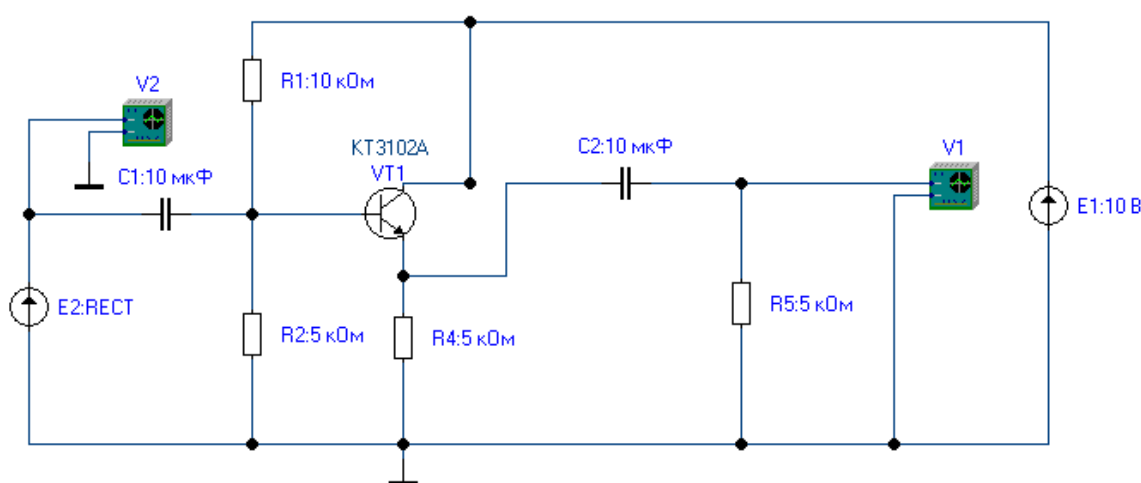


Рисунок 6.4 – Каскад с общим коллектором

Пронаблюдать искажения прямоугольных импульсов частотой 100 Гц и амплитудой 1 В при прохождении через повторитель.

Сравнить относительный спад вершины импульса с расчетным значением

$$\Delta = \frac{t_{\text{и}}}{C1(R1 \parallel R2)} + \frac{t_{\text{и}}}{C2 R5}.$$

Повторить эксперимент, увеличив значение емкости разделительных конденсаторов до 100 мкФ.

6.5 Собрать схему дифференциального усилителя (рис. 6.5). Какую функцию выполняет транзистор VT3? Рассчитать величину суммарного тока эмиттеров VT1 и VT2 и сравнить с экспериментальным значением, фиксируемым амперметром А. Напряжение на эмиттерном переходе VT3 полагать равным 750 мВ.

Проконтролировать потенциалы коллекторов $VT1$ и $VT2$. Наблюдаются ли изменения в режиме работы транзисторов при изменении входного синфазного сигнала $U_{сф}$ в диапазоне ± 5 В? Чему равен коэффициент передачи синфазного сигнала?

Подавая на вход сигнал с генератора ($U_{вх} = 1$ мВ) частотой 1 кГц, оценить коэффициент усиления каскада для дифференциального сигнала

$$K = U_{вых1}/U_{вх} = -U_{вых2}/U_{вх}.$$

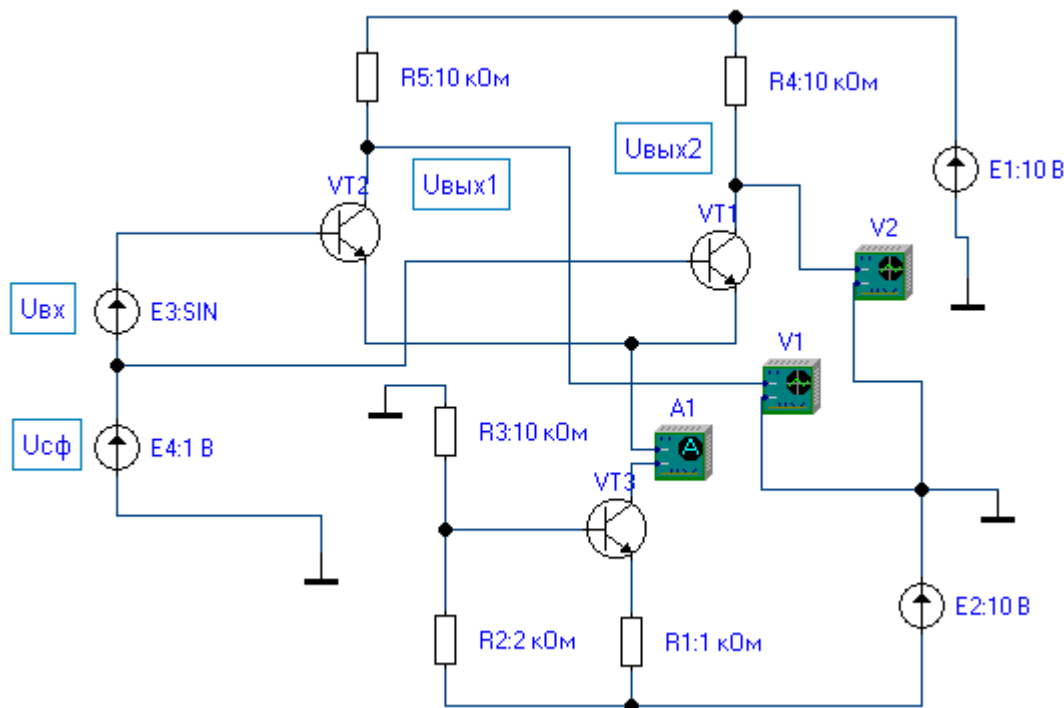


Рисунок 6.5 – Дифференциальный усилитель

6.6 Контрольные вопросы:

- 1) назовите способы повышения температурной стабильности режима работы биполярного транзистора;
- 2) дайте сравнительную характеристику трех способов включения транзистора;
- 3) назовите основные причины дрейфа нулевого уровня на выходе УПТ;
- 4) дайте определение коэффициенту подавления синфазного сигнала дифференциального усилителя;
- 5) назовите максимальные значения коэффициента полезного действия выходных каскадов усилителей в режиме класса A и класса B .

7 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

УСИЛИТЕЛИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИГНАЛОВ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Цель работы: исследовать аналоговые узлы, построенные с использованием операционных усилителей (УПТ, интегратор, ограничители, генератор напряжения прямоугольной и треугольной формы).

Программа работы

7.1 Собрать схему неинвертирующего УПТ на идеальном операционном усилителе (рис. 7.1). На вход каскада подать синусоидальный сигнал амплитудой 0,5 В и частотой 1кГц. Оценить коэффициент усиления по напряжению и сравнить с расчетным значением. Увеличить амплитуду $U_{\text{вх}}$ до 2 В. Объяснить временную диаграмму выходного напряжения. Снять логарифмическую амплитудно-частотную характеристику и оценить верхнюю рабочую частоту усилителя.

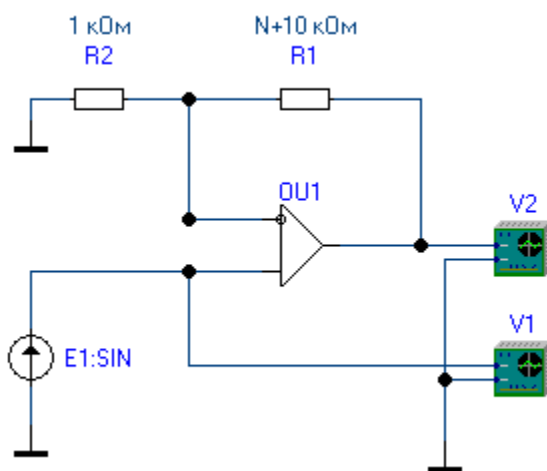


Рисунок 7.1 – Неинвертирующий УПТ

7.2 Собрать схему интегратора на идеальном ОУ (рис. 7.2). Проанализировать осциллограмму $U_{\text{вых}}$ при подаче на вход симметричных разнополярных прямоугольных импульсов с амплитудой 1 В и частотой 500 Гц. Исследовать переходный процесс при подаче на вход интегратора однополярных импульсных сигналов.

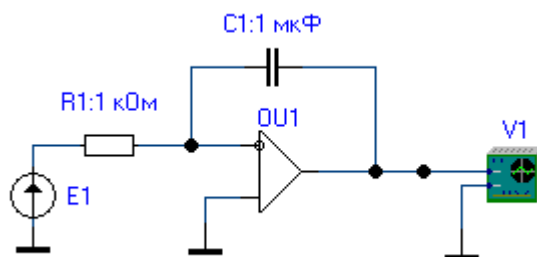


Рисунок 7.2 – Интегратор

7.3 Проанализировать диаграммы выходных напряжений при подаче синусоидальных сигналов амплитудой 5 В на входы каскадов, изображенных на рис. 7.3 и рис. 7.4. Повторить эксперимент, изменив полярность включения диода.

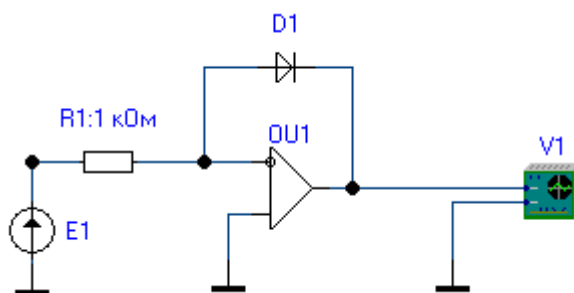


Рисунок 7.3

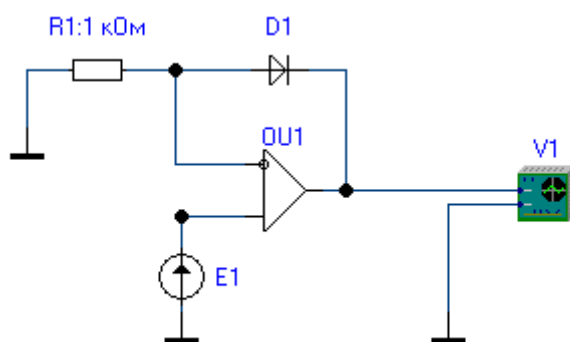


Рисунок 7.4

7.4 Собрать и испытать генератор напряжений треугольной и прямоугольной формы (рис. 7.5).

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 $U_{\text{см}} = E1=0$?

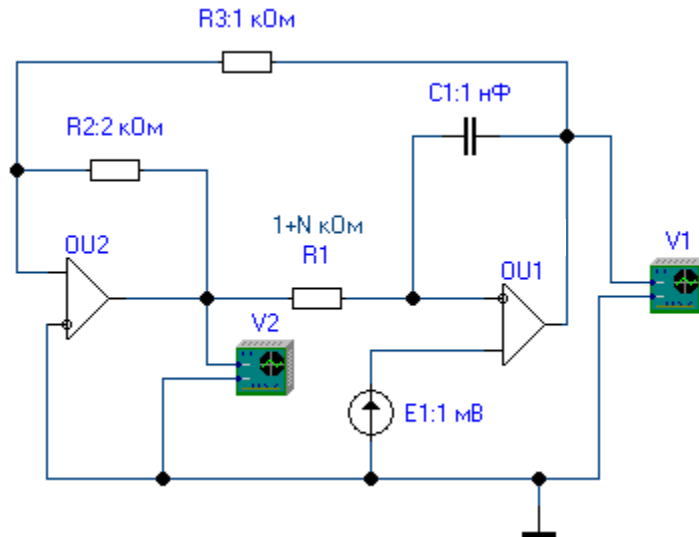


Рисунок 7.5 – Генератор напряжений треугольной и прямоугольной формы

7.5 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 $M_v=3$ дБ усилителя постоянного тока, собранного по схеме рис. 7.1;
- 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?

8 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ И ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: исследование характеристик избирательного усилителя с параллельным и последовательным колебательным контуром и построение LC - и RC -генераторов гармонических колебаний.

Программа работы

8.1 Собрать избирательный усилитель с параллельным колебательным контуром (рис. 8.1, где N – номер варианта от 0 до 9). Снять ЛАЧХ и ЛФЧХ, задавая диапазон изменения частоты от 100 кГц до 10 МГц. Оценить резонансную частоту, коэффициент усиления на частоте резонанса и добротность каскада. Добротность определяется отношением резонансной частоты к полосе пропускания на уровне 3 дБ.

