

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 09.09.2024 09:36:22

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e0668a0011a5d428d39e5f1c11ea0b73eb945df4a4851fda56d089

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»

(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 23 » 05

2024 г.



ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Методические указания к лабораторным занятиям

Курс - 2024

УДК 681.325

Составитель О.Г. Бондарь, Е. О. Брежнева

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники *И. Е. Чернецкая*

Электроника и схемотехника: методические указания к лабораторным занятиям / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: О.Г. Бондарь, Е. О. Брежнева. - Курск, 2024. - 109 с.: ил. 23. Табл. 21: Библиогр.: с.109.

Излагаются краткие сведения о методиках расчёта узлов аналоговых электронных устройств. Приведены задания.

Методические указания соответствуют требованиям программы, утвержденной учебно-методическим объединением по специальностям автоматике и электроники (УМО АЭ).

Предназначены для бакалавров направления подготовки 10.03.01 «Информационная безопасность» и для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» всех форм обучения.

Могут быть полезны обучающимся других направлений подготовки изучающим электронику и схемотехнику.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 8.02.19. Формат 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 6,34. Уч.- изд. л. 5,74. Тираж 100 экз. Заказ 492. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| СРЕДА MULTISIM | 4 |
| 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ..... | 19 |
| 2 ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ..... | 35 |
| 3 ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА | 47 |
| 4 ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА..... | 66 |
| 5 ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ | 74 |
| 6 ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ..... | 82 |
| 7 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕ- РАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В САПР..... | 89 |
| 8 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ..... | 99 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ..... | 109 |

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный цикл ориентирован на практическое изучение характеристик и параметров компонентов электронных схем, а также изучение особенностей их применения в простейших электронных устройствах. Изучение в основном осуществляется симуляцией в среде проектирования электронных устройств Multisim (OrCAD). Это требует знания основ применения сред проектирования.

СРЕДА MULTISIM

Multisim фирмы National Instruments позволяет объединить процессы разработки электронных устройств и тестирования на основе технологии виртуальных приборов для учебных и производственных целей. Multisim и Ultiboard две составные части среды проектирования CircuitDesignSuite. Первая – среда проектирования электронных схем, а вторая среда проектирования печатных плат.


Технология виртуальных приборов является звеном связующим CircuitDesignSuite с средой визуального проектирования измерительных приборов и систем LabView.

Именно технология виртуальных приборов является основной отличительной особенностью данного продукта. Multisim обеспечивает возможность интерактивного SPICE-моделирования и анализа электрических цепей, используемых в схемотехнике аналоговых, цифровых и смешанных устройств. Этот инструмент позволяет, с одной стороны, сделать очень наглядным изучение дисциплины, а с другой стороны, подготовиться к работе в реальной лаборатории, изучив методику планирования и проведения экспериментов. Наличие аппаратного средства в виде установки ELVISII позволяет с лёгкостью провести экспериментальные исследования тех же устройств, что и в среде моделирования и сопоставить результаты.

Задача существенно облегчается тем, что виртуальные приборы, прототипами которых являются серийно выпускаемые прибо-

ры реализуются и в программно-аппаратной среде LabView – ELVISII.

Создание и открытие проектов

Создание нового проекта в Multisim максимально упрощено. Для этого достаточно запустить одним из способов программу Multisim (через меню программ или иконку программы ). При этом автоматически создается пустой файл проекта Design1.ms12 (число в расширении – номер версии программы, здесь 12). При сохранении это название может быть изменено на произвольное. Допустимо применение кириллицы. При повторном сохранении создается скрытый резервный файл Design1.ms12 (Security copy).

Открыть существующий проект можно через основное меню программы File/Open или двойным щелчком непосредственно на имени файла существующего проекта. Обратная совместимость программ Multisim не поддерживается, т.е. нельзя открыть файл, созданный в версии 13 в программой Multisim версии 12.

Интерфейс программы

Multisim является программой с многооконным графическим интерфейсом, позволяющим строить и редактировать схемы, модели и изображения компонентов, а также представлять результаты расчетов в удобном графическом виде. Пользовательский интерфейс программы показан на рисунке 1 и состоит из следующих элементов:

- 1 – *строка меню* (главное меню) позволяет выбирать команды для всех функций;
- 2 – *панель разработки* позволяет управлять различными элементами схемы;
- 3 – *панель инструментов* состоит из кнопок для быстрого доступа к командам и элементам меню;
- 4 – *окно редактирования* (рабочая область);

5 – приборная панель состоит из набора кнопок для доступа к моделям контрольно-измерительных приборов.

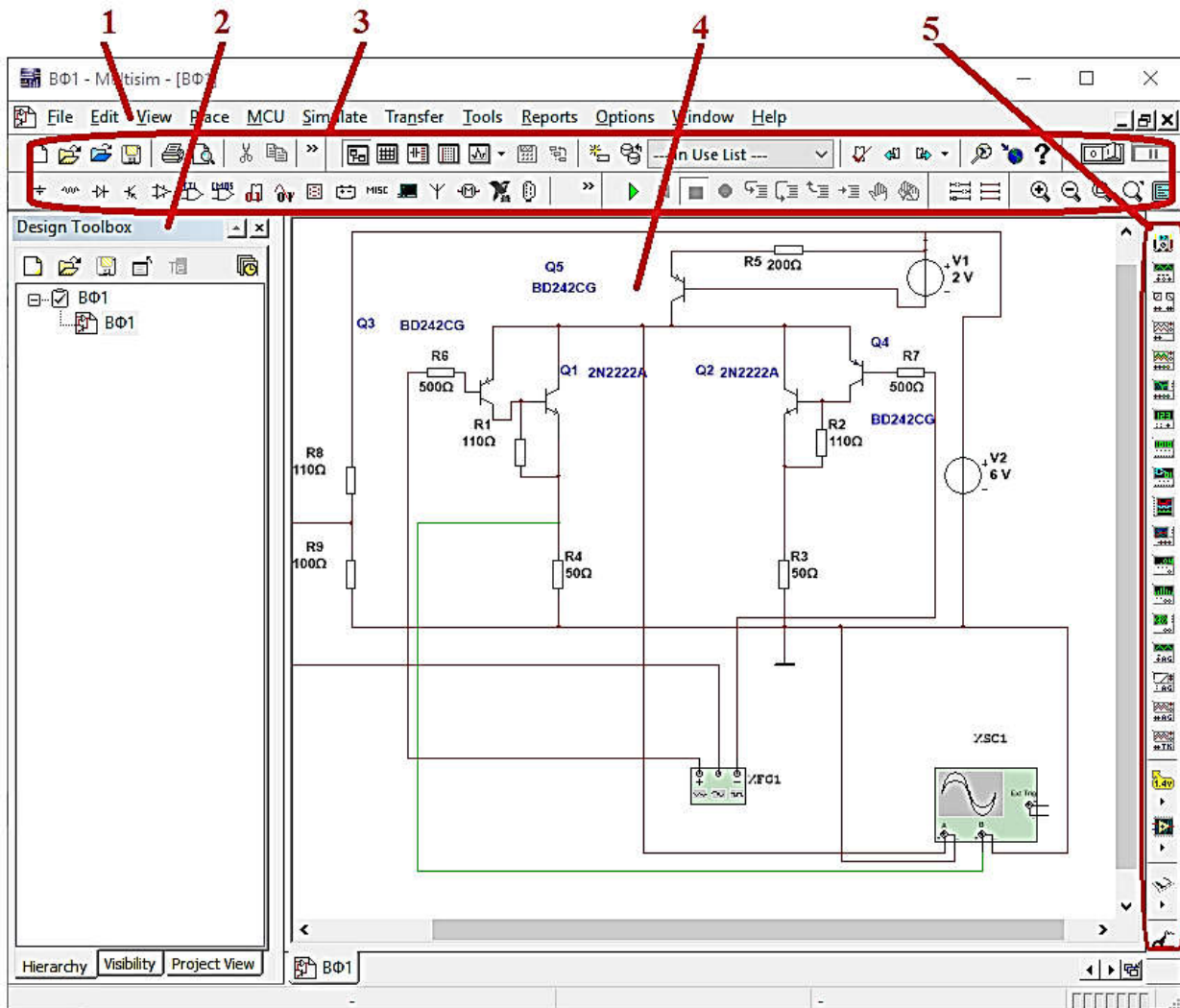


Рисунок 1 – Интерфейс Multisim

Обзор компонентов

Как известно все электронные устройства состоят из компонентов (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, транзисторы и т.п.).

Multisim имеет базы данных трёх уровней:

- Из Главной базы данных (Master Database) можно только считывать информацию, в ней находятся все компоненты;
- Пользовательская база данных (User Database) соответствует текущему пользователю компьютера. Она предназначена для

хранения компонентов, которые нежелательно предоставлять в общий доступ;

- Корпоративная база данных (Corporate Database). Предназначена для тех компонентов, которые должны быть доступны другим пользователям по сети.

Средства управления базами данных позволяют перемещать компоненты, объединять две базы в одну и редактировать их. Все базы данных разделяются на группы, а они, в свою очередь, на семейства. Когда пользователь выбирает компонент и помещает его в схему, создается новая копия. Все изменения с ней никак не затрагивают информацию, хранящуюся в базе данных.

База данных Master Database разделена на группы.

- **Sources.** Содержит все источники напряжения и тока, заземления. Например, power sources (источники постоянного, переменного напряжения, заземление, беспроводные соединения - VCC, VDD, VSS, VEE), signal voltage sources (источники прямоугольных импульсов, источник сигнала через определенные промежутки времени), signal current sources (постоянные, переменные источники тока, источники прямоугольных импульсов).
- **Basic.** Содержит основные элементы схемотехники: резисторы, индуктивные элементы, емкостные элементы, ключи, трансформаторы, реле, коннекторы и т.д.
- **Diodes.** Содержит различные виды диодов: фотодиоды, диоды Шоттки, светодиоды и т.д.
- **Transistors.** Содержит различные виды транзисторов: pnp-, npn-транзисторы, биполярные транзисторы, МОП-транзисторы, КМОП-транзисторы и т.д.
- **Analog.** Содержит все виды усилителей: операционные, дифференциальные, инвертирующие и т.д.

- **TTL.** Содержит элементы транзисторно-транзисторной логики.
- **CMOS.** Содержит элементы КМОП-логики.
- **MCU Module** – управляющий модуль multipoint control unit (от англ. multipoint control unit).
- **Advanced_Peripherals.** Содержит подключаемые внешние устройства (дисплеи, терминалы, клавишные поля).
- **Misc Digital.** Содержит различные цифровые устройства.
- **Mixed.** Содержит комбинированные компоненты
- **Indicators.** Содержит измерительные приборы (вольтметры, амперметры), лампы и т.д.

Виртуальные приборы

Все приборы расположены на панели инструментов. Рассмотрим основные.

Мультиметр

Мультиметр (рисунок 2) предназначен для измерения переменного или постоянного тока, или напряжения, сопротивления или затухания между двумя узлами схемы.

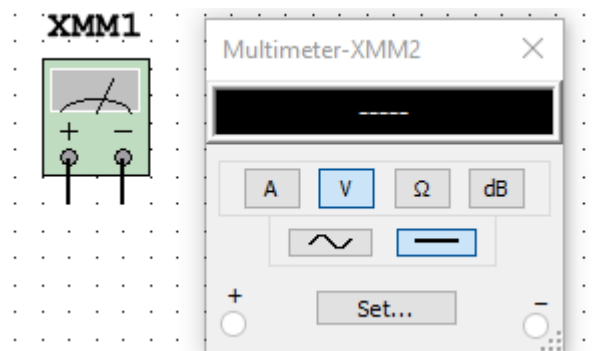


Рисунок 2 - Мультиметр

Диапазон измерений мультиметра подбирается автоматически. Его внутреннее сопротивление и ток близки к идеальным значениям, но их можно изменить.