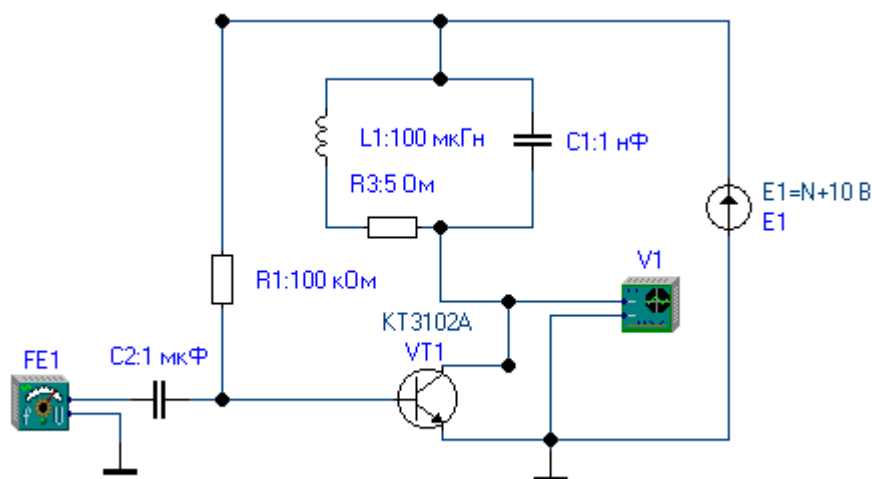


Рисунок 8.1 – Резонансный усилитель

8.2 Исследовать частотную характеристику избирательного усилителя с последовательным колебательным контуром (рис. 8.2). Диапазон изменения частоты установить от 1 до 10^9 Гц. Оценить избирательность усилителя по отношению ко второй гармонике резонансной частоты.

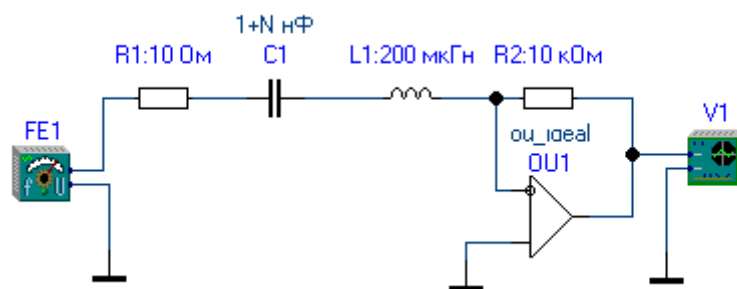
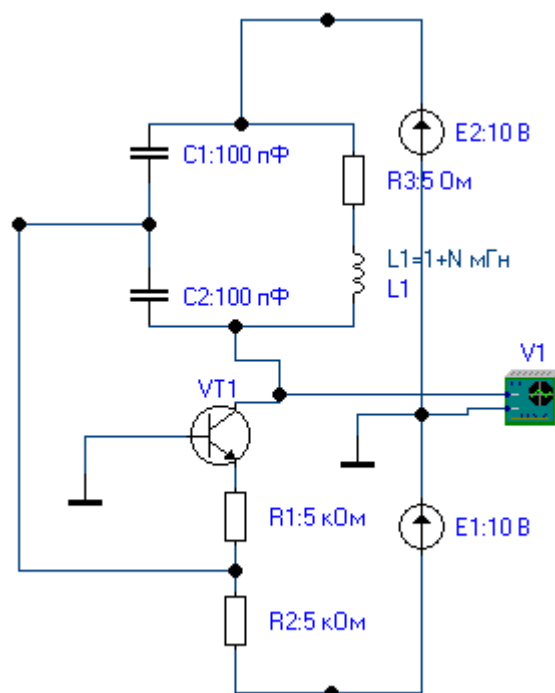


Рисунок 8.2 – Избирательный усилитель

8.3 Собрать трехточечный LC -генератор по схеме Колпитца (рис. 8.3). Пронаблюдать работу схемы. Оценить амплитуду и частоту генерируемых колебаний. Объяснить явления, которые происходят при замене резистора $R1$ номиналом 5 кОм на резисторы номиналом 4 кОм и 6 кОм?

Рисунок 8.3 – Трехточечный LC -генератор

8.4 Собрать пассивную цепь (рис. 8.4) и снять ее ЛАЧХ и ЛФЧХ (логарифмические амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики) с помощью плоттера. 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.

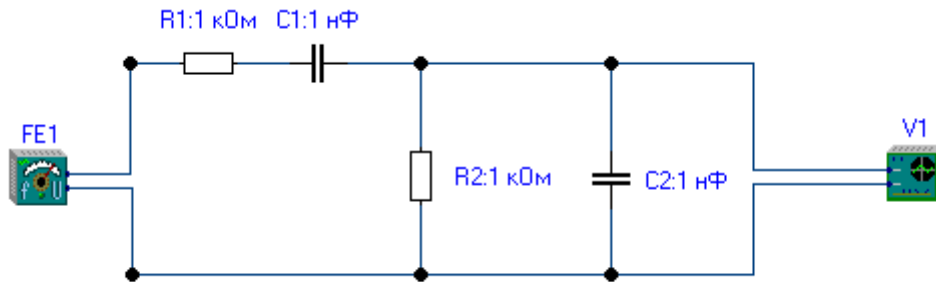


Рисунок 8.4

8.5 Собрать и испытать генератор гармонических колебаний с мостом Вина (рис. 8.5). Источник 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?

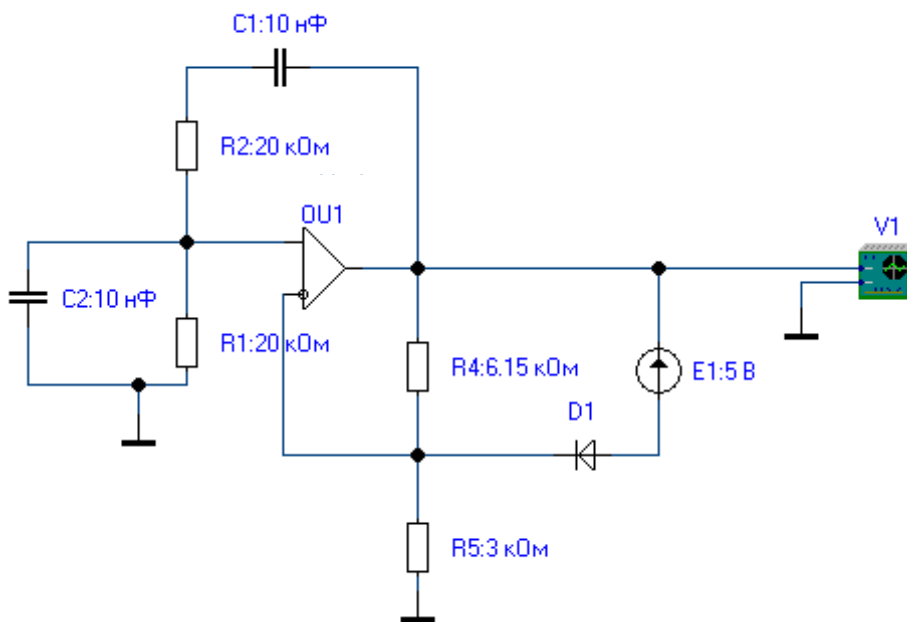


Рисунок 8.5 – LC-генератор с мостом Вина

8.6 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?

9 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

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

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

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 $K(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{p\tau}}$. Трем децибелам соответствует коэффициент ча-

стотных искажений $M = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2} = \sqrt{2}$, откуда следует, что постоянная

времени цепи $\tau = \frac{1}{2\pi f} = \frac{1000}{6,28 \cdot 10} = 15,92 \text{ мс}$. 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:

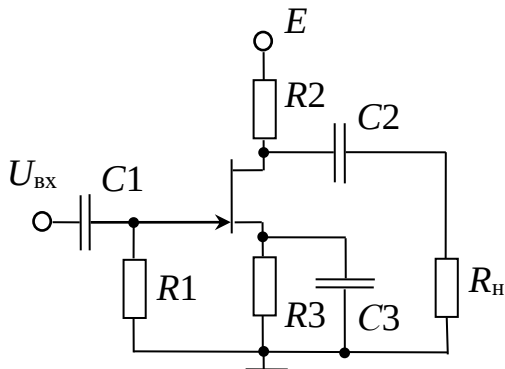
$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + U_{4m}^2}}{U_{1m}} = \frac{\sqrt{2^2 + 3^2 + 1^2}}{10} = 0,374 \text{ или } 37,4 \, \%.$$

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:

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

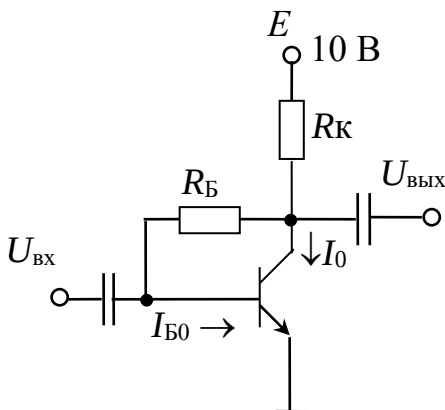
Задача 5. Оценить коэффициент усиления каскада в рабочем диапазоне частот, если $\mu = 50$, $R_i = 20$ кОм, $R_2 = R_{\text{н}} = 5$ кОм.



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:

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

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

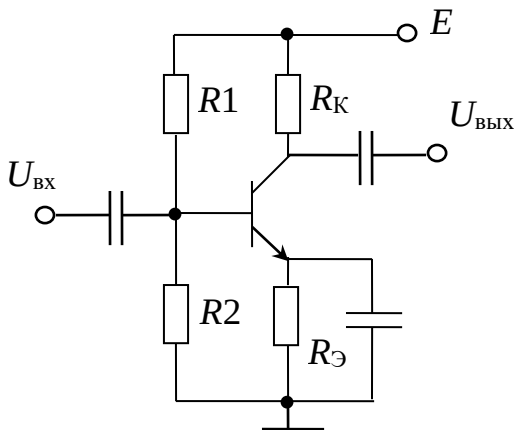
$$I_0 = \beta I_{\text{Б0}}.$$

Отсюда определяем

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

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

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:

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

Рассчитаем ток эмиттера:

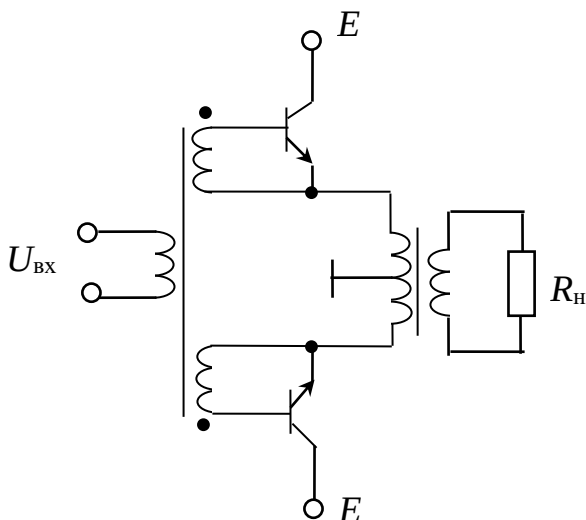
$$I_Э = \frac{U_Б - U_{ЭБ}}{R_Э} = \frac{5 - 0,7}{5} = 0,86 \text{ мА.}$$

Координаты рабочей точки транзистора:

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

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

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.

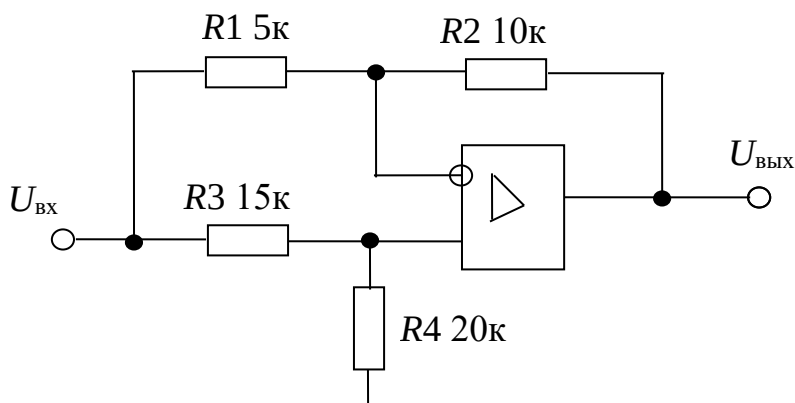
Задача 9. Какой глубины ООС нужно ввести в усилитель, чтобы уменьшить погрешность коэффициента усиления до 1%, если температурная нестабильность $\delta K_{\text{тем}}=50\%$, технологический разброс $\delta K_{\text{тех}}=50\%$, а погрешность коэффициента передачи цепи обратной связи $\delta\gamma=0,5\%$.

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

Требуемая глубина обратной связи

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

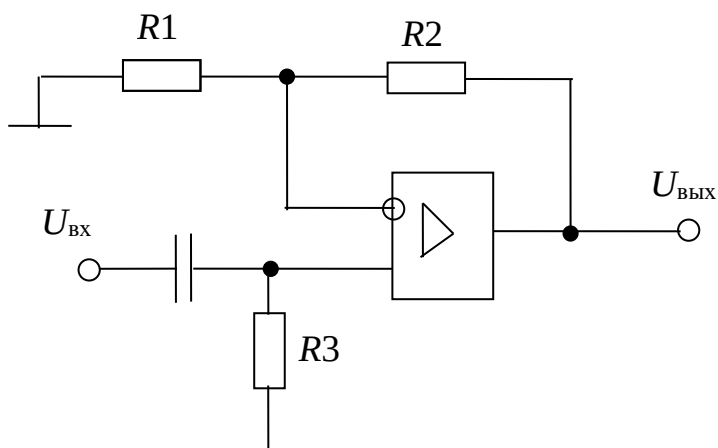
Задача 10. Оценить $U_{\text{ВЫХ}}$ при $U_{\text{ВХ}}=1$ В.



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 напряжения 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

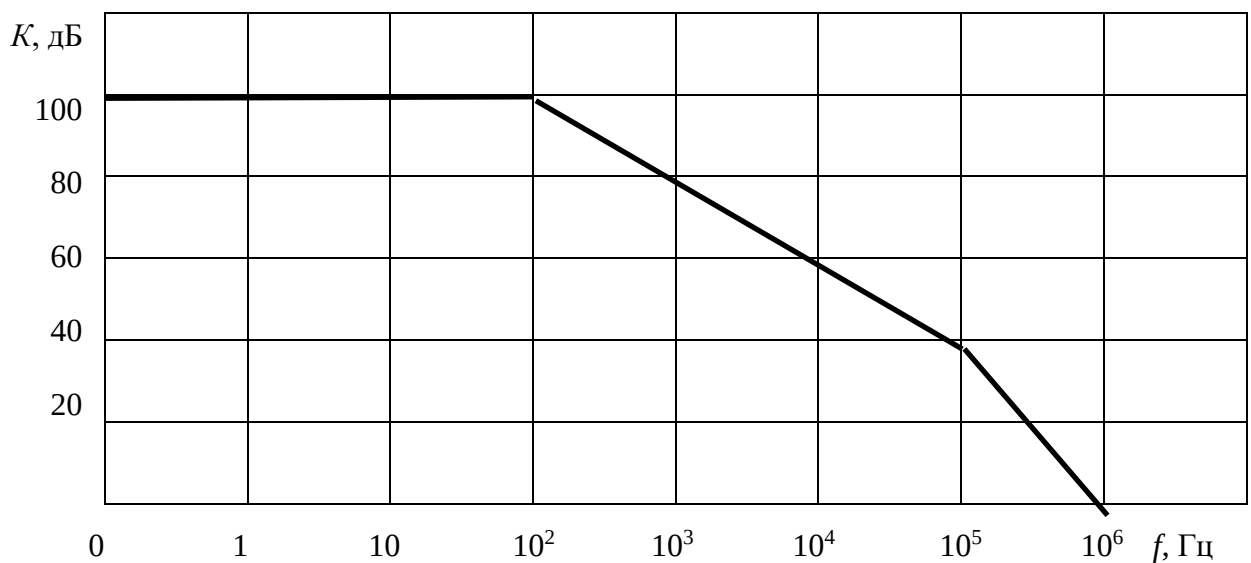
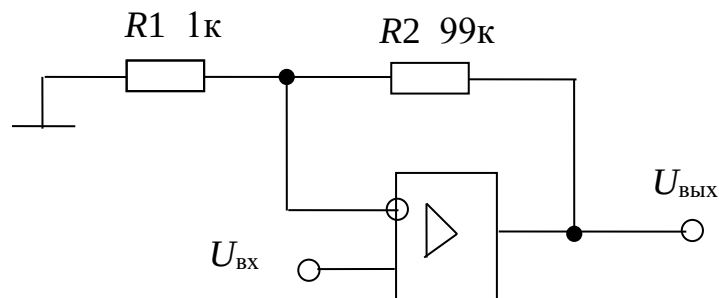
$$U_{\text{ВЫХ сдв}} = U_{\text{см}} + |I_+ R3 - I_- R2|.$$

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 $K_{OC} = 1 + R_2/R_1 = 100$ 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° (90° за счет постоянной времени τ_1 , дающей наклон -20 дБ/дек начиная с частоты 10^2 Гц, и 45° за счет постоянной времени τ_2 , увеличивающей наклон ЛАЧХ до -40 дБ/дек, начиная с частоты $f = 10^5$ Гц). Следовательно, запас устойчивости по фазе равен 45° .

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

$$R = \rho Q = 15920 \text{ Ом}.$$

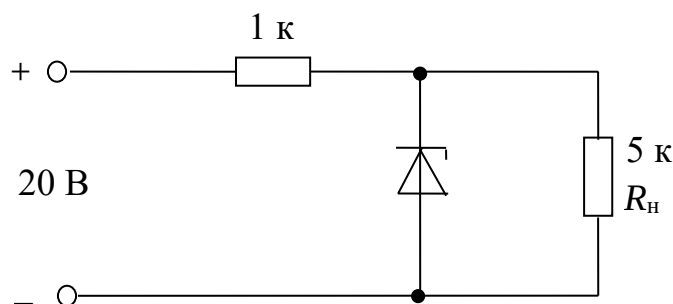
Относительная расстройка частоты

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

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.

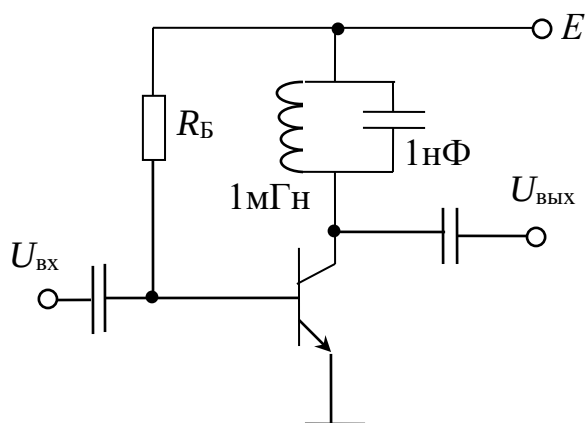
Изменение тока через стабилитрон составит

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

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.**

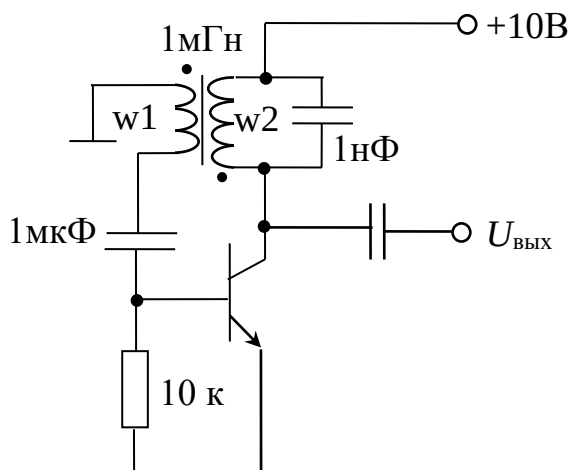
Определим резонансную частоту

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{6,28\sqrt{10^{-3} \cdot 10^{-9}}} = \frac{10^6}{6,28} = 159,2 \text{ кГц.}$$

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 $\beta = 100$, $n = w_2/w_1 = 10$.

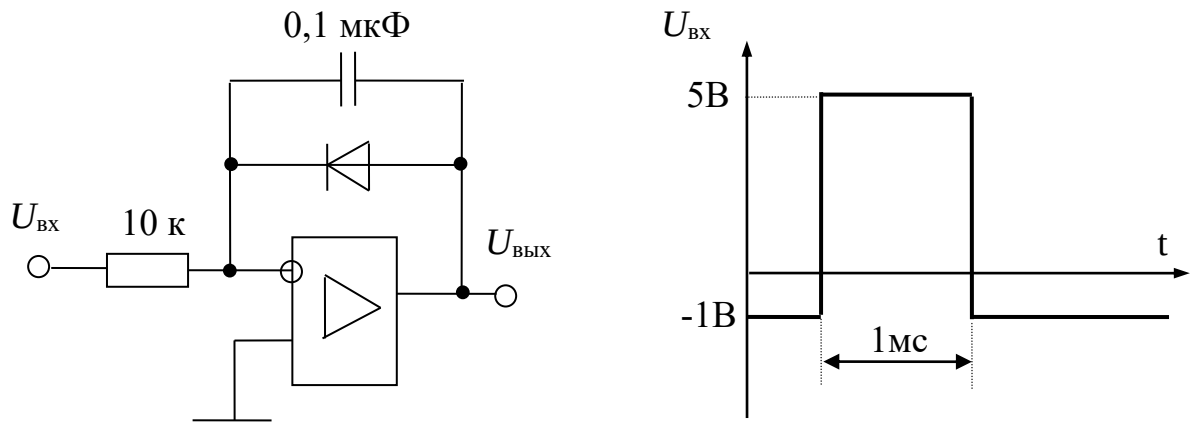


Решение. Для возникновения автоколебаний необходимо выполнение условий баланса фаз и амплитуд.

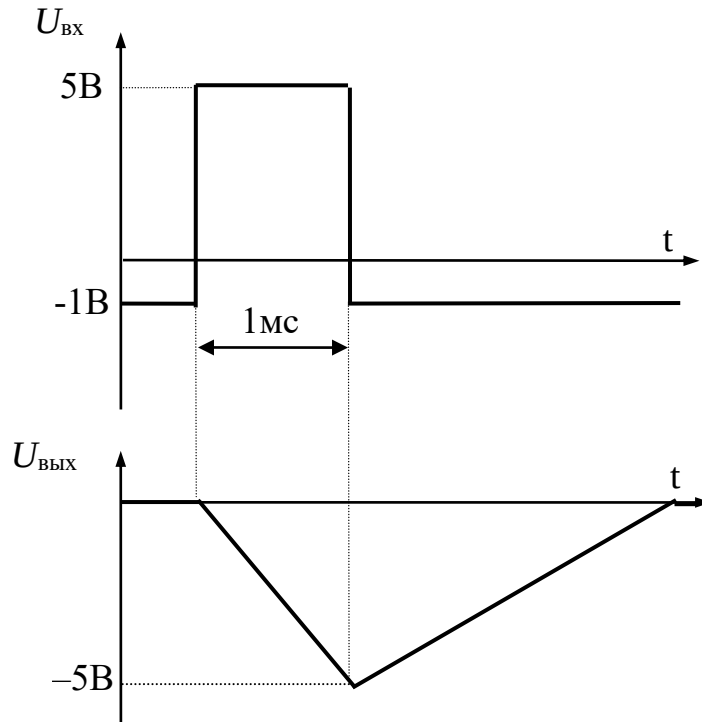
Условие баланса фаз выполняется (инвертирующий усилитель и инвертирующий трансформатор дают в петле обратной связи фазовый сдвиг, кратный 2π , обеспечивающий положительную обратную связь).

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.

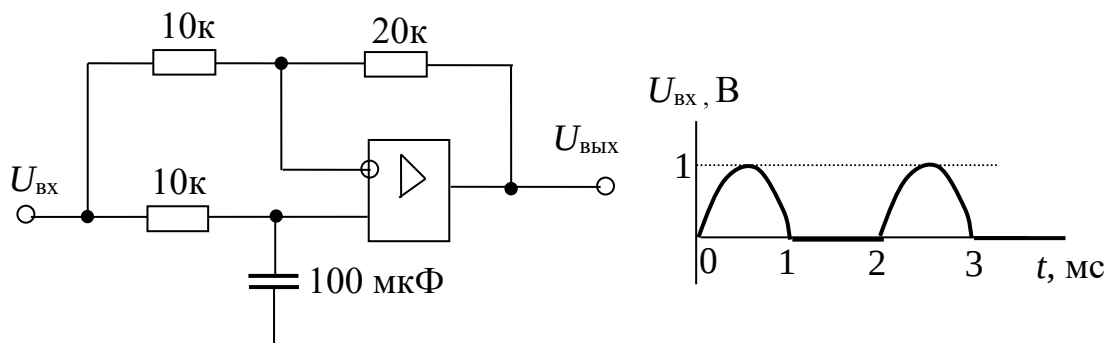
Задача 17. Построить временную диаграмму выходного напряжения.