Генератор сигналов

Генератор сигналов (function generator) – это источник напряжения, который может генерировать синусоидальные, пилообразные и прямоугольные импульсы (рисунок 3). Можно изменить форму сигнала, его частоту, амплитуду, коэффициент заполнения и постоянный сдвиг. Диапазон генератора достаточен, чтобы воспроизвести сигналы с частотами от нескольких герц до аудио и радиочастотных.

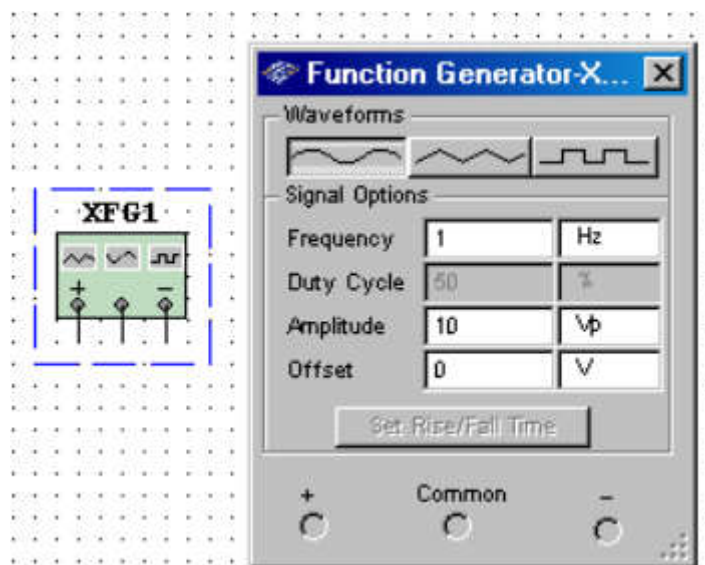


Рисунок 3 – Генератор сигналов

Осциллограф

В Multisim есть несколько модификаций осциллографов, которыми можно управлять как настоящими. Они позволяют устанавливать параметры временной развертки и напряжения, выбирать тип и уровень запуска измерений. Данные осциллографов можно посмотреть после эмуляции с помощью самописца (Grapher) из меню Вид\Плоттер (View/Grapher).

В Multisim есть следующие осциллографы:

- 2-х канальный (рисунок 4)
- 4-х канальный
- осциллограф смешанных сигналов Agilent 54622D

- 4-х канальный цифровой осциллограф с записью Tektronix TDS 2024.

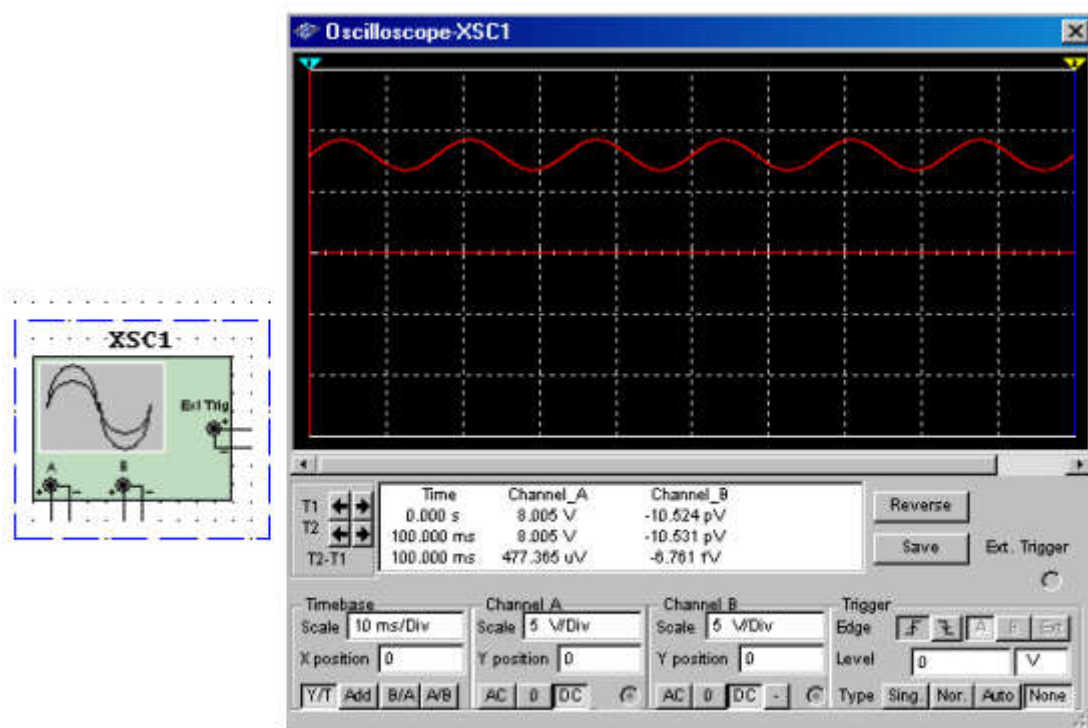


Рисунок 4 – Двухканальный осциллограф

Построитель частотных характеристик (BodePlotter)

Отображает относительный фазовый или амплитудный отклик

входного и выходного сигналов (рисунок 5). Это особенно удобно



при анализе свойств полосовых фильтров.

Рисунок 5 – Построитель частотных характеристик

Спектральный анализатор

Спектральный анализатор (spectrum analyzer) служит для измерения амплитуды гармоник с заданной частотой (рисунок 6). Также он может измерить мощность сигнала и частотных компонент, определить наличие гармоник в сигнале.

Результаты работы спектрального анализатора отображаются в частотной области, а не временной. Обычно сигнал- это функция времени, для её измерения используется осциллограф. Иногда ожидается синусоидальный сигнал, но он может содержать дополнительные гармоники, в результате, невозможно измерить уровень сигнала. Если же сигнал измеряется спектральным анализатором, получается частотный состав сигнала, то есть определяется ампли-



туда основной и дополнительных гармоник.

Рисунок 6 – Спектральный анализатор

Ваттметр

Прибор предназначен для измерения мощности и коэффициента мощности (рисунок 7).

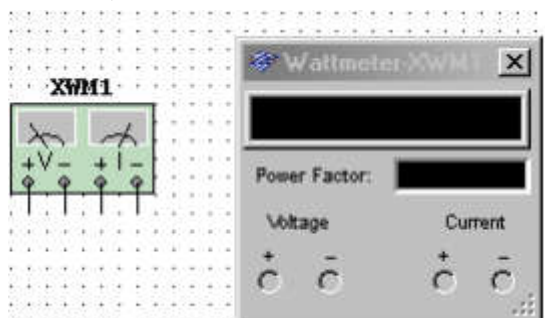


Рисунок 7 - Ваттметр

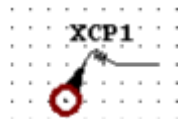
**Токовый пробник**

Рисунок 8 – Токовый пробник

Измерительный пробник

Показывает постоянные и переменные напряжения и токи на участке цепи, а также частоту сигнала (рисунок 9).

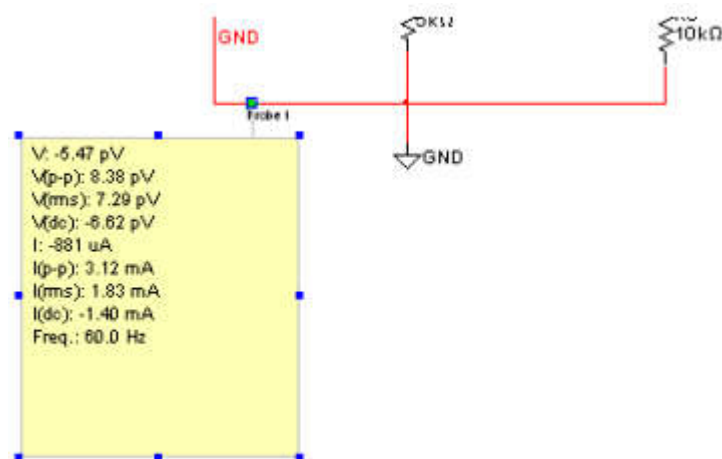
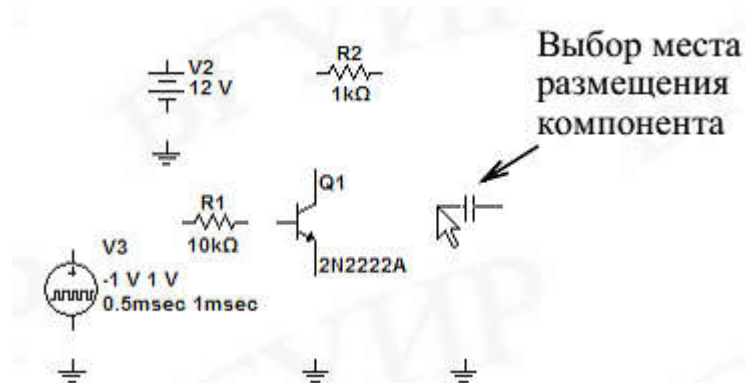


Рисунок 9 – Измерительный пробник

Помимо перечисленных приборов имеются приборы используемые при моделировании цифровых и смешанных устройств.

Создание схем

Рассмотрим процесс создания схемы на примере электронного транзисторного ключа. Процесс создания схемы начинается с



выбора компонентов схемы. Выбранный компонент автоматически прикрепляется к курсору мыши. После этого компонент размещается в любом месте рабочего окна (рисунок 10).

Рисунок 10 – Размещение компонентов схемы

Далее устанавливается ориентация компонентов (если это необходимо) с помощью команд всплывающего меню (нажатие правой кнопки мыши на выбранном компоненте, рисунок 11, а) и изменяются параметры элементов питания, рисунок 11, б).