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 В ($\tau = RC = 10 \text{ кОм} \cdot 0,1 \text{ мкФ} = 1 \text{ мс}$). Затем оно изменяется со скоростью 1 В/мс и за 5 мс достигает исходного значения, при котором открывается диод.



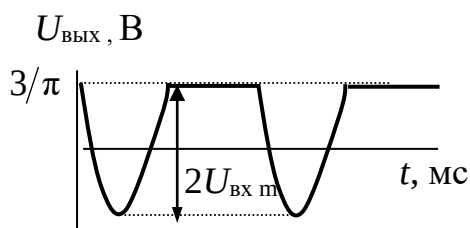
Задача 18. Построить временную диаграмму выходного напряжения.



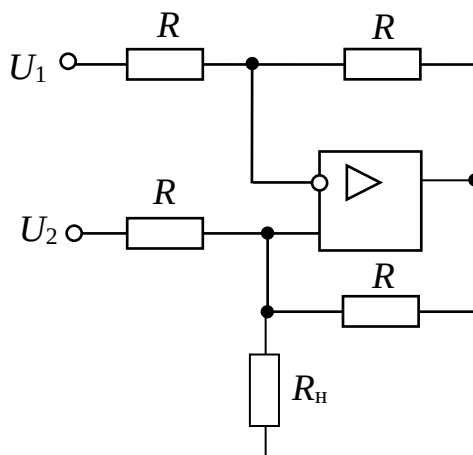
Решение. Так как постоянная времени RC -цепи

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

значительно больше периода входного сигнала $T = 2\text{ мс}$, на конденсаторе фильтра установится напряжение, равное постоянной составляющей $U_{ВХ}$, т.е. его среднему значению $U_{вхм}/\pi = 1/\pi\text{ В}$. 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 $U_1 = 5\text{ В}$, $U_2 = 7\text{ В}$, $R = 20\text{ кОм}$, $R_H = 15\text{ кОм}$.

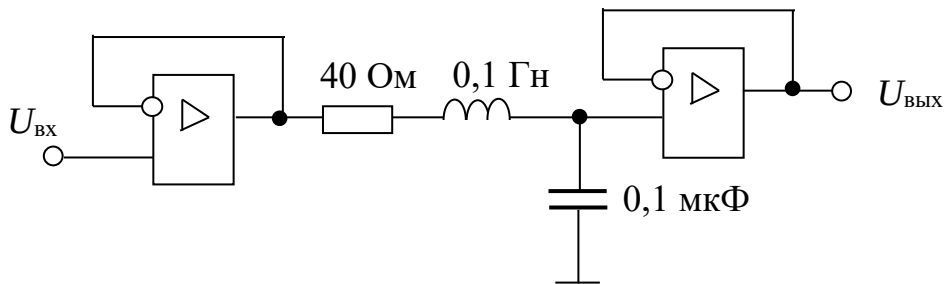


Решение. Схема является стабилизатором тока. Ток в нагрузке не зависит от величины сопротивления R_H и определяется соотношением

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

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.

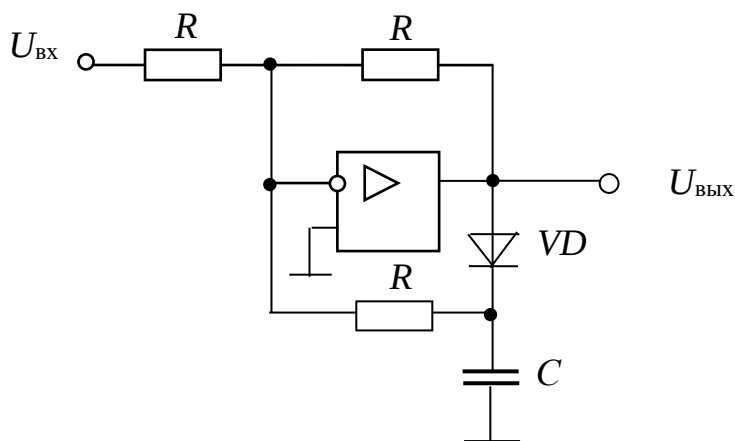


Решение. Для источника входного сигнала последовательный колебательный контур на резонансной частоте представляет собой чисто активное сопротивление $R = 40 \text{ Ом}$. Поэтому ток в контуре равен $U_{\text{ВХ}}/R$. Сопротивление конденсатора на резонансной частоте равно волновому сопротивлению контура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

Следовательно, коэффициент передачи цепи

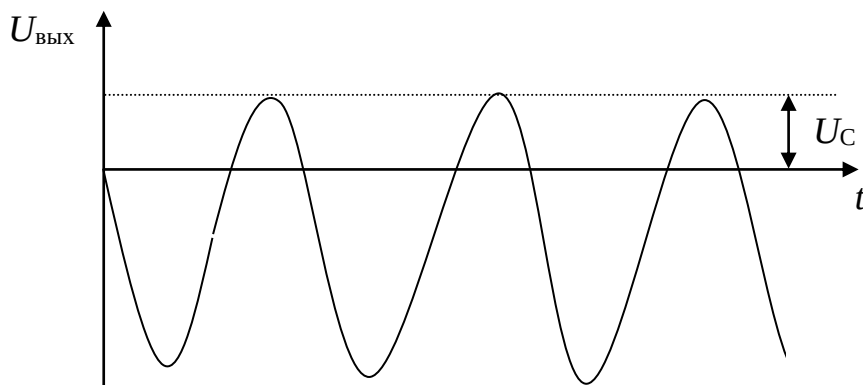
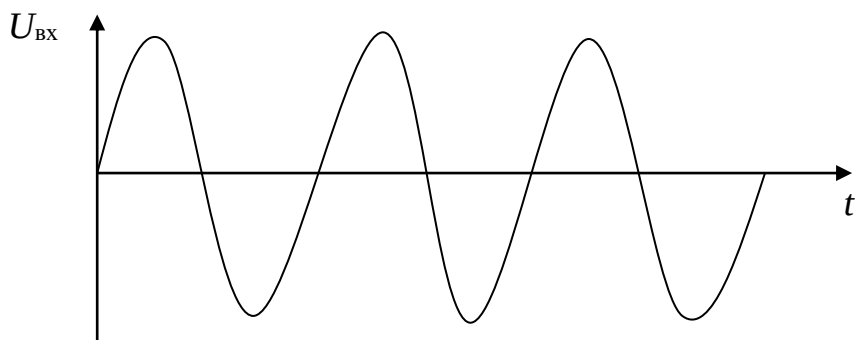
$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} = \frac{1000}{40} = 25.$$

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.

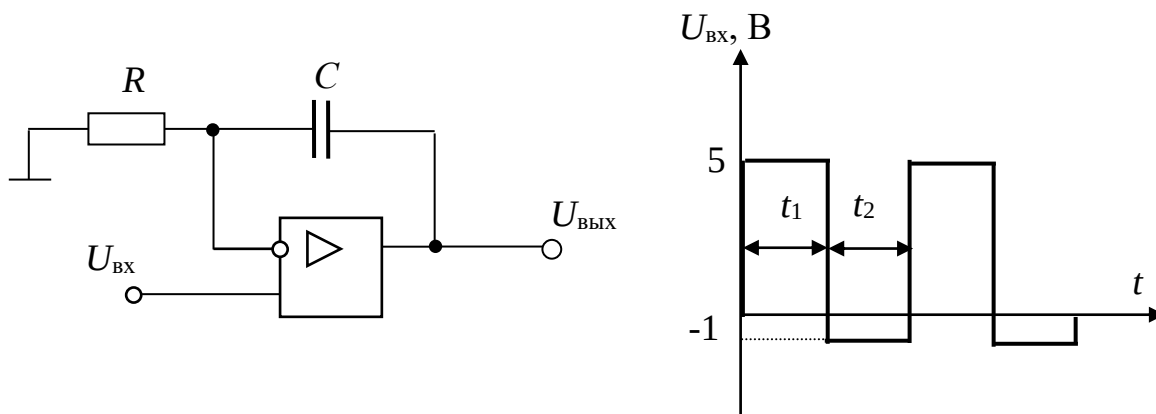


Решение. Конденсатор C и диод VD образуют схему пикового детектора. Конденсатор стремится зарядиться до максимального значения выходного напряжения. Если бы напряжение U_C не подавалось на инвертирующий вход ОУ, выходное напряжение было бы равно минус $U_{ВХ}(t)$, а конденсатор зарядился до плюс 5 В. 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 $U_{ВЫХ}(t) = -U_{ВХ}(t) - 2,5 \text{ В}$.



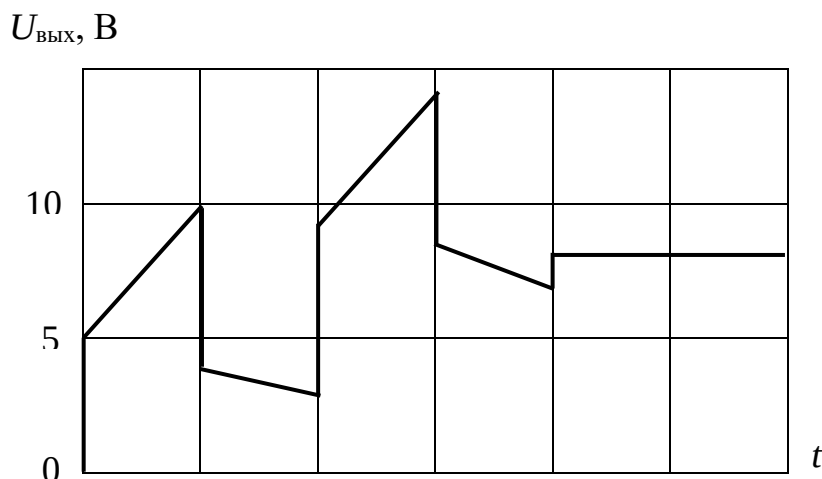
Задача 22. Построить $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ после подачи на вход двух импульсов $U_{\text{ВХ}}(t)$. Выполняется условие $\tau = RC = t_1 = t_2$.



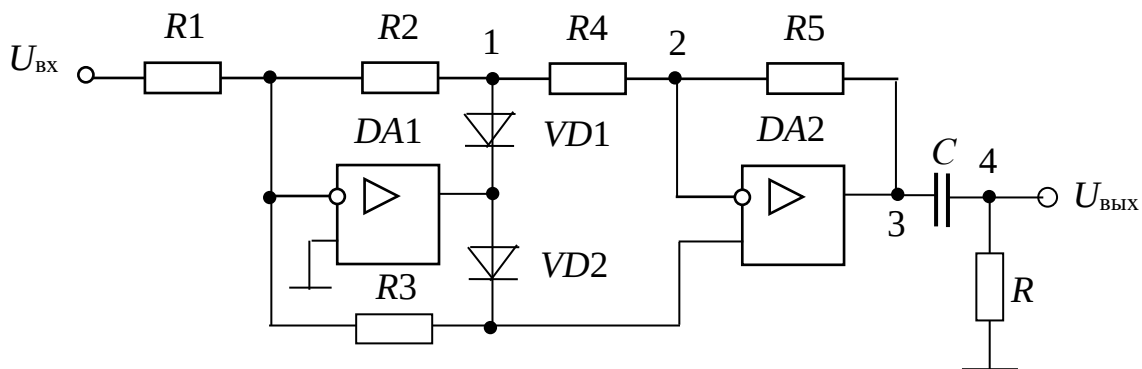
Решение. Передаточная функция цепи

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

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 $U_{\text{вхм}} = 6 \text{ В}$ ($\tau = RC \gg T$, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5$).



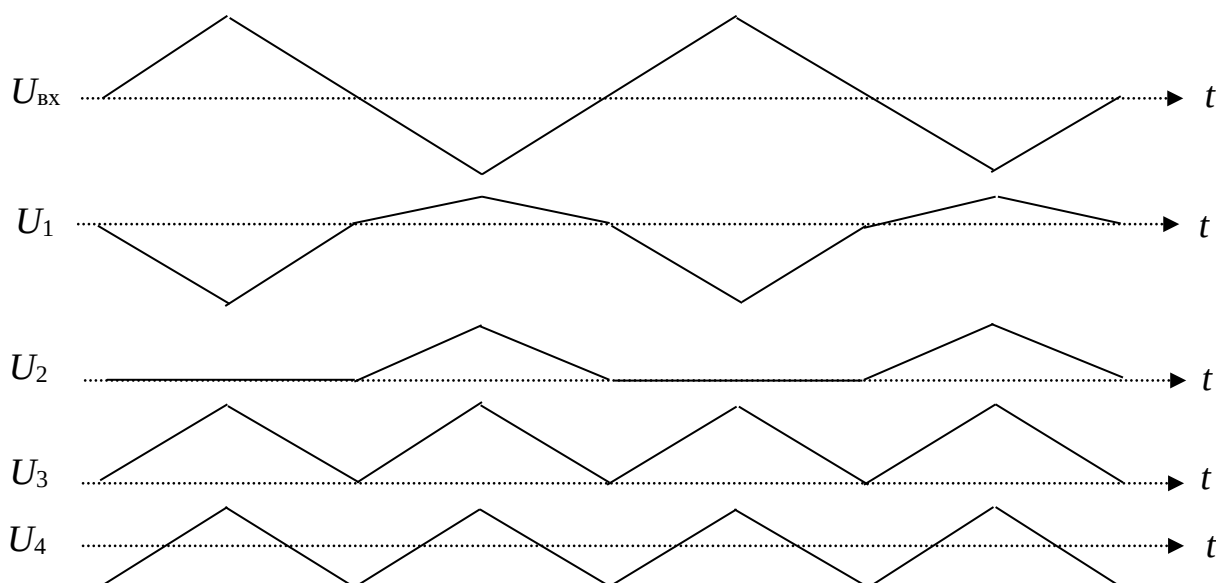
Решение.

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.



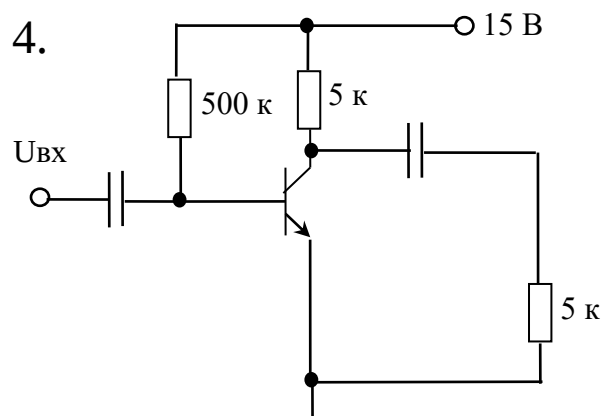
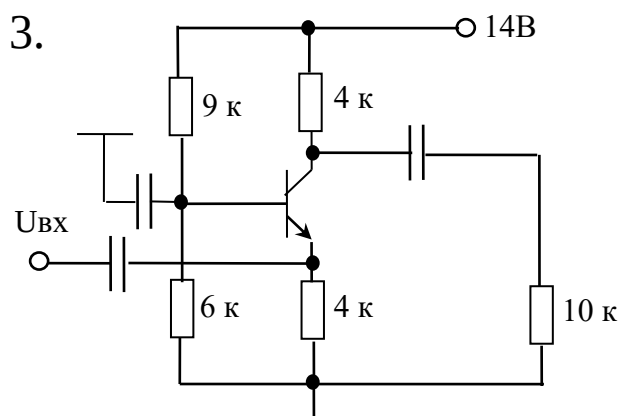
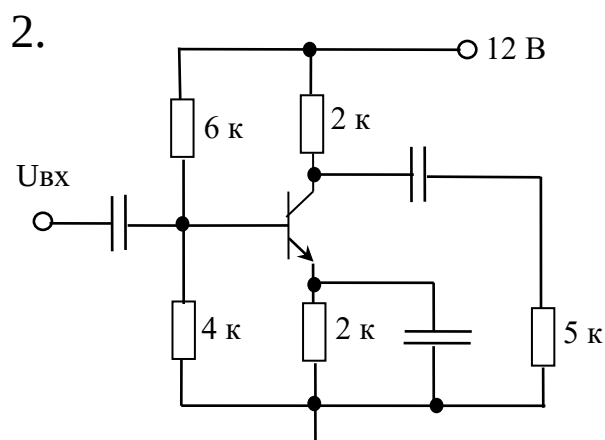
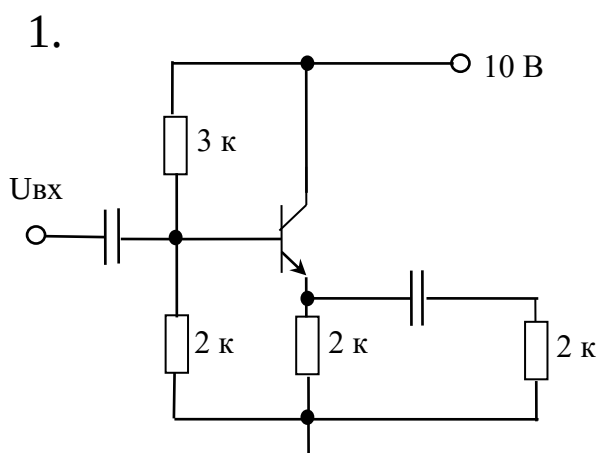
10 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №1

Контрольная работа №1 предполагает выполнение двух задач по анализу усилительных каскадов на биполярном транзисторе и операционном усилителе. Код варианта определяет схемы, анализируемые при выполнении задачи 1 и задачи 2 соответственно (выбираются из приведенных ниже заданий).

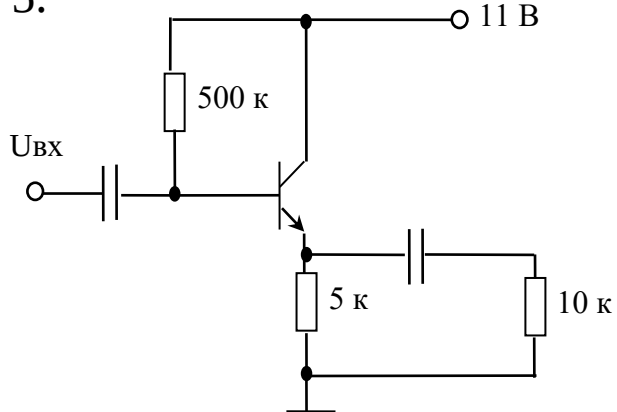
Задача 1

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.

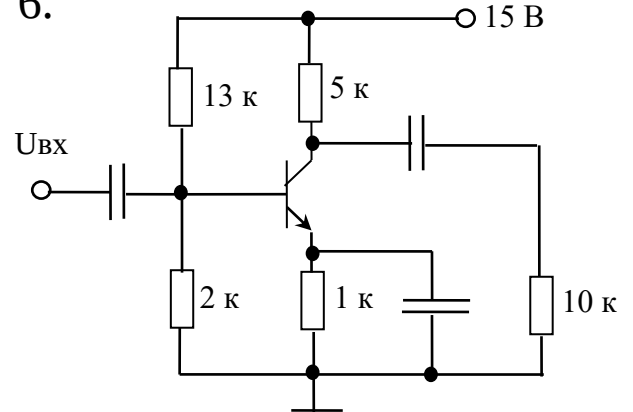
Варианты заданий для задачи 1



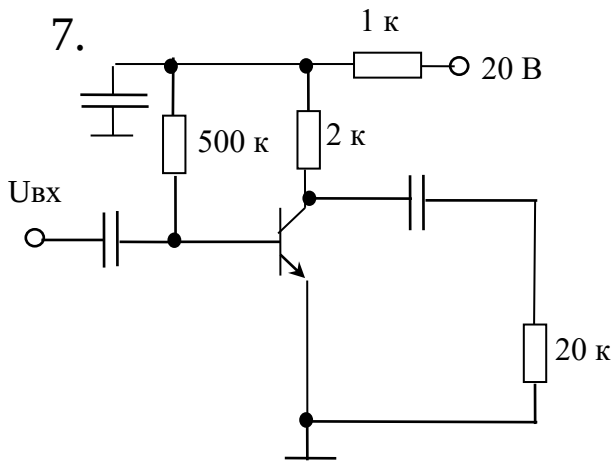
5.



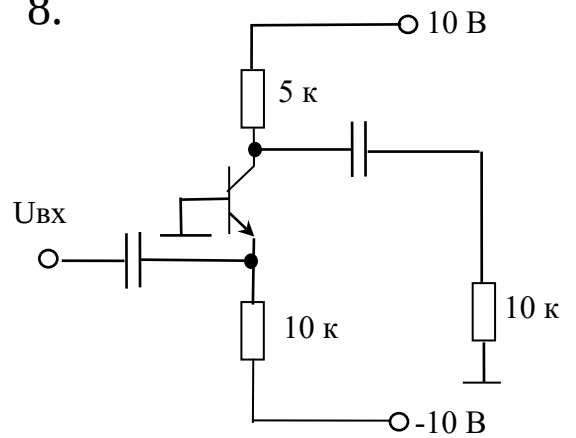
6.



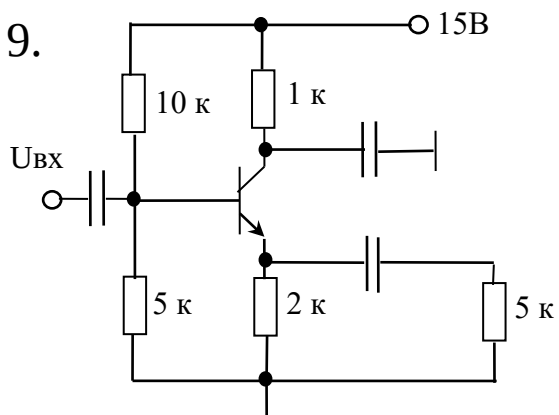
7.



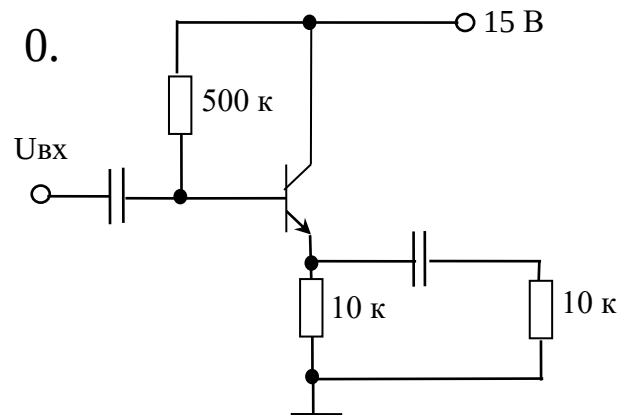
8.



9.



0.

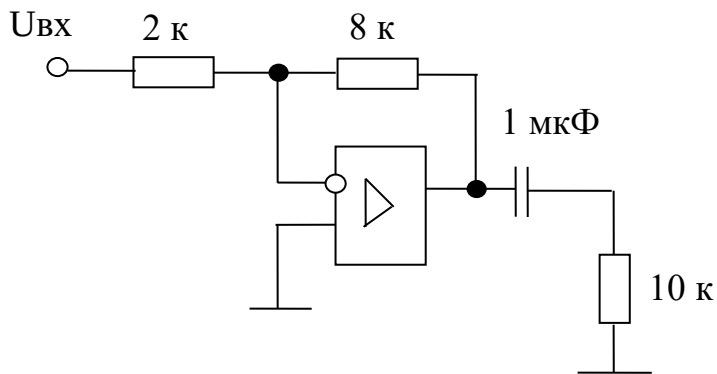


Задача 2

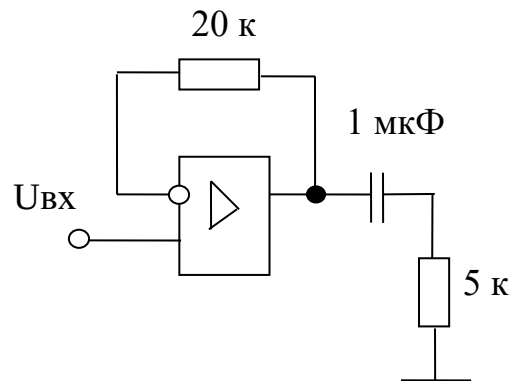
1. Определить коэффициент усиления по напряжению на средних частотах.
2. Определить входное и выходное сопротивления.
3. Оценить полосу пропускания на уровне 3 дБ.
4. Оценить возможную ошибку смещения нуля и дрейф нулевого уровня на выходе операционного усилителя в диапазоне температур (20...50)°C.
5.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

Варианты заданий для задачи 2

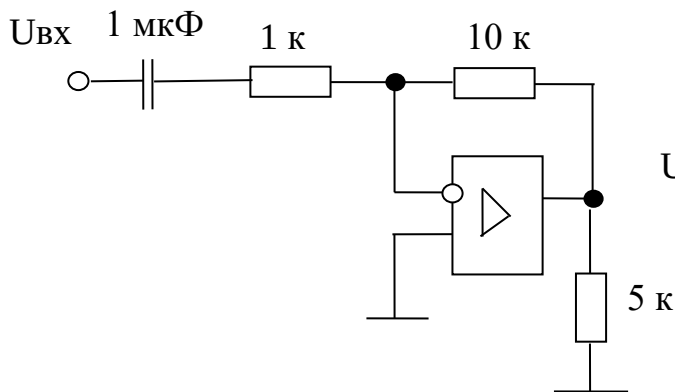
1.