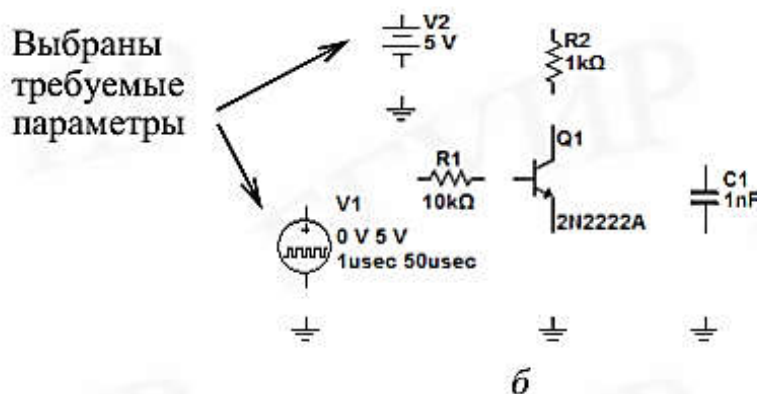
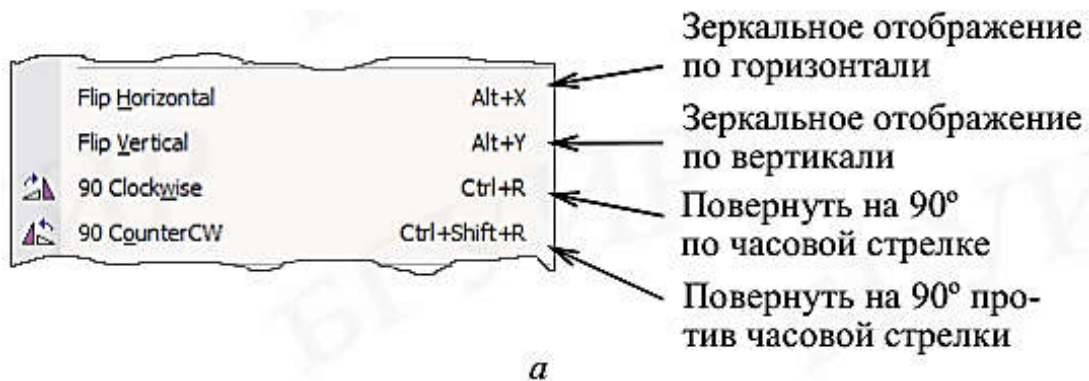


Рисунок 11 – Ориентация элементов схемы (а),
при их добавлении (б)

После размещения компонентов схемы производится соединение их выводов проводниками. При этом необходимо учитывать, что к выводу подключается один проводник. Для выполнения подключения курсор мыши подводится к выводу компонента и после превращения курсора в жирную точку с перекрестием устанавливается соединение щелчком по главной кнопке мыши. Далее курсор перемещается в к другому выводу и при изменении его вида также выполняется щелчок.

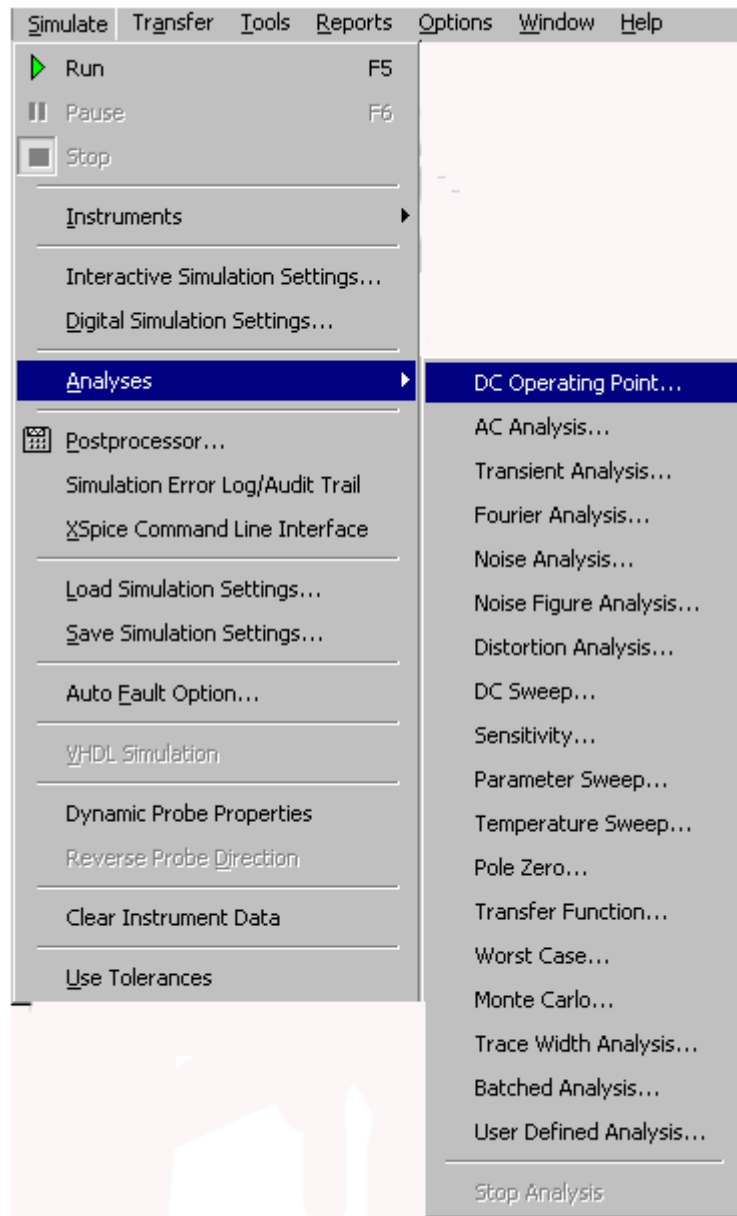
Анализ электронных устройств

В Multisim предусмотрено множество режимов анализа данных эмуляции, от простых до самых сложных, в том числе и вложенных.

Основные виды анализа:

1. DC – анализ цепи на постоянном токе. Анализ цепей на постоянном токе осуществляется для резистивных схем. Это правило следует напрямую из теории электрических цепей; при анализе на постоянном токе конденсаторы заменяют разрывом, катушки индуктивности – коротким замыканием, нелинейные компоненты, такие как диоды и транзисторы, заменяют их сопротивлением постоянному току в рабочей точке. Анализ цепи на постоянном токе выявляет узловые потенциалы исследуемой схемы.
2. AC – анализ цепи на переменном токе. Анализ цепей на переменном токе заключается в построении частотных характеристик.
3. Transient – анализ переходных процессов. Анализ переходных процессов в цепях позволяет определить форму выходного сигнала, то есть построить график сигнала как функции времени.

Чтобы начать анализ, следует выбрать пункт меню Simulate\Analyses и далее требуемый режим. Список всех функций Multisim



приведен на рисунке 12:

Рисунок 12 – Функции анализа Multisim

Кроме встроенных функций анализа есть возможность определить свою функцию с помощью команд SPICE.

При подготовке к анализу необходимо настроить его параметры, например, диапазон частот для анализатора переменного

тока (AC analysis). Необходимо также выбрать выходные каналы (traces).

Плоттер (Grapher) – основной инструмент просмотра результатов эмуляции. Он открывается из меню View/Grapher и автоматически при работе эмуляции.

Множество настроек плоттера находятся в окне свойств. Например, можно изменять масштабы, диапазоны, заголовки, стили линий осей (рисунок 13).



Рисунок 13 – Панель настройки плоттера

Postprocessor и Grapher

Postprocessor и Grapher — это программы пакета Multisim, которые позволяют отобразить результаты моделирования в графическом виде. Данная функция позволяет строить необходимые графики после проведенного анализа. Для работы с функцией Postprocessor (рисунок 14, а) необходимо знать названия узлов.

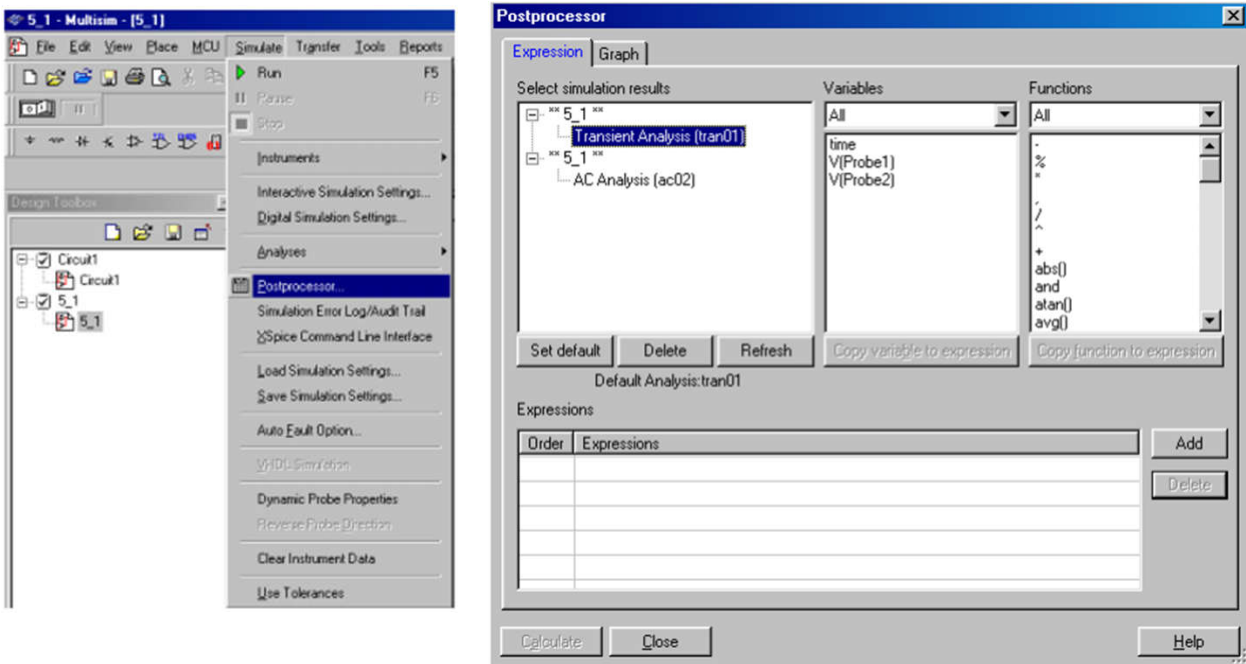
Только те параметры (входные и выходные переменные), которые указываются при выполнении любого вида анализа (AC Sweep, DC Sweep, Transient Analysis и т.д.) отображаются на графиках функции Postprocessor и Grapher. С помощью данной функции можно создать несколько графиков, изменять параметры графика, удалять объекты, производить логические и алгебраические операции над графиками (сложение, умножение, возведение в квадрат и т.д.).

Создание графика:

-внесение данных, необходимых для построения (рисунок 14, б):

Select simulation results-добавление данных проведенного анализа.
 Variables-переменные, необходимые для построения графика.
 Functions-алгебраические действия над графиками.
 В окне Expressions available выбираем необходимые графики для построения.

Для типовых задач формирование заданий проще осуществлять в визуальной форме, используя виртуальные приборы, рассмотренные выше.



а

б

Рисунок 14 – Постпроцессор

Общие правила моделирования

При моделировании схем необходимо соблюдать следующие общие правила:

1. Любая схема должна обязательно содержать хотя бы один символ заземления.
2. Любые два конца проводника либо контакта устройства, встречающихся в точке, всегда считаются соединенными.
3. При соединении трех концов (Т-соединение) необходимо использовать символ соединения (узел). Те же правила применяются при соединении четырех и более контактов.

4. В схемах должны присутствовать источники сигнала (тока или напряжения), обеспечивающие входной сигнал, и не менее одной контрольной точки (за исключением анализа схем постоянного тока).

Топология схем

1. В схеме не должны присутствовать контуры из катушек индуктивности и источников напряжения.
2. Источники тока не должны соединяться последовательно.
3. Не должно присутствовать короткозамкнутых катушек.
4. Источник напряжения должен соединяться с катушкой индуктивности и трансформатором через последовательно включенный резистор. К конденсатору, подключенному к источнику тока, обязательно должен быть параллельно присоединен резистор.

1 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы

1. Формирование навыков проектирования электронных устройств в средах автоматизированного проектирования.
2. Изучение структуры, принципа работы и расчета простейшего источника питания, предназначенного для питания электронных схем.

Основные теоретические положения

Основными параметрами выпрямителей определяются выражениями 1-3.