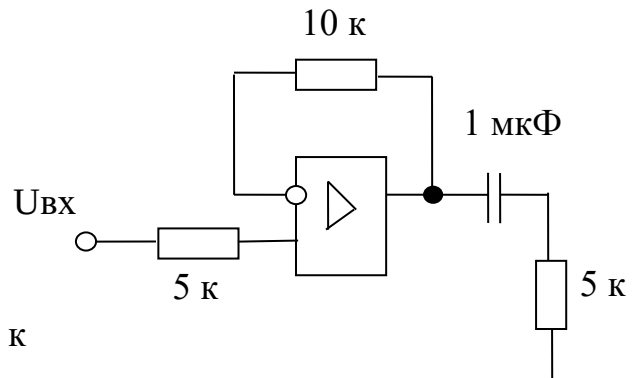
2.



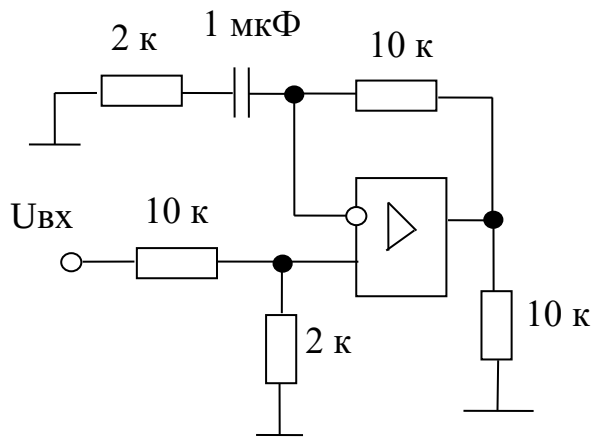
3.



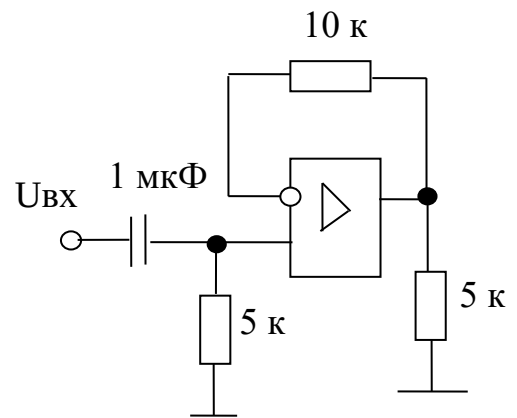
4.



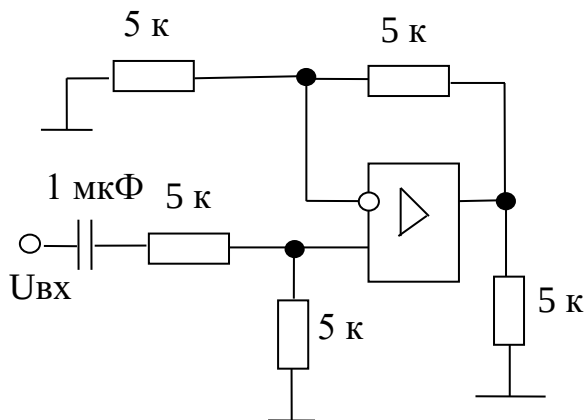
5.



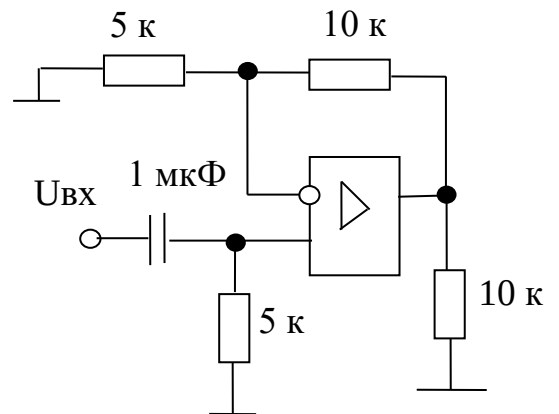
6.



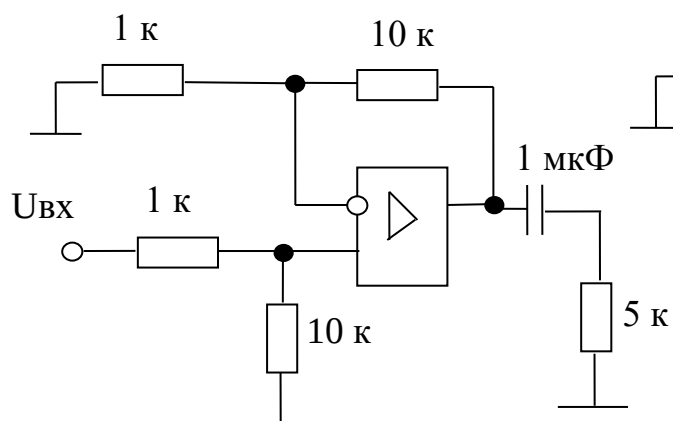
7.



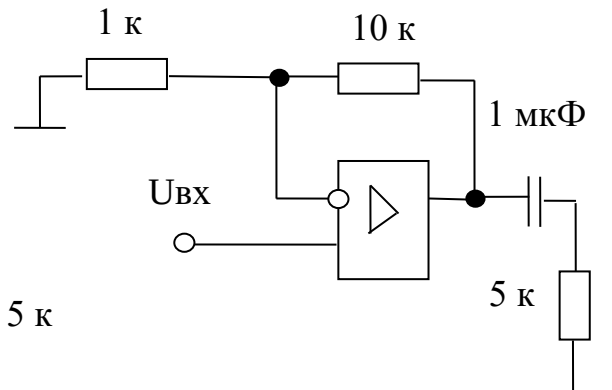
8.



9.



0.



11 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №1

Задача 1. Схема анализируемого усилительного каскада приведена на рис. 11.1. Транзистор включен по схеме с общим эмиттером. Введем обозначения и поясним назначение элементов схемы:

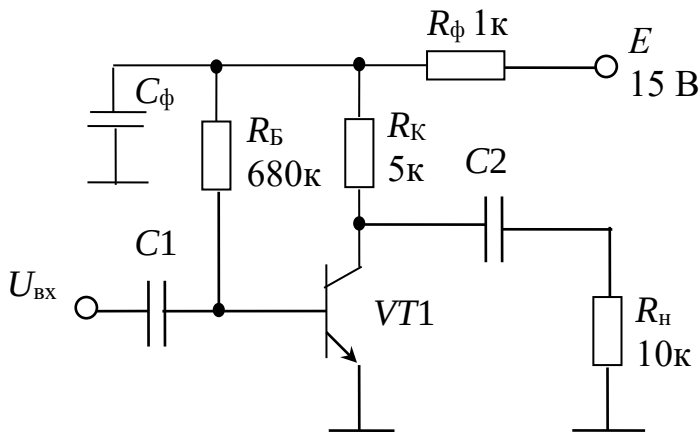


Рисунок 11.1

$R_\phi C_\phi$ – фильтр в цепи питания, за счет R_ϕ 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;

C_1, C_2 – разделительные конденсаторы.

1. Определим координаты рабочей точки транзистора $U_0 = U_{KЭ}$ 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

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

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

Сопротивление выходной цепи переменному току

$$R_{\Sigma} = R_K \parallel R_H = \frac{5 \cdot 10}{5 + 10} = 3,33 \text{ кОм.}$$

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

2. Температурная нестабильность коллекторного тока

$$\Delta I_K = S_T \left(\Delta I_T - \frac{\alpha \Delta U_T}{R_B + R_{\Phi}} \right) = 87 \left(27,5 + \frac{0,99 \cdot 60}{681} \right) = 2400 \text{ мкА,}$$

где $S_T = \frac{1}{1 - \frac{\alpha R_B}{R_{\Phi} + R_B}} = \frac{1}{1 - \frac{0,99 \cdot 680}{681}} = 87$ – коэффициент температурной не-

стабильности каскада;

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

$\Delta U_T = -2 \cdot 30 = -60 \text{ мВ}$ – 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_{Φ} , а транзистор заменяем его эквивалентной схемой (рис. 11.2).

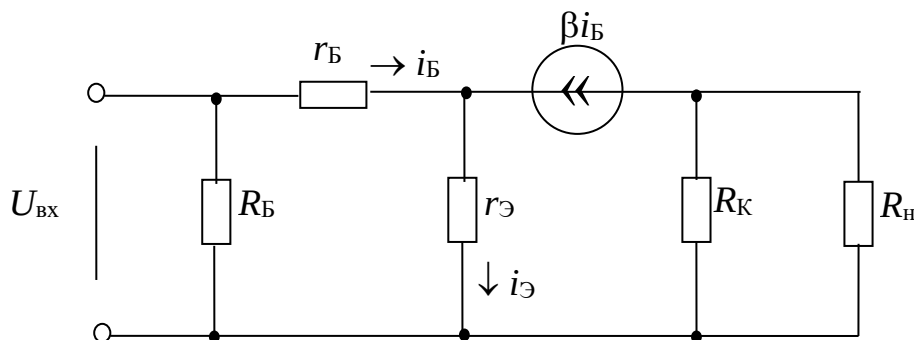


Рисунок 11.2

Коэффициент усиления по напряжению

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

где $r_{\text{Э}} = 26/I_0 = 14$ Ом.

Входное сопротивление усилителя

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

Выходное сопротивление каскада

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

Задача 2. Схема анализируемого усилителя приведена на рис. 11.3. Введены обозначения элементов. Влияние конденсатора $C1$ проявляется в том, что схема передает на выход с разными коэффициентами усиления постоянную и переменную составляющие $U_{\text{вх}}$.

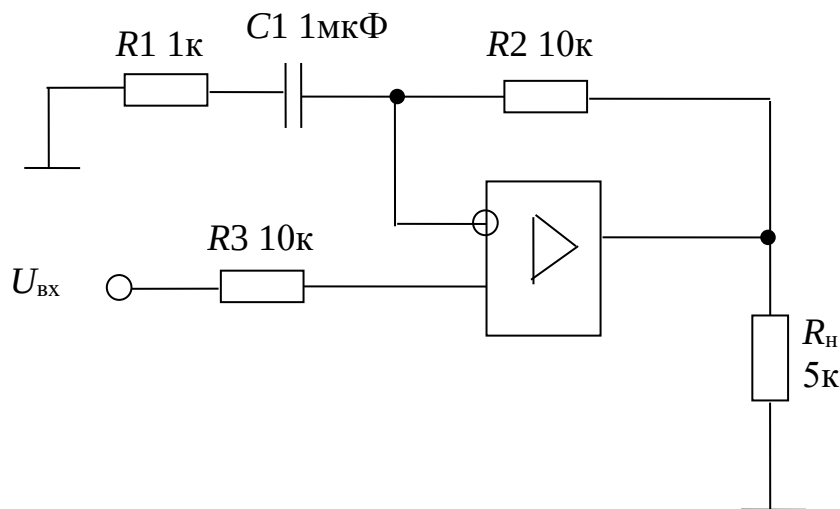


Рисунок 11.3

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

$$K_{\text{ОС}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 11 \text{ раз.}$$

2. Входное сопротивление каскада

$$R_{\text{вх}} = R_3 + r_{\text{сф}} \parallel [r_{\text{вх}}(1 + K_{\gamma})] \approx r_{\text{сф}} = 100 \text{ МОм.}$$

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

3. Выходное сопротивление каскада

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

4. Нижняя рабочая частота при $M_n = 3$ дБ

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} = 159,2 \text{ Гц.}$$

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

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

где $f_1 = 1 \text{ МГц}$ – 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

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

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].

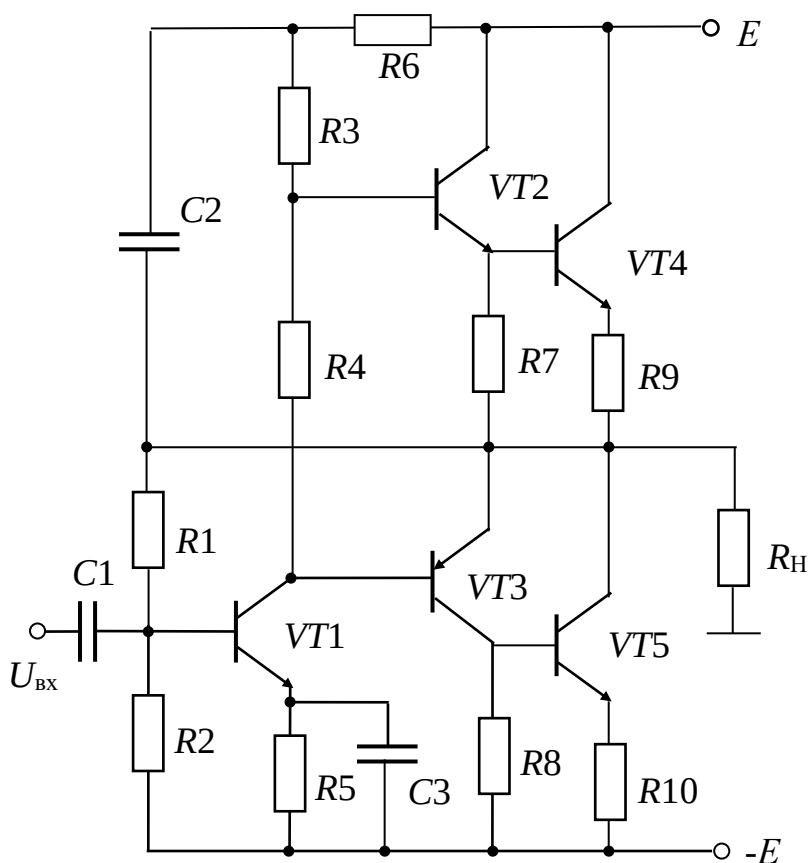


Рисунок 12.1 – Выходной каскад УНЧ

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 окончных транзисторов $VT4$ и $VT5$, берут порядка (5...15)% от R_H (чтобы они не сильно

уменьшали КПД). Выбираем $R_9 = R_{10} = 1 \text{ Ом}$ из ряда E12 с номинальной мощностью рассеяния 1 Вт.

Тогда полное сопротивление нагрузки одного плеча составит

$$R'_H = R_H + R_9 = 8 + 1 = 9 \text{ Ом.}$$

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

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

где $U_{\text{ост}} = U_{KЭ2 \min} + U_{ЭБ4 \text{ нас}} \approx 0,5 + 0,8 = 1,3 \text{ В.}$

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 $\psi = \frac{E - U_{\text{ост}}}{E} = \frac{16 - 1,3}{16} = 0,92$ – 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 ($I_{K \max} = 3 \text{ А}$, $U_{KЭ \max} = 60 \text{ В}$, $P_{K \max}$ 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

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

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 $R7$

$$U_{R7} = U_{БЭ4} + I_{K4} R9 \approx 650 + 79 \cdot 1 = 729 \text{ мВ,}$$

где $U_{БЭ4}$ – 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.

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

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

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

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

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

Следовательно, $R3 + R6 = 14,7/3 = 4,9 \text{ кОм.}$

Сопротивление резистора R6 выбирается из условий [7]:

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

Выберем $R3 = 3,3 \text{ кОм}$, $R6 = 1,5 \text{ кОм}$ из ряда E12.

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:

$$I_{B1} = I_{K1}/\beta_1 \approx 0,03 \text{ мА.}$$

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 ($R_{\text{с}}=0$) 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 $K_{e \text{ ос}} = \frac{U_{\text{н}}}{E_{\text{с}}} = \frac{R1}{R_{\text{с}}}.$

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 ± 20 дБ элементы схемы можно определить из следующих соотношений (здесь f_n и f_b – нижняя и верхняя частоты регулирования) [19]:

$$\begin{aligned} R4 &= R6 = 0,11 \cdot R5; \\ C2 = C3 &= \frac{159 \cdot 10^3}{f_n (\Gamma \text{ц}) \cdot R5 (\text{кОм})} \text{ (нФ)}; \\ R7 &= R4; \\ R8 = R9 &= 0,33 \cdot R4; \\ C4 &= \frac{4,34 \cdot 10^6}{f_b (\Gamma \text{ц}) \cdot R5 (\text{кОм})} \text{ (нФ)}; \\ R10 &\geq R5. \end{aligned}$$

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 усилителя 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.

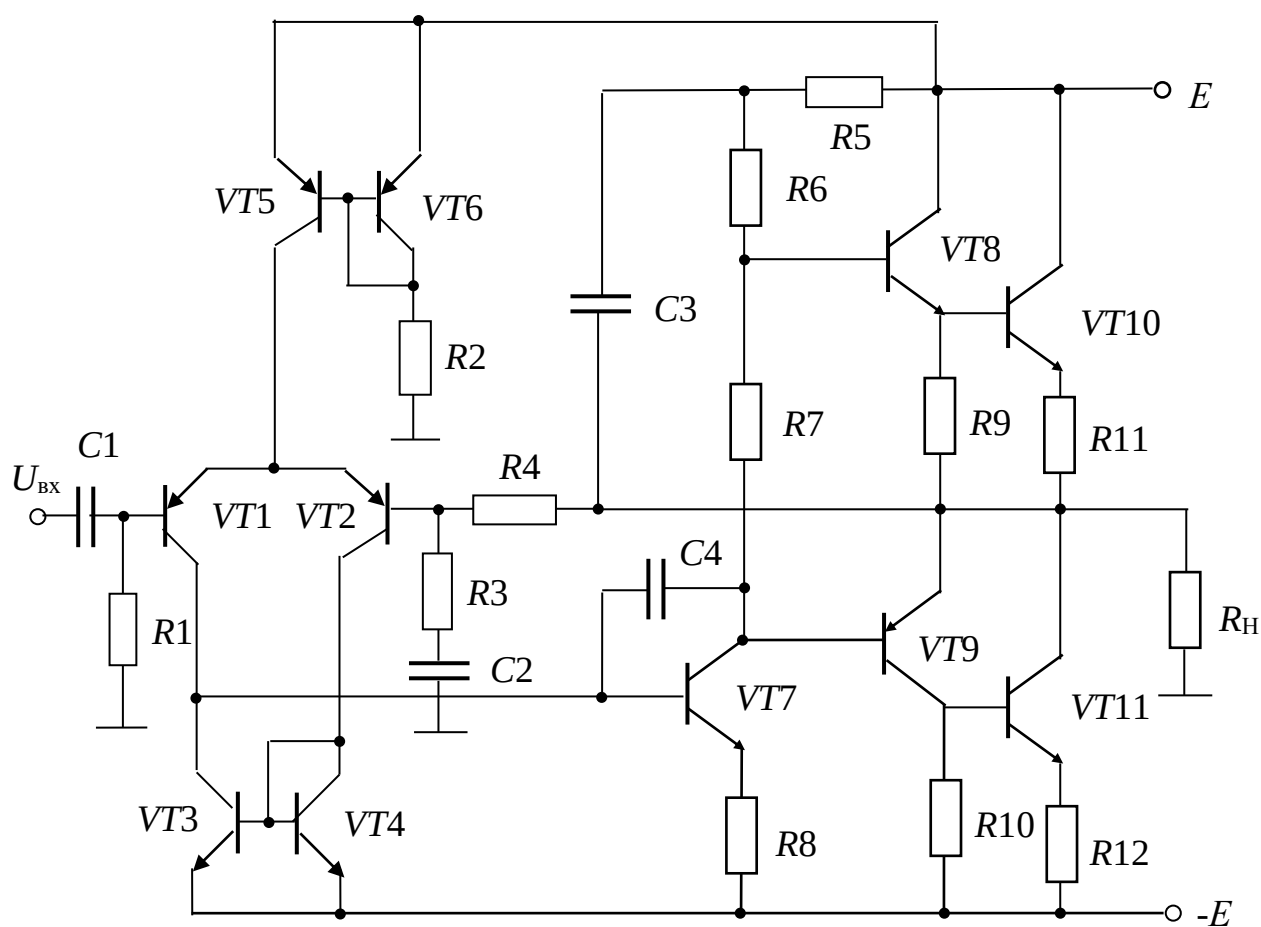


Рисунок 12.2 – УНЧ с последовательной ООС по напряжению

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).

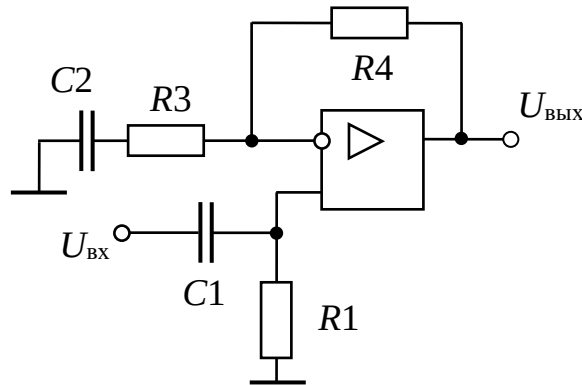


Рисунок 12.3 – Функциональная схема УНЧ

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 диапазона, емкость конденсатора C4 определяется по заданной величине $f_{\text{в}}$ 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 ASIMES, 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_n – активная мощность в нагрузке;
- 2) R_n – активное сопротивление нагрузки;
- 3) E_c – ЭДС источника сигнала;
- 4) R_c – внутреннее сопротивление источника сигнала;
- 5) f_n – нижняя граничная частота полосы пропускания на уровне 3 дБ;
- 6) f_v – 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	$T_{C\max}$, °C
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 Э3 Электрическая принципиальная схема УНЧ
 ФЭТ КП.5.034.015 ПЭ3 Перечень элементов электрической принципиальной схемы УНЧ

Необходимо соблюдать требования и правила, оговоренные в стандарте вуза по оформлению курсовых и дипломных проектов [10].

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 Э3) и перечня элементов (код схемы ПЭ3) 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Пример оформления технического задания

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

Кафедра промышленной электроники

Утверждаю:
Зав. кафедрой ПрЭ

_____ С.Г.Михальченко

ЗАДАНИЕна курсовое проектирование по дисциплине
«Аналоговая схемотехника»

студенту _____ Иванову Петру Сидоровичу _____

группа _____ 360-5 _____ факультет _____ ФЭТ _____

Тема проекта: _____ Усилитель низкой частоты _____

Срок сдачи студентом законченного проекта _____ 26.05.04 _____

Исходные данные к проекту:

Вариант	P_n , Вт	R_n , Ом	E_c , мВ	R_c , Ом	f_n , Гц	f_v , кГц	$T_{C\max}$, °C
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