Среднее значение выходного напряжения

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вых}} dt. \quad (1)$$

Среднее значение выходного тока

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{вых}} dt. \quad (2)$$

Коэффициент пульсации выходного напряжения

$$k_{\text{п}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{2 \times U_{\text{ср}}}, \quad (3)$$

где $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ – размах пульсирующего напряжения на выходе выпрямителя (двойная амплитуда пульсаций).

Однополупериодный выпрямитель

Простейшим выпрямителем является схема однофазного однополупериодного выпрямителя (рисунок 1, а).

Рассмотрим ее работу в предположении, что входное напряжение изменяется по закону $U_{\text{вх}} = U_{\text{м}} \sin(\omega t)$. На интервале $0 < t < T/2$ (рисунок 1, б) полупроводниковый диод VD смещен в прямом-

направлении и напряжение, а, следовательно, и ток в нагрузочном резисторе повторяют форму входного сигнала.

На интервале $T/2 < t < T$ диод VD смещен в обратном направлении и напряжение (ток) в нагрузке равно нулю.

При заданном входном напряжении $U_{вх} = U_m \sin(\omega t)$ для нечетных его полупериодов выпрямленный ток в нагрузочном резисторе R_H будет создавать на нем падение напряжения, среднее значение которого равно

$$U_{H\text{ ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_H dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{T\omega} \cos \omega t \Big|_0^{T/2} = U_m / \pi = 0,318 U_m$$

где U_m — амплитуда входного напряжения.

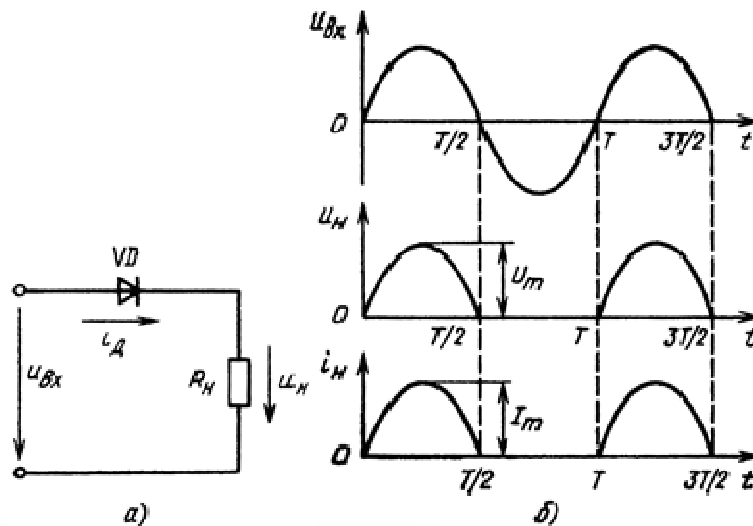


Рисунок 1 - Схема однополупериодного выпрямителя (а) и временные диаграммы, поясняющие его работу (б)

Используя известное соотношение, связывающее амплитудное и действующее значения напряжения синусоидального тока $U_m = U\sqrt{2}$, получаем:

$$U_{H\text{ ср}} = U\sqrt{2}/\pi = 0,45U, \quad (4)$$

где U — действующее значение входного напряжения.

По аналогии для среднего тока в нагрузочном резисторе можно записать:

$$I_{\text{н ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_m \sin \omega t dt = 0,318 I_m = 0,45 I, \quad (5)$$

где I_m — амплитуда выпрямленного тока.

Действующий ток в нагрузочном резисторе, равный току диода, определяется выражением:

$$I_{\text{д}} = I_{\text{н}} = \sqrt{\frac{I_m^2}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt} = I_m / 2 = 0,5 I_m. \quad (6)$$

Максимальное обратное напряжение на диоде:

$$U_{\text{д обр}} = U_m. \quad (7)$$

Спектральный состав выпрямленного напряжения, полученный в результате разложения однополупериодных импульсов выпрямленного напряжения (рис. 1, б) в ряд Фурье, имеет вид

$$u_{\text{н}} = \frac{1}{\pi} U_m + \frac{1}{2} U_m \sin \omega t - \left(\frac{2}{3\pi} U_m \cos 2\omega t + \frac{2}{3 \cdot 5\pi} U_m \cos 4\omega t + \dots \right),$$

где $U_0 = \frac{1}{\pi} U_m$ — постоянная составляющая выпрямленного напряжения;

$u_1 = \frac{1}{2} U_m \sin \omega t$ — первая (основная) гармоника выходного напряжения;

$u_2 = \frac{2}{3\omega} U_m \cos 2\omega t$ — вторая гармоника выходного напряжения и

т.д.

Коэффициент пульсации, равный отношению амплитуды первой (основной) гармоники к среднему значению выпрямленного напряжения, для рассматриваемой схемы:

$$k_{\text{пл}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{2 \times U_{\text{н ср}}} = \frac{\pi}{2} = 1,57. \quad (8)$$

Как видно, однополупериодное выпрямление имеет низкую эффективность из-за высокой пульсации выпрямленного напряжения.

Двухполупериодный выпрямитель

Анализируя временные диаграммы, приведенные на рисунке 1б, можно сделать вывод, что параметры выходного напряжения выпрямителя можно существенно улучшить, если ток нагрузки будет протекать в оба полупериода действия входного напряжения. Этого наиболее просто добиться, используя две схемы однополупериодного выпрямления, работающие синхронно и противофазно на единую нагрузку. Реализация данной идеи потребует использования двух источников первичного напряжения $U_{\text{вх}} = U_m \sin(\omega t)$ и $U_{\text{вх}} = U_m \sin(\omega t + \pi)$, имеющих общую точку. Полученная таким образом схема (рисунок 2, а) называется *двухполупериодной схемой выпрямителя со средней точкой*.

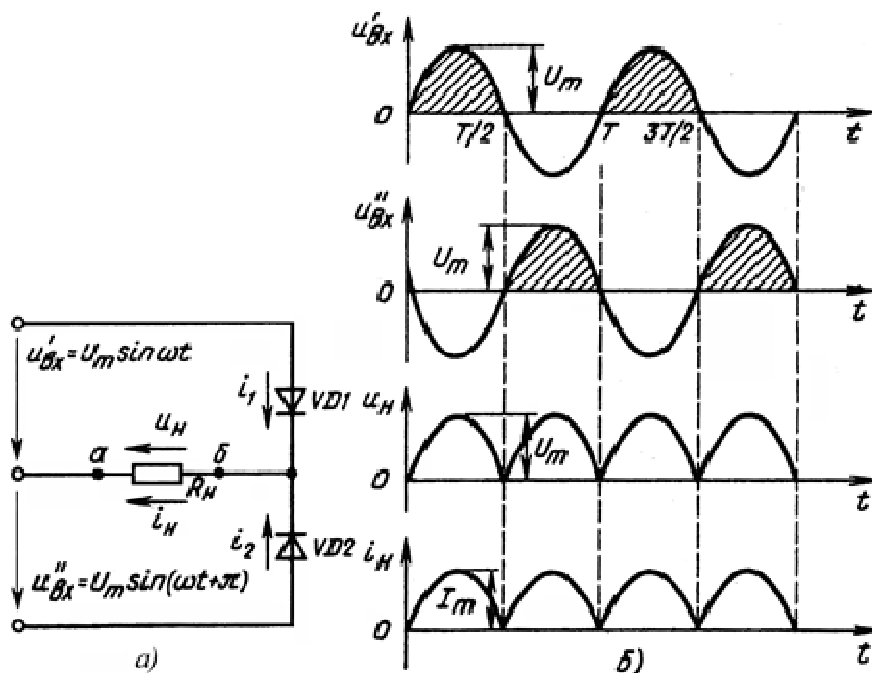


Рисунок 2.2 - Схема двухполупериодного выпрямителя со средней точкой (а)

и временные диаграммы, поясняющие его работу (б)

Рассмотрим ее работу. Для этого воспользуемся временными диаграммами, приведенными на рисунке 2, б. На интервале $0 < t < T/2$ под действием напряжения u'_{BX} диод $VD1$ смещен в прямом направлении и поэтому ток нагрузки определяется этим напряжением. На этом же интервале диод $VD2$ смещен в обратном направлении и к нему прикладывается сумма напряжений $u_H + u'_{BX}$. В результате этого максимальное обратное напряжение запертого диода $U_{ДМАКС} \approx 2U_m$.

На интервале $T/2 < t < T$ диод $VD1$ смещен в обратном направлении, а ток нагрузки под действием напряжения u''_{BX} протекает через прямо смещенный диод $VD2$.

Нетрудно заметить, что в данном случае *средние значения* напряжения нагрузки будут в два раза превышать напряжение однофазной однополупериодной схемы:

$$U_{H\text{ ср}} = 2U_m / \pi = 2\sqrt{2}U / \pi = 0,637U_m = 0,9U \quad (9)$$

$$I_{H\text{ ср}} = 2I_m / \pi = 2\sqrt{2}I / \pi = 0,637I_m = 0,9I, \quad (10)$$

где U_m и I_m —амплитудные значения входного напряжения и тока, а U и I — их действующие значения.

К аналогичным результатам можно прийти, основываясь и на следующих общих рассуждениях. В рассматриваемой схеме каждый диод проводит ток в течение половины периода. Тогда среднее напряжение равно удвоенному значению среднего за период напряжения от интервала проводимости одного диода.

При этом, как видно из рисунка 2(б), частота первой (основной) гармоники, пульсирующего выходного напряжения u_H будет в 2 раза выше частоты входного напряжения u_{BX} , а коэффициент пульсаций выходного напряжения двухполупериодной схемы будет равен:

$$k_{п2} = \frac{\Delta U_H}{2 \times U_{H\text{ ср}}} = \frac{2}{3} = 0,67. \quad (11)$$

Так как в рассматриваемой схеме ток через каждый диод протекает в течение только половины периода, то его действующее значение будет таким же, что и в однополупериодной схеме выпрямителя.

Полученные выражения показывают, что эффективность двухполупериодного выпрямителя значительно выше однополупериодной схемы, что предопределило ее широкое использование.

К основным недостаткам рассмотренной схемы следует отнести:

- необходимость двух источников входного напряжения;
- высокое значение напряжения, прикладываемого к полупроводниковым диодам при их обратном смещении ($U_{Д\text{МАКС}} \approx 2U_m$);
- малое значение напряжения $U_{\text{ср}}$, определяемого амплитудой U_m , в то время как суммарная амплитуда входного напряжения схемы равна $2U_m$.

Для уяснения причин появления перечисленных недостатков проанализируем работу схемы на рисунке 2(а).

Вывод «а» сопротивления нагрузки R_H постоянно подключен к средней точке источников первичного напряжения $u'_{ВХ}$ и $u''_{ВХ}$. В то же время вывод «б» периодически переключается диодами VD_1 и VD_2 от вывода источника $u'_{ВХ}$ к выводу источника $u''_{ВХ}$. В этом случае естественно предположить, что, если вывод «а» нагрузки при помощи второй аналогичной диодной схемы будет синхронно и противофазно подключаться к неиспользуемым на соответствующем интервале выводам источников $u'_{ВХ}$ и $u''_{ВХ}$, необходимость в средней точке входного источника отпадёт и $U_{H\text{ср}}$ и $I_{H\text{ср}}$ увеличатся в 2 раза. Схемотехническая реализация такого решения приведена на рисунке 3, а.

На интервале $0 < t < T/2$ сумма напряжений $u'_{ВХ} + u''_{ВХ} = u_{ВХ}$ смещает в прямом направлении включенные последовательно с нагрузкой диоды VD_1 и VD_4 .