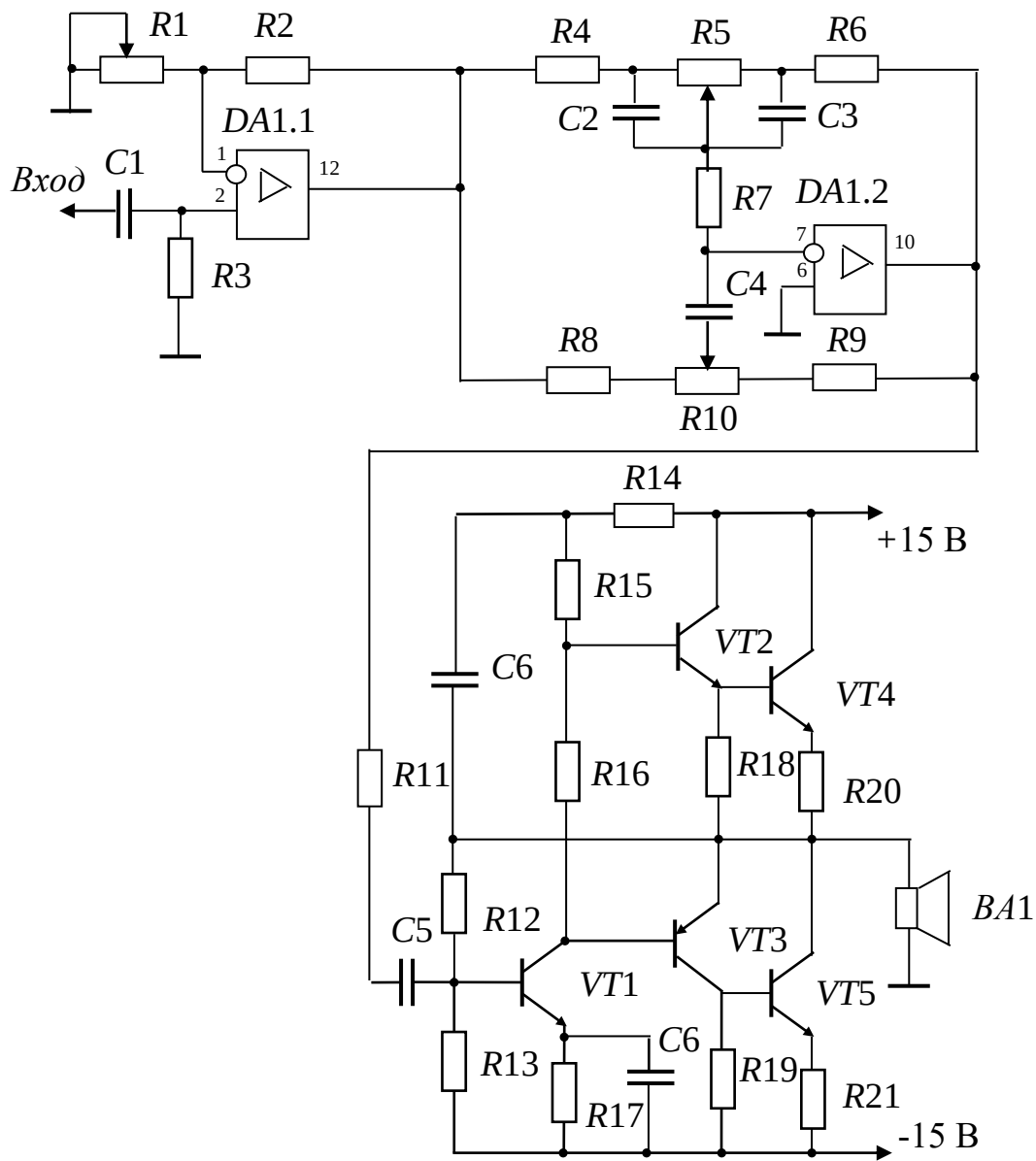
Задание принял к исполнению _____

(дата и подпись студента)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Пример оформления электрической принципиальной схемы



Выводы 9,13 микросхемы DA1 подключить к цепи +15 В, вывод 4 – к цепи минус 15 В.

					ФЭТ КП.5.034.008 ЭЗ					
					Усилитель низкой частоты Схема электрическая принципиальная	Лит.		Масса	Масштаб	
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Э				
Разраб.		Иванов П.С.								
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

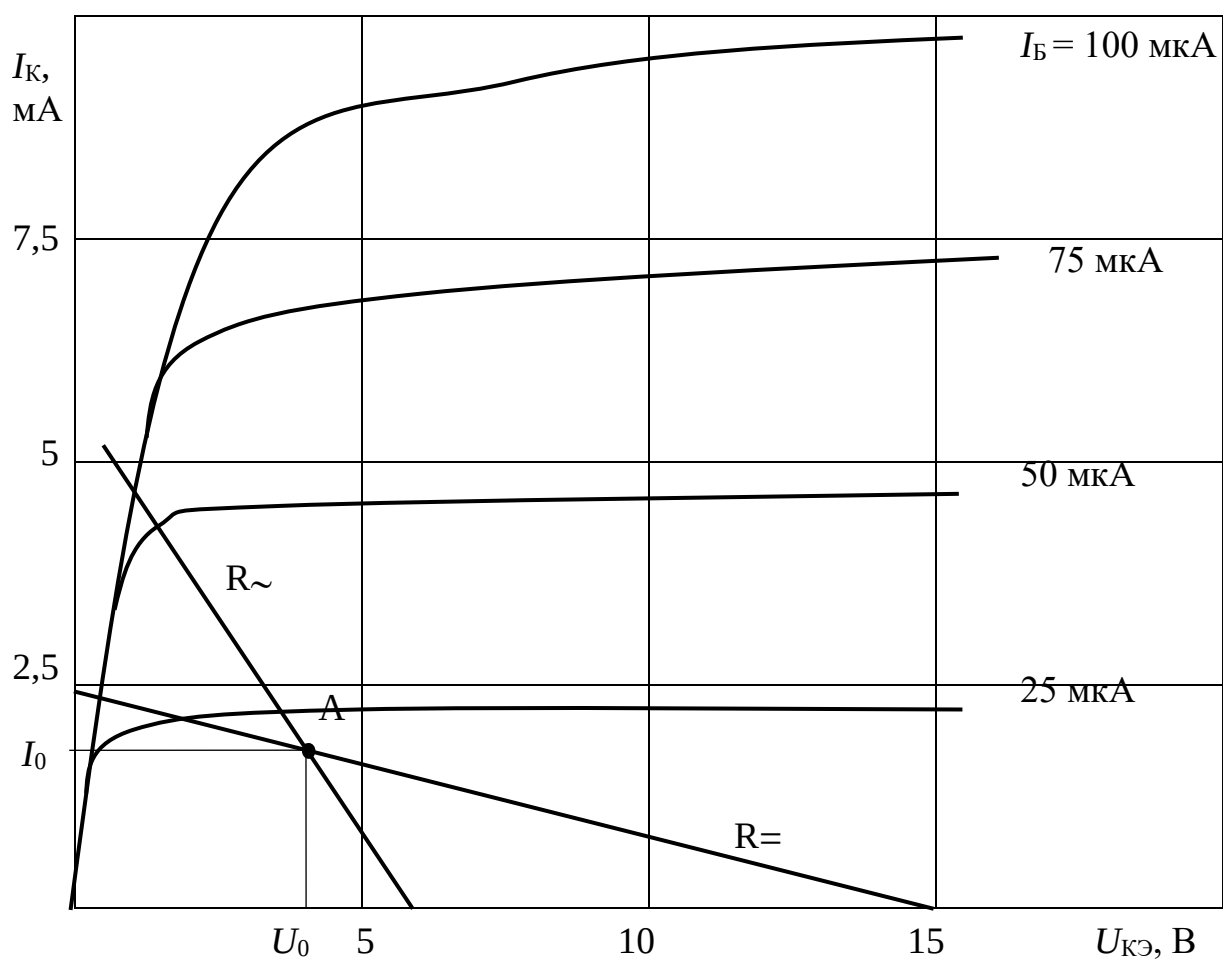
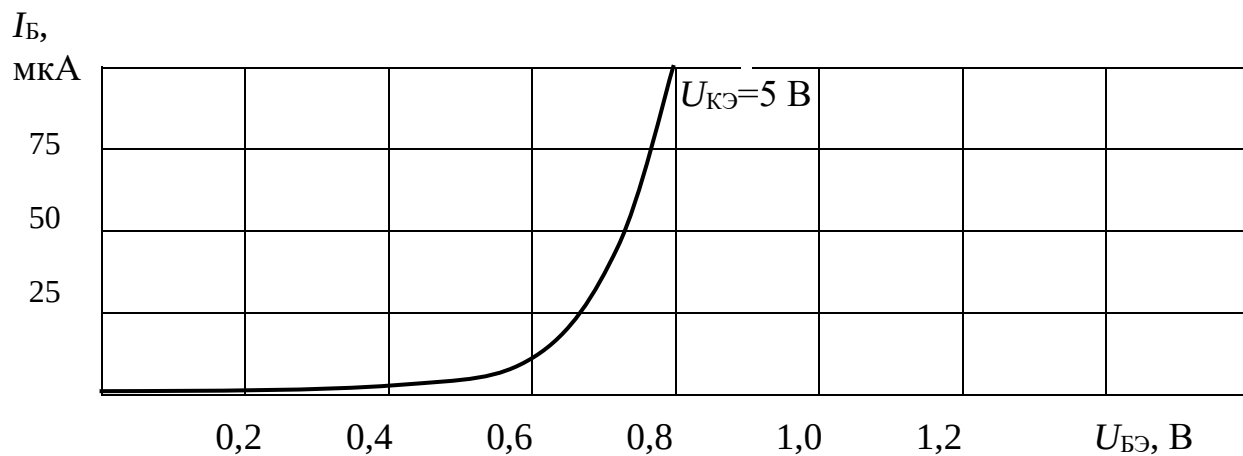
Поз. обозна- чение	Наименование	Кол.	Примечание
	Резонатор кварцевый		
BQ1	РК-169МА-14БП-12000 кГц-В ОД 0.338.003ТУ	1	
	Конденсаторы		
C1, C2	K10-7В-П33-30 пФ±10%	2	
C3	K53-14-6,3 В-10 мкФ±20% ОЖ 0.464.139ТУ	1	
C4	K50-16-16В-500 мкФ ОЖО.464.111ТУ	1	
C5	КМ-6А-Н90-1 мкФ ОЖО.460.061ТУ		
	Микросхемы		
DA1	K142ЕН1Б 6К 347.098 ТУ1	1	
DD1, DD2	K514ИД1 6К 0.348.006ТУ18	2	
HG1, HG2	Индикатор АЛС324А аА 0.336367ТУ	2	
	Резисторы		
R1...R5	МЛТ-0,25-10кОм±10% ГОСТ 7113-77	5	
R6	C5-16-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					
Разраб.		Иванов П.С.			Усилитель низкой частоты	Лит.		Лист	Листов
Пров.		Шарапов А.В.				Э			1
Т.контр.						ТУСУР, гр. 360-2			
Н.контр.									
Утв.									
					Перечень элементов				

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

Характеристики и параметры биполярного транзистора

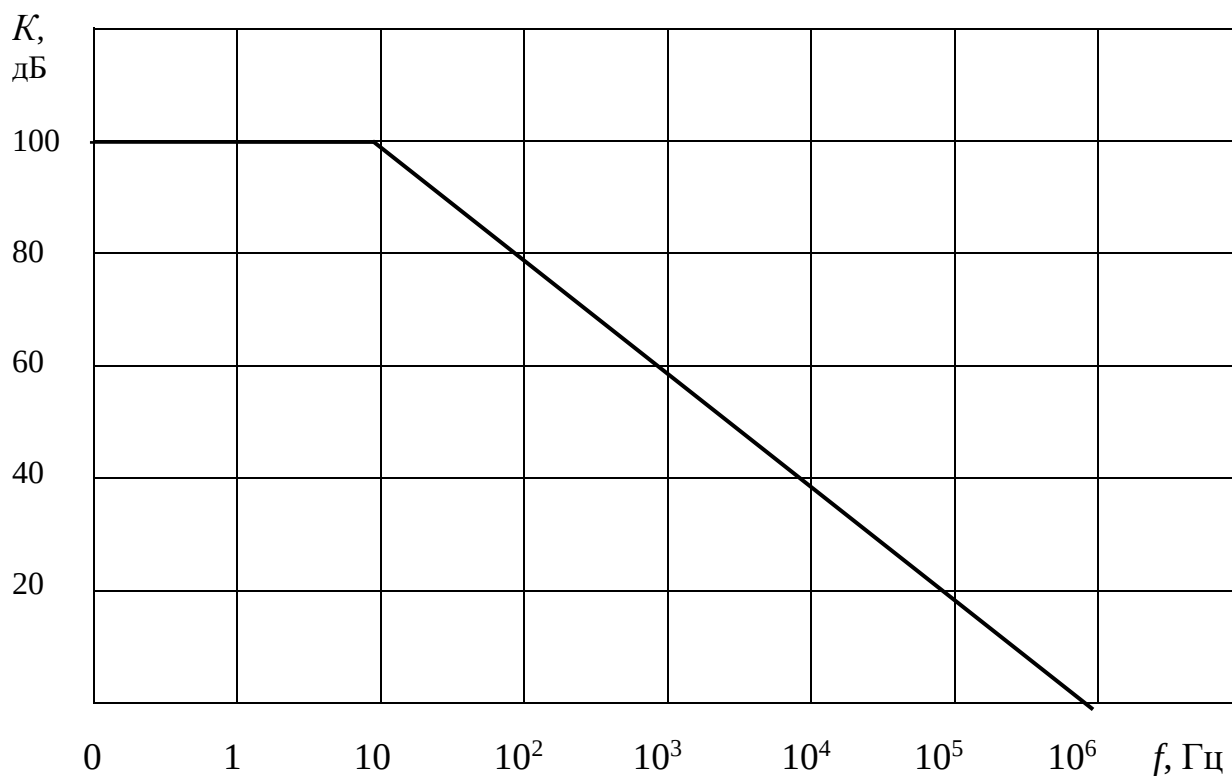


Коэффициент усиления тока базы $\beta = 100$. Омическое сопротивление области базы $r_b = 100\text{ }\Omega$. Сопротивление коллекторного перехода $r_k = 5\text{ МОм}$. Транзистор кремниевый.

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.