При этом диоды VD_2 и VD_3 смещены в обратном направлении напряжением, приложенным к нагрузке ($U_{д\text{обр}} = U_H$).

На интервале $T/2 < t < T$ суммарное напряжение $u'_{\text{ВХ}} + u''_{\text{ВХ}} = u_{\text{ВХ}}$ смещает диоды VD_2 и VD_3 в прямом, а диоды VD_1 и VD_4 в обратном направлении.

Из сказанного следует, что, как и в предыдущей схеме двухполупериодного выпрямителя (рисунок 2, а), напряжение прикладывается к нагрузке в течение всего периода изменения напряжения $u_{\text{ВХ}}$.

При этом его значение при $u_{\text{ВХ}} = u'_{\text{ВХ}} + u''_{\text{ВХ}}$ в 2 раза превышает выходное напряжение схемы на рисунке 2.2(а).

Поэтому при одном и том же напряжении нагрузки в схеме на рисунке 3(а) к обратносмещенному диоду прикладывается напряжение в два раза меньшее, чем в схеме на рисунке 2.2(а).

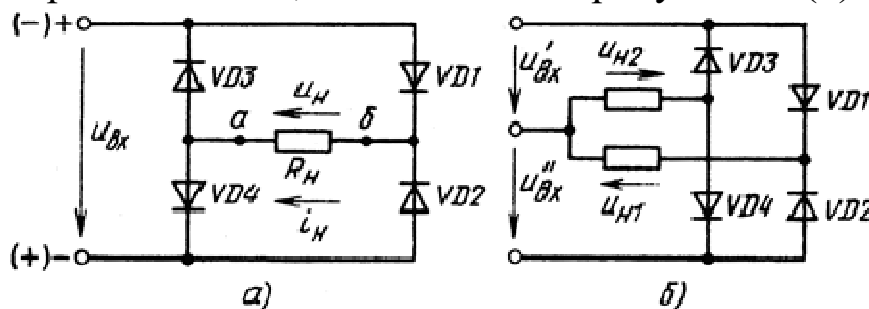


Рисунок 3 - Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя с одним (а) и с двумя (б) входными напряжениями

Схема на рисунке 3,а носит название *мостового выпрямителя*. Ее основные параметры ($U_{H\text{ ср}}$, $I_{H\text{ ср}}$) такие же, что и для двухполупериодной схемы со средней точкой, при условии $u_{\text{ВХ}} = u'_{\text{ВХ}} = u''_{\text{ВХ}}$.

Особенностью рассмотренных двухполупериодных схем является то, что в схеме со средней точкой последовательно с нагрузкой постоянно включен только один диод, в то время как в мостовой схеме таких диодов два.

Поэтому при низких выходных напряжениях (до 4...5 В) лучше применять схему на рисунке 2, а из-за меньших потерь напряжения на диодах.

При повышении выходного напряжения разница в потерях для этих схем уменьшается. Определяющим фактором становится меньшее обратное напряжение, прикладываемое к запертым диодам схемы рисунок 3, а.

Поэтому при больших уровнях выходного напряжения обычно используют выпрямитель, выполненный по мостовой схеме.

Следует отметить, что если мостовую схему выпрямителя использовать совместно с источником, снабженным средней точкой и средний выход каждой пары диодов соединить со средней точкой входного источника через собственную нагрузку, на выходе выпрямителя получим два равных, но обратных по знаку напряжения (рисунок 3, б). Такая схема выпрямителя часто используется для питания устройств, построенных с применением операционных усилителей. Для уменьшения пульсации выходного напряжения применяются фильтры.

Емкостной сглаживающий фильтр является наиболее простым. Он состоит из конденсатора C_f , включаемого параллельно сопротивлению нагрузки (рисунок 4, а). Временные диаграммы, поясняющие его работу на выходе двухполупериодного выпрямителя, приведены на рисунке 4, б.

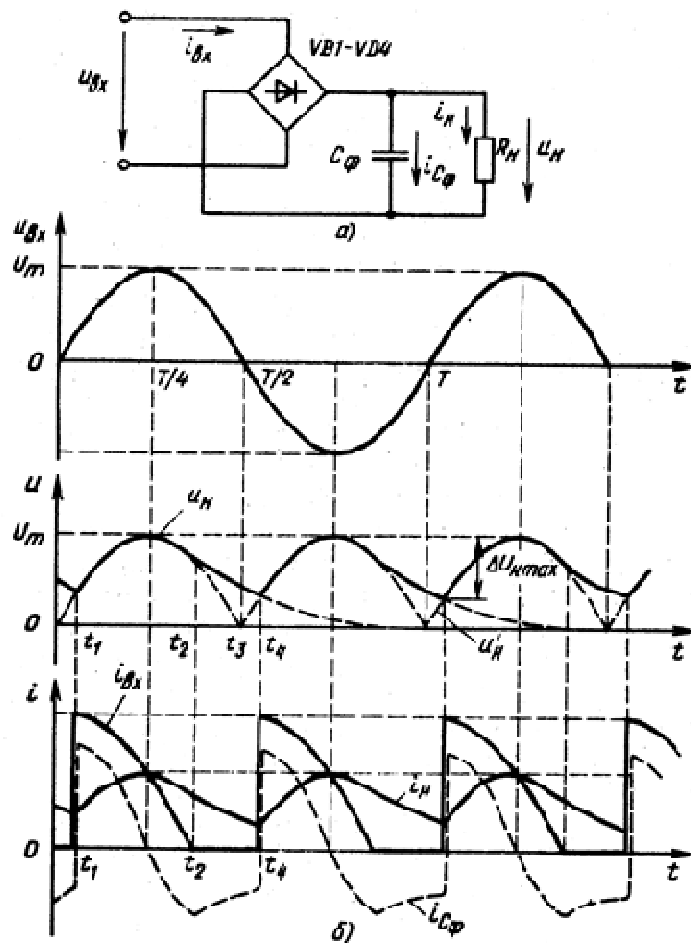


Рисунок 4 - Схема двухполупериодного выпрямителя с емкостным фильтром (а) и временные диаграммы, поясняющие его работу (б)

Анализ работы данного фильтра проведем в предположении, что качестве диодов схемы выпрямителя применяются идеальные диоды ($U_{до}=0$, $r_d=0$), а внутреннее сопротивление источника входного напряжения равно $R_{вн}=0$.

Допустим, что в момент времени $t=t_1$ напряжение на конденсоре C_Φ равно мгновенному значению входного напряжения, т.е. выполняется условие $u_c(t_1)=u_{вх}(t_1)$. Дальнейшее увеличение входного напряжения приведет к смещению в прямом направлении соответствующей пары диодов выпрямителя. При этом через диоды будет протекать ток, равный сумме тока нагрузки и зарядного тока конденсатора

$$i_{вх} = U_m \sin \omega t / R_H + C_\Phi \omega U_m \cos \omega t, \quad (12)$$

где U_m —амплитудное значение входного напряжения, ω – частота входного напряжения.

Так как мы предположили, что $r_d + R_{вн} = 0$, то до момента t_2 мгновенные значения напряжений $u_c = u_H$ и $u_{вх}$ будут равны. После момента t_2 напряжение $u_{вх}$ становится меньше u_c . Это вызовет за-пираание ранее открытых диодов ($u_c > u_{вх}$) и отключение нагрузки от источника входного напряжения. Далее до момента t_4 напряжение на нагрузке будет поддерживаться исключительно за счет заряда, накопленного конденсатором C_ϕ ранее на интервале $t_1 \dots t_2$. Следует обратить внимание, что всегда $t_2 > T/4$, т. е. выключение диодов происходит в момент, когда $u_{вх} < U_m$. Точное значение t_2 можно найти из решения уравнения для входного тока при условии $i_{вх} = 0$. В момент $t = T/4$ ток $i_{вх} = i_{RH} = U_m/R_H$.

Из описанного принципа работы вытекает, что подключение на выход выпрямителя емкостного фильтра качественно изменяет режим его работы. При этом энергия от входного источника от-бирается только на интервале $t_1 \dots t_2$ в течение которого $u_{вх} > u_c$. Чем больше емкость C_ϕ , тем меньше реальная пульсация выходного напряжения, тем короче интервал $\Delta t_1 = t_2 - t_1$ и тем ближе значение напряжения нагрузки к амплитудному значению входного напря-жения.

Для получения расчетных соотношений предположим, что амплитуда переменного напряжения на выходе фильтра суще-ственно меньше среднего значения выходного напряжения.

Тогда с достаточной точностью можно полагать, что на ин-тервале $t_2 \dots t_4$ ток разряда конденсатора фильтра C_ϕ постоянен и равен $I_p \approx U_H/R_H$ и $t_2 \approx T/4$. В этом случае можно считать, что умень-шение выходного напряжения на интервале $\Delta t_2 = t_4 - t_2$ происходит по линейному закону и длительность интервала Δt_2 можно опреде-лить из решения следующей системы уравнений:

$$U_m - (I_p/C_\phi)[T/4 + (t_4 - t_3)] = U_m \sin \omega(t_4 - t_3) \quad (13)$$

$$\Delta t_2 = t_4 - t_3 = T/4 + (t_4 - t_3)$$

При заданном значении пульсаций выходного напряжения $\Delta U_{H \max}$ и по найденному значению Δt_2 легко найти необходимую емкость конденсатора фильтра

$$C_{\phi} = I_p \Delta t_2 / \Delta U_{H \max} \cdot \quad (14)$$

Из полученного выражения следует, что емкость конденсатора C_{ϕ} прямо пропорциональна току нагрузки и обратно пропорциональна величине выходных пульсаций.

Для инженерных расчетов допустимо $\Delta t_2 \approx T/2$ для двухполупериодной схемы выпрямления. Тогда емкость конденсатора фильтра можно определить так:

$$C_{\phi 2} = (U_H / R_H)(T/2) / \Delta U_{H \max} = (4 f R_H k_{\text{п доп}})^{-1} \cdot \quad (15)$$

Для однополупериодного выпрямителя $\Delta t_2 \approx T$ и тогда:

$$C_{\phi 1} = (U_H / R_H) T / \Delta U_{H \max} = (2 f R_H k_{\text{п доп}})^{-1} \cdot \quad (16)$$

Пример. Рассчитать емкостной фильтр, работающий на выходе двухполупериодного выпрямителя со средней точкой, при следующих параметрах: $u_{\text{вх}} = 6,5 \sin \omega t$; $\omega = 100\pi$ ($f = 50$ Гц); $R_H = 50$ Ом; $U_{\text{до}} = 0,65$ В, $r_d = 6$ Ом, $\Delta U_{H \max} = 200$ мВ.

1) Определяем максимальное напряжение на конденсаторе C_{ϕ} :

$$U_{C_{\phi \max}} = U_{\text{вх макс}} - U_{\text{до}} - \frac{U_{C_{\phi \max}}}{R_H} r_d$$

Откуда

$$U_{C_{\phi \max}} = -\frac{R_H (U_{\text{вх макс}} - U_{\text{до}})}{R_H + r_d} = \frac{50(6,5 - 0,65)}{50 + 5} = 5,318 \text{ В}$$

2) По заданной величине выходных пульсаций найдем длительность интервала $t_4 \dots t_3$.

$$U_{C_{\phi \max}} - \Delta U_{H \max} = U_{C_{\phi \max}} \sin \omega(t_4 - t_3)$$

Откуда

$$t_4 - t_3 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{U_{C_{\phi}\text{макс}} - \Delta U_{\text{нмакс}}}{U_{C_{\phi}\text{макс}}} = \frac{1}{100\pi} \arcsin \frac{5,318 - 0,2}{5,318} = 4,118 \text{ мс}$$

3) Время разряда конденсатора

$$t_{\text{разр}} = T/4 + (t_4 - t_3) = 5 + 4,118 = 9,118 \text{ мс}$$

4) Найдем требуемую емкость конденсатора фильтра

$$C_{\phi 2} = \frac{U_{\text{нмакс}} t_{\text{разр}}}{\Delta U_{\text{нмакс}} R_{\text{н}}} = \frac{5,318 \cdot 9,118}{0,2 \cdot 50} = 4,849 \text{ мФ}$$

Принимаем $C_{\phi} = 5000 \text{ мкФ}$.

Расчет емкость конденсатора фильтра по приближенной формуле дает такой результат:

$$C_{\phi 2} = \frac{U_{\text{нмакс}}}{2f \Delta U_{\text{нмакс}} R_{\text{н}}} = \frac{5,318}{2 \cdot 50 \cdot 0,2 \cdot 50} = 5,318 \text{ мФ}$$

Очевидно, что в этом случае емкость C_{ϕ} рассчитана с некоторым запасом, что вполне допустимо на практике.

Подготовка к работе

1. Изучить структурные схемы источников вторичного электропитания, параметры.
2. Изучить устройство и принцип действия выпрямителей, разновидности, сравнительные характеристики.
3. Изучить емкостные фильтры, принцип действия, оценка величины ёмкости.
4. Для однополупериодной схемы выпрямителя с указанными параметрами (таблица 1) рассчитать емкость конденсатора фильтра C_{ϕ} . Номер варианта соответствует порядковому номеру студента в учебном журнале.

Таблица 1. Задания к лабораторному занятию

| № вар. | f Гц | $U_{\text{н}}$ В | $R_{\text{н}}$ Ом | $k_{\text{п}}$ % |
|-----------|---------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 1 | 50 | 5 | 250 | 10 |

| № вар. | f Гц | $U_{\text{н}}$ В | $R_{\text{н}}$ Ом | $k_{\text{п}}$ % |
|-----------|---------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 13 | 300 | 15 | 300 | 10 |

| | | | | |
|----|-----|----|-----|----|
| 2 | 50 | 10 | 300 | 20 |
| 3 | 50 | 12 | 200 | 15 |
| 4 | 60 | 15 | 400 | 10 |
| 5 | 60 | 24 | 300 | 20 |
| 6 | 60 | 27 | 500 | 15 |
| 7 | 100 | 5 | 250 | 10 |
| 8 | 100 | 10 | 300 | 20 |
| 9 | 100 | 12 | 200 | 15 |
| 10 | 200 | 15 | 400 | 20 |
| 11 | 200 | 24 | 300 | 15 |
| 12 | 200 | 27 | 500 | 10 |

| | | | | |
|----|-----|----|-----|----|
| 14 | 300 | 24 | 400 | 20 |
| 15 | 300 | 27 | 500 | 15 |
| 16 | 400 | 5 | 300 | 10 |
| 17 | 400 | 10 | 200 | 20 |
| 18 | 400 | 12 | 400 | 15 |
| 19 | 500 | 15 | 300 | 10 |
| 20 | 500 | 24 | 500 | 20 |
| 21 | 500 | 27 | 600 | 15 |
| 22 | 600 | 5 | 300 | 20 |
| 23 | 600 | 10 | 200 | 15 |
| 24 | 600 | 12 | 400 | 10 |

Программа исследований

Структурная схема источника питания представлена на рисунке 5. Понижающий трансформатор Тр (1) предназначен для снижения сетевого напряжения 220 В до приемлемого низкого напряжения (10...30 В). Выпрямительный блок (2) служит для преобразования синусоидального двухполярного напряжения в пульсирующий однополярный сигнал. Фильтр (3) сглаживает пульсации после выпрямителя. Как правило, в качестве фильтра служит конденсатор большой емкости. Стабилизатор (4) обеспечивает постоянство напряжения на нагрузке при колебаниях сетевого напряжения и тока потребления в нагрузке.

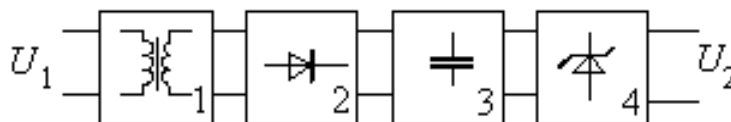


Рисунок 5 - Структурная схема блока питания

В работе исследуются простейшая однополупериодная схема источника питания (рисунок 6, а).

Исследование схем проводится методом моделирования с помощью программы **OrCAD 9.2**. С её помощью в схеме рассчитывается переходной процесс. По осциллограммам определяется посто-

янное напряжение на выходе выпрямителя $U_{\text{ВЫХ}}$, пульсации выходного напряжения $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ и рассчитывается коэффициент пульсаций $k_{\text{П}}$.

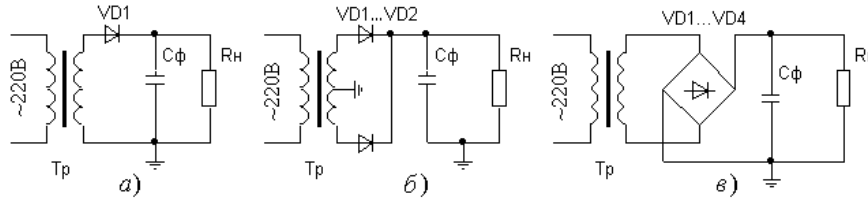


Рисунок 6 - Схема однополупериодного выпрямителя (а), двухполупериодного со средней точкой (б) и мостовая схема выпрямителя (в)

1. В среде Multisim(OrCAD) собрать схему выпрямителя без конденсатора (рисунок 7).

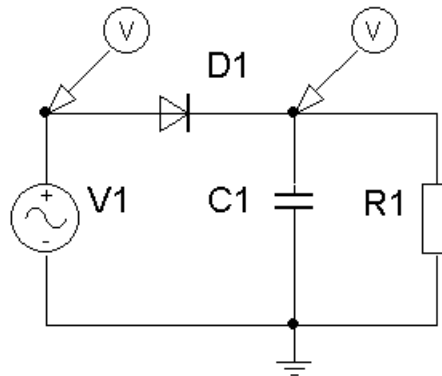


Рисунок 7 - Схема для моделирования однополупериодного выпрямителя.

- Разместить на рабочем поле все необходимые элементы. Для этого на панели компонентов выбрать и перенести на рабочее поле элементы, необходимые для построения схемы. В OrCAD трансформатор (источник напряжения на вторичной обмотке) моделируется с помощью источника синусоидального напряжения - V1 (VAC). В Multisim используется генератор сигналов в режиме синусоидального напряжения. Поскольку генератор сигналов является генератором со средней точкой, то при подключении используются только два его зажима (общий и положительный)

- Методом «захвати и тащи» скорректировать положение элементов. Для поворота элемента на 90° пользоваться меню, вызываемом после выделения элемента.
- Соединить элементы между собой в соответствии с принципиальной схемой.
- При исследовании в OrCAD выбрать режим исследования временных зависимостей. Задать интервал исследования 3-5 периодов входного напряжения. В Multisim достаточно подключить 2-х канальный осциллограф.
- Сохранить схему в рабочей папке D:\User\<Название группы>\<Название личной папки>. В OrCAD имя пути не должно включать символов кириллицы.
- Задать параметры входного сигнала (см. задание):

$$\text{Амплитуду напряжения} = U_{\text{н}} + 1,$$

$$\text{Частоту} = f.$$

Остальные параметры равны нулю.

2. На интервале 3...4 периодов получить осциллограммы входного напряжения и напряжения на нагрузке. Скопировать их в отчёт.
3. Подключить к нагрузке конденсатор фильтра, емкость которого определена при подготовке. Получить и сохранить осциллограмму напряжения на нагрузке. Определить среднее значение напряжения на нагрузке $U_{\text{н}}$, и пульсацию $\Delta U_{\text{н}}$. Рассчитать коэффициент пульсаций. Сравнить с расчетом. Данные свести в табл. 2.

- Для определения $\Delta U_{\text{н}}$ необходимо найти минимальное $U_{\text{н мин}}$ и максимальное $U_{\text{н макс}}$ напряжение на нагрузке в установившемся режиме.

- Среднее значение напряжения на нагрузке равно

$$U_{\text{н}} = (U_{\text{н мин}} + U_{\text{н макс}}) / 2.$$

- Амплитуда пульсаций выходного напряжения равна

$$\Delta U_{\text{м}} = (U_{\text{н макс}} - U_{\text{н мин}}) / 2.$$

Таблица 2

| $U_{\text{н}}, \text{В}$ | $\Delta U_{\text{м}}, \text{В}$ | $k_{\text{п}}, \%$ |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------|
|--------------------------|---------------------------------|--------------------|

| | | |
|--|--|--|
| | | |
|--|--|--|

Оценить погрешность расчёта ёмкости фильтра, сравнивая заданное и реальное значение величины пульсаций.

Контрольные вопросы

1. Какие физические явления определяют выпрямительные свойства диода?
2. Что «подсказывает» условное графическое обозначение диода?
3. Почему при применении ёмкостного фильтра выходное напряжение может превышать действующее значение входного напряжения?
4. Как влияет величина нагрузки на амплитуду пульсаций выпрямителя с ёмкостным фильтром?
5. Двухполупериодный и однополупериодный выпрямители имеют одинаковые параметры выходного напряжения при равных нагрузках. Какими различиями в номинальных значениях параметров комплектующих изделий это достигнуто?

Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

1. Титульный лист;
2. Оглавление;
3. Наименование работы, цель исследований;
4. Исследуемые схемы;
5. Расчёт номинального значения ёмкости фильтра;
6. Результаты экспериментов;
7. Расчёт параметров выпрямителя;
8. Ответы на контрольные вопросы;
9. Перечень литературы, использованной при подготовке и выполнении работы.

2 ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы

1. Формирование навыков проектирования электронных устройств в средах автоматизированного проектирования.
2. Изучение принципа работы и расчета простейшего параметрического стабилизатора напряжения.

Основные теоретические положения

Параметрический стабилизатор обеспечивает поддержание выходного напряжения за счет собственной нелинейности используемого полупроводникового элемента. В зависимости от места включения такого элемента все стабилизаторы подразделяются на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные.

Параметрический стабилизатор входит в состав как непрерывных, так и ключевых стабилизированных источников питания.

Стабилизаторы делятся на непрерывные и ключевые (импульсные или релейные) по способу управления. Стабилизаторы непрерывного типа используют активный режим работы биполярного или полевого транзистора, в то время как стабилизаторы импульсного или релейного типов – ключевой режим работы полупроводниковых приборов.

Основным параметром стабилизатора любого типа является коэффициент стабилизации по напряжению

$$K_{U_{cm}} = \frac{\delta U_{ВХ}}{\delta U_{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{ВХ} / U_{ВХ\text{ ном}}}{\Delta U_{ВЫХ} / U_{ВЫХ\text{ ном}}}, \quad (1)$$

где $\delta U_{ВХ}$, $\delta U_{ВЫХ}$ – коэффициенты нестабильности напряжения на входе и выходе стабилизатора.

Типовая схема параметрического стабилизатора напряжения, выполненного на стабилитроне, приведена на рисунке 1, а. Это па-

параллельная схема стабилизации. В данной схеме для поддержания выходного напряжения на требуемом уровне используется участок обратного электрического пробоя стабилитрона VD_1 . Поясним принцип работы схемы на рисунке 1, а с использованием ВАХ стабилитрона (рисунок 1, б).

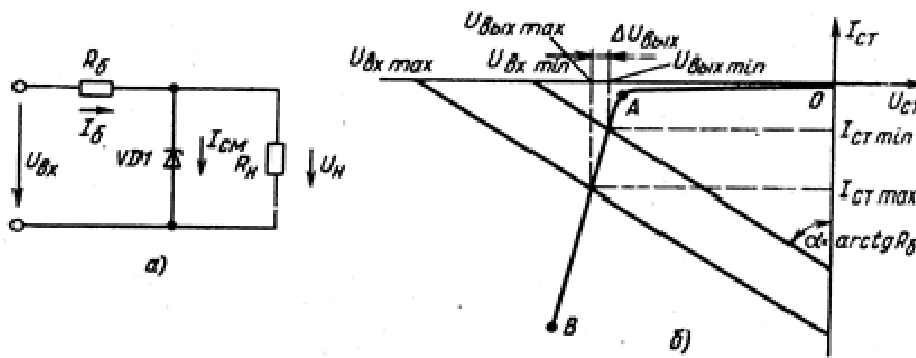


Рисунок 1 - Схема параметрического стабилизатора стабилитроне (а) и графическая интерпретация ее работы (б)

Предположим, что заданы выходное напряжение ($U_{\text{ВЫХ}}$), сопротивление нагрузки $R_{\text{Н}}$ и диапазон изменения входного напряжения $U_{\text{ВХ МАКС}}$ и $U_{\text{ВХ МИН}}$. Отложим на оси напряжений значения минимального и максимального напряжений и через эти точки проведем прямые, угол наклона которых определяется сопротивлением балластного резистора $R_{\text{б}}$. Точки пересечения характеристики стабилитрона с проведенными прямыми дадут значения соответствующих выходных напряжений устройства. При этом будем полагать, что $R_{\text{Н}} \gg R_{\text{б}}$ и $\Delta U_{\text{Н}} = \Delta U_{\text{СТ}}$. Очевидно, вследствие нелинейности ВАХ стабилитрона изменению $\Delta U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ МАКС}} - U_{\text{ВХ МИН}}$ будет соответствовать изменение выходного напряжения $\Delta U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ МАКС}} - U_{\text{ВЫХ МИН}}$, причем $\Delta U_{\text{ВЫХ}} \ll \Delta U_{\text{ВХ}}$.

Коэффициент стабилизации стабилизатора ориентировочно можно определить в предположении, что $\Delta U_{\text{ВХ}} \gg \Delta U_{\text{ВЫХ}} \approx 0$ и $R_{\text{Н}} = \text{const}$.

Тогда

$$\Delta I_{\text{ВХ}} \approx \Delta U_{\text{ВХ}} / R_{\text{б}} \quad \text{и} \quad \Delta U_{\text{ВЫХ}} \approx \Delta I_{\text{ВХ}} \cdot r_{\text{СТ}},$$

где $r_{ст}$ – дифференциальное сопротивление стабилитрона.

Откуда

$$\Delta U_{ВЫХ} / \Delta U_{ВХ} \approx r_{ст} / R_6.$$

Коэффициент стабилизации $K_{U_{ст}}$ такой схемы равен

$$K_{U_{ст}} = \mathcal{D}U_{ВХ} / \mathcal{D}U_{ВЫХ} = (\Delta U_{ВХ} / U_{ВХ}) / (\Delta U_{ВЫХ} / U_{ВЫХ}) \approx \frac{U_{ВЫХ} \cdot R_6}{U_{ВХ} \cdot r_{ст}}. \quad (2)$$

Расчет параметрического стабилизатора может быть выполнен из условия $I_{ст\ мин} < I_{ст} < I_{ст\ макс}$. Для двух наихудших сочетаний параметров эти условия могут быть записаны следующим образом:

$$(U_{ВХ\ мин} - U_{ВЫХ\ макс}) / R_6 > I_{ст\ мин} + I_{н\ макс},$$

$$(U_{ВХ\ макс} - U_{ВЫХ\ мин}) / R_6 < I_{ст\ макс} + I_{н\ мин}.$$

Приведенная методика приближённого расчёта оправдывает себя для маломощных параметрических стабилизаторов, т.к. параметрические стабилизаторы средней и большой мощности в настоящее время практически не используются.

Пример

Для параметрического стабилизатора напряжения рассчитать номинальное входное напряжение $U_{ВХ\ ном}$ и сопротивление балластного резистора R_6 при следующих условиях: выходное напряжение $U_{ВЫХ\ ном} = 5,6\text{В}$; максимальный ток нагрузки – 15 мА; нестабильность входного напряжения $\delta U_{ВХ} = 20\%$.

Решение

По заданному напряжению $U_{ВЫХ\ ном}$ выберем стабилитрон КС456А, имеющий рабочие параметры: $U_{ст\ ном} = 5,6\text{ В}$ ($I_{ст\ ном} = 10\text{ мА}$), $r_{ст} = 7\text{ Ом}$; и предельные параметры: $U_{ст\ мин} = 5,04\text{ В}$ ($I_{ст\ ном} = 10\text{ мА}$); $U_{ст\ макс} = 6,16\text{ В}$ ($I_{ст\ ном} = 10\text{ мА}$); $I_{ст\ мин} = 3\text{ мА}$; $I_{ст\ макс} = 167\text{ мА}$;

Из допустимого диапазона $I_{\text{ст мин}} \dots I_{\text{ст макс}}$ зададимся минимальным и максимальным рабочим током стабилизатора:

$$I_{\text{ст раб мин}} = 5 \text{ мА}, \quad I_{\text{ст раб макс}} = 50 \text{ мА}.$$

Найдем соответствующие этим токам возможные напряжения на выходе стабилизатора.

$$U_{\text{вых мин}} = U_{\text{ст ном}} - (I_{\text{ст ном}} - I_{\text{ст раб мин}}) \cdot r_{\text{ст}} = 5,565 \text{ В}$$

$$U_{\text{вых макс}} = U_{\text{ст ном}} + (I_{\text{ст раб макс}} - I_{\text{ст ном}}) \cdot r_{\text{ст}} = 5,88 \text{ В}$$

Значение номинального входного напряжения $U_{\text{вх ном}}$ и сопротивление резистора R_6 найдем из следующих соотношений:

$$\frac{(1 - \delta U_{\text{вх}}) \cdot U_{\text{вх ном}} - U_{\text{вых мин}}}{R_6} \geq I_{\text{н макс}} + I_{\text{ст раб мин}} = \frac{U_{\text{вых мин}}}{R_{\text{н мин}}} + I_{\text{ст раб мин}}$$

$$\frac{(1 + \delta U_{\text{вх}}) \cdot U_{\text{вх ном}} - U_{\text{вых макс}}}{R_6} < I_{\text{ст раб макс}}$$

Решение системы линейных уравнений дает: $R_6 = 168 \text{ Ом}$; $U_{\text{вх ном}} = 11,9 \text{ В}$. Принимаем стандартные значения: $R_6 = 160 \text{ Ом}$ и $U_{\text{вх ном}} = 12 \text{ В}$.

Минимальное и максимальное входные напряжения, соответственно равны:

$$U_{\text{вх мин}} = 0,8U_{\text{вх ном}} = 9,6 \text{ В}, \quad U_{\text{вх макс}} = 1,2U_{\text{вх ном}} = 14,4 \text{ В}$$

Сделаем проверку, лежат ли в рабочем диапазоне токи выбранного стабилизатора. Для этого определим токи $I_{\text{ст раб мин}}$ и $I_{\text{ст раб макс}}$.

$$I_{\text{ст раб мин}} = \frac{U_{\text{вх мин}} - U_{\text{вых мин}}}{R_6} - \frac{U_{\text{вых мин}}}{R_{\text{н мин}}} = 6,67 \text{ мА}$$

$$I_{\text{ст раб макс}} = \frac{U_{\text{вх макс}} - U_{\text{вых макс}}}{R_6} - \frac{U_{\text{вых макс}}}{R_{\text{н макс}}} = 53,25 \text{ мА}$$

Полученные значения лежат в допустимом диапазоне $I_{\text{ст мин}} \dots I_{\text{ст макс}}$.

Найдем коэффициент стабилизации по приближенной формуле:

$$K_{U_{CT}} = \frac{U_{ВЫХ} \cdot R_6}{U_{ВХ} \cdot r_{CT}} = \frac{5,6 \cdot 160}{12 \cdot 7} = 10,67$$

Расчет по определяющей формуле дает следующий результат:

$$K_{U_{cm}} = \frac{\delta U_{ВХ}}{\delta U_{ВЫХ}} = \frac{\delta U_{ВХ}}{(U_{ВЫХ \text{ МАКС}} - U_{ВЫХ \text{ МИН}})} = \frac{0,2}{5,88 - 5,565} = 7,11$$

$$2 \cdot U_{ВЫХ \text{ НОМ}} \quad 2 \cdot 5,6$$

Выходное сопротивление стабилизатора $R_{ВЫХ} = r_{CT} = 7$ Ом.

Подготовка к работе

Исследование параметрического стабилизатора (рисунок 2) проводится методом моделирования. В работе определяются основные параметры стабилизатора: коэффициент стабилизации K_{CT} и выходное сопротивление $R_{ВЫХ}$. С этой целью снимается ВАХ стабилитрона, проводится графический расчет схемы, снимаются переходные процессы при изменяющемся входном напряжении и передаточная характеристика схемы.

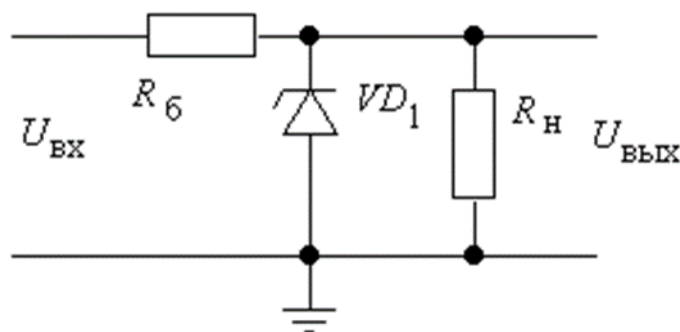


Рисунок 2 - Схема параметрического стабилизатора

При домашней подготовке к работе необходимо:

1. Изучить принцип действия параметрического стабилизатора.
2. Для схемы параметрического стабилизатора по данным, приведенным в табл. 1
 - выбрать тип стабилитрона,
 - рассчитать балластное сопротивление R_6 ,
 - определить номинальное входное напряжение $U_{ВХ \text{ НОМ}}$ и пределы его изменения ($U_{ВХ \text{ МИН}}$ и $U_{ВХ \text{ МАКС}}$),

- рассчитать нестабильность напряжения на выходе стабилизатора $\delta U_{\text{ВЫХ}}$,
- определить коэффициент стабилизации $k_{\text{СТ}}$,
- рассчитать выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}}$, при заданных:
- номинальном напряжении на выходе схемы $U_{\text{ВЫХ}}$,
- нестабильности входного напряжения $\delta U_{\text{ВХ}}$,
- минимальном сопротивлении нагрузки $R_{\text{Н МИН}}$.

Расчет пояснить графиком. Номер варианта соответствует порядковому номеру студента в учебном журнале.

Таблица 1. Варианты заданий.

| № | $U_{\text{ВЫХ}}$, В | $R_{\text{Н МИН}}$, кОм | $\delta U_{\text{ВХ}}$, % |
|----|----------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1 | 4,5 | 0,3 | 10 |
| 2 | 5,0 | 0,4 | 20 |
| 3 | 5,5 | 0,5 | 15 |
| 4 | 6,0 | 0,6 | 20 |
| 5 | 6,5 | 0,7 | 15 |
| 6 | 7,0 | 0,8 | 20 |
| 7 | 7,5 | 1,5 | 10 |
| 8 | 8,0 | 1,5 | 10 |
| 9 | 8,5 | 2,0 | 15 |
| 10 | 9,0 | 2,5 | 10 |
| 11 | 9,5 | 3,0 | 15 |
| 12 | 10,0 | 3,5 | 10 |

| № | $U_{\text{ВЫХ}}$, В | $R_{\text{Н МИН}}$, кОм | $\delta U_{\text{ВХ}}$, % |
|----|----------------------|--------------------------|----------------------------|
| 13 | 4,5 | 0,4 | 10 |
| 14 | 5,0 | 0,5 | 20 |
| 15 | 5,5 | 0,6 | 15 |
| 16 | 6,0 | 0,4 | 20 |
| 17 | 6,5 | 0,8 | 15 |
| 18 | 7,0 | 0,9 | 20 |
| 19 | 7,5 | 1,0 | 15 |
| 20 | 8,0 | 1,7 | 10 |
| 21 | 8,5 | 2,2 | 15 |
| 22 | 9,0 | 2,7 | 10 |
| 23 | 9,5 | 3,3 | 15 |
| 24 | 10,0 | 4,0 | 10 |

Программа исследований

Методика выполнения программы исследований в данной работе описана для среды OrCAD с целью демонстрации отличий от Multisim.

1. Запустить программу **CaptureCIS** программного пакета OrCAD 9.2. Выполнить команду «**File/New/Project**». В открывшемся диалоговом окне (рисунок 3) указывается тип проекта:

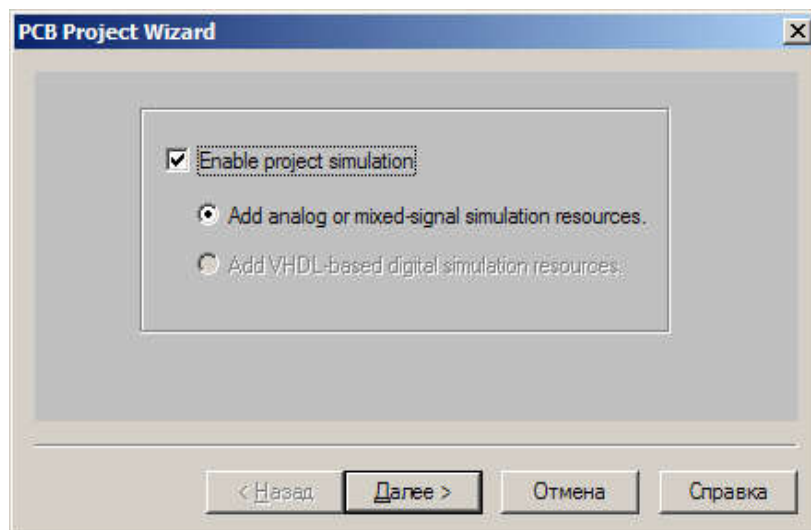



Рисунок 4 - Разрешение симуляции

3. С помощью встроенного графического редактора собрать схему параметрического стабилизатора, включив в нее источник неустойчивости входного напряжения (рисунок 7). Параметры элементов схемы должны соответствовать номинальному режиму. $IBV = \langle \text{номинальный рабочий ток через стабилизатор} \rangle$, $RS = \langle \text{объемное сопротивление стабилизатора} \rangle$.

Параметры стабилизатора можно взять из справочника (см. приложение). После ввода параметров необходимо корректно (ОК) выйти из режима редактирования.

- Задать тип источника сигнала **VSTIM** и установить его параметры **EditPspiceStimulus**. Выбрать синусоидальное напряжение. В качестве параметров следует выбрать смещение равное номинальному значению входного напряжения **Uвх. ном.** и синусоидальное напряжение частотой 100 Гц и амплитудой $Um = \delta U_{вх} / 200\% \times U_{вх}$
- Для вывода осциллограмм подключить маркер напряжения  к источнику входного напряжения и к выходу схемы.
- Вначале следует расположить элементы на рабочем поле в соответствии с принципиальной схемой рисунок 7, не соединяя их. Элементы, с которым надо что-то сделать, выделяют щелчком главной кнопки мыши. Отмеченный элемент можно повернуть, удалить или переместить (меню действий вы-

зывается вспомогательной кнопкой мыши). Для перемещения компонентов используется технология «ЗАХВАТИ И ТАЩИ».

- Соединить элементы на рабочем поле в соответствии с принципиальной схемой. Для этого выбирается инструмент «Проводник». Подвести курсор к выводу одного из элементов и щелкнуть главной кнопкой мыши. Подвести курсор к другой точке схемы и снова щелкнуть.
- Любой параметр компонента может быть изменён после щелчка на нём главной кнопкой мыши.
- Сохранить схему в ранее выбранной рабочей папке.

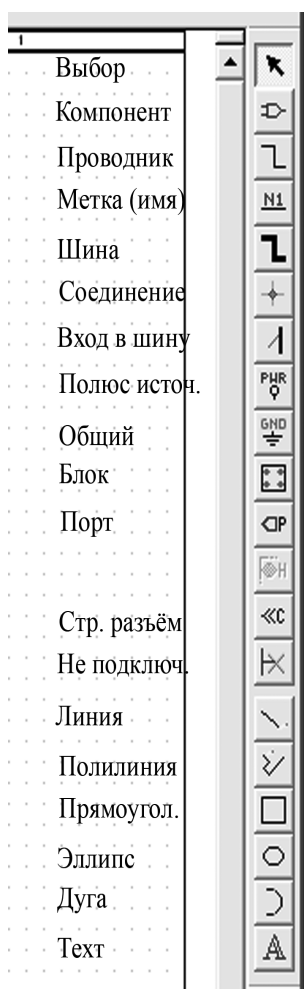


Рисунок 5 - Панель инструментов

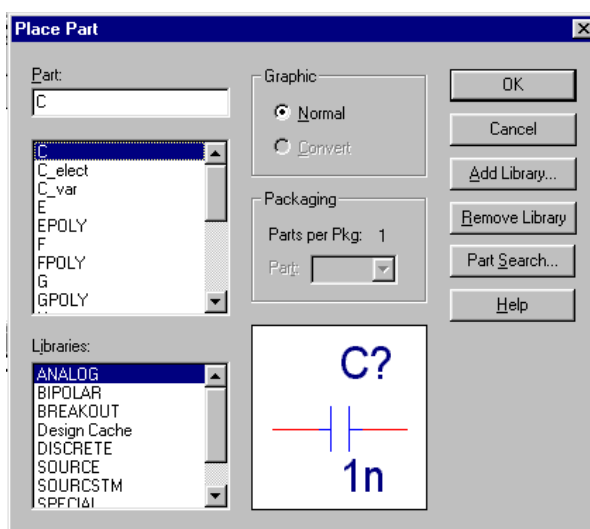


Рисунок 6 - Окно компонент

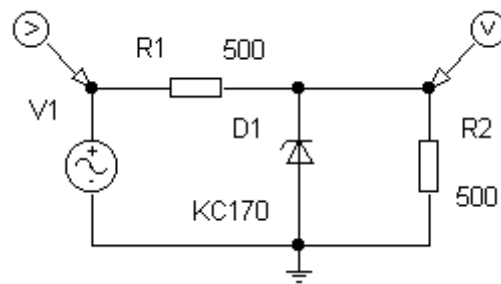


Рисунок 7 - Рабочая схема для исследования работы параметрического стабилизатора

- Для стабилитрона необходимо указать параметры модели. Для этого необходимо щелкнуть стабилитрон один раз (он окрасится).

Для изменения параметров модели необходимо войти в интерфейсный диалог **EditPspiceModel**. В окне параметров модели установить курсор на выделенный параметр: **BV**=<напряжение стабилизации стабилитрона>.

4. Задать установки симуляции в соответствии с рисунком 8. На интервале 2...4 периодов рассчитать переходной процесс и получить осциллограммы входного напряжения $u_1(t)$ и напряжения на нагрузке $u_2(t)$. Определить пределы изменения выходного напряжения ($U_{\text{ВЫХ МИН}}$ и $U_{\text{ВЫХ МАКС}}$) и рассчитать неустойчивость на выходе $\delta U_{\text{ВЫХ}}$ и коэффициент стабилизации $k_{\text{ст}}$. Результаты занести в таблицу 2.

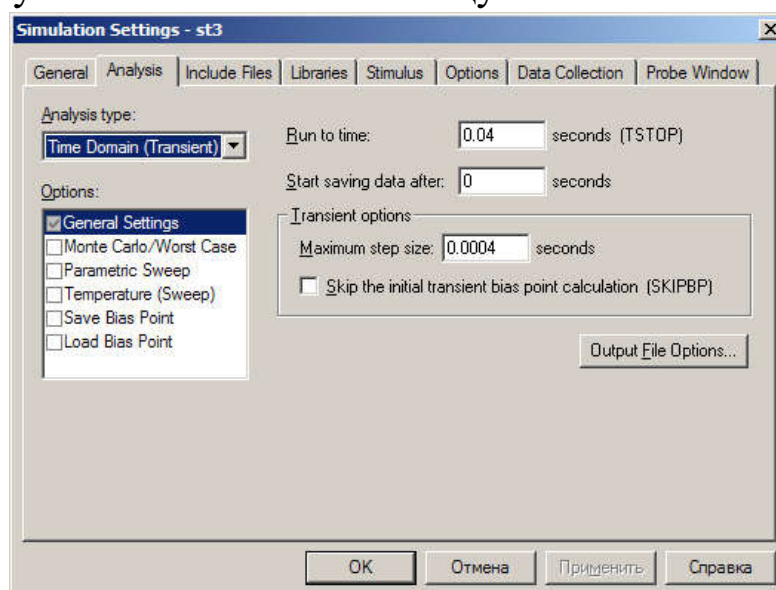


Рисунок 8– Установка режима симуляции во временной области

5. Снять передаточную характеристику $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$. С ее помощью определить изменение выходного напряжения ($U_{\text{ВЫХ МИН}}$ и $U_{\text{ВЫХ МАКС}}$) в заданных границах входного ($U_{\text{ВХМИН}} \dots U_{\text{ВХМАКС}}$), коэффициент пульсаций на выходе $k_{\text{П2}}$, коэффициент стабилизации $k_{\text{СТ}}$. Результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

| Параметр | $U_{\text{ВЫХ}}$ мин, В | $U_{\text{ВЫХ}}$ макс, В | $\delta U_{\text{ВЫ}}$ х, % | $k_{\text{СТ}}$, % |
|----------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Расчет | | | | |
| п. 2 | | | | |
| п. 3 | | | | |

1. Для построения передаточной характеристики $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ необходимо установить режим **SweepDC** в соответствии с рисунком 4.7 (вместо **EndValue** 10 указать максимальное значение входного напряжения). Маркер напряжения оставить только на выходе схемы.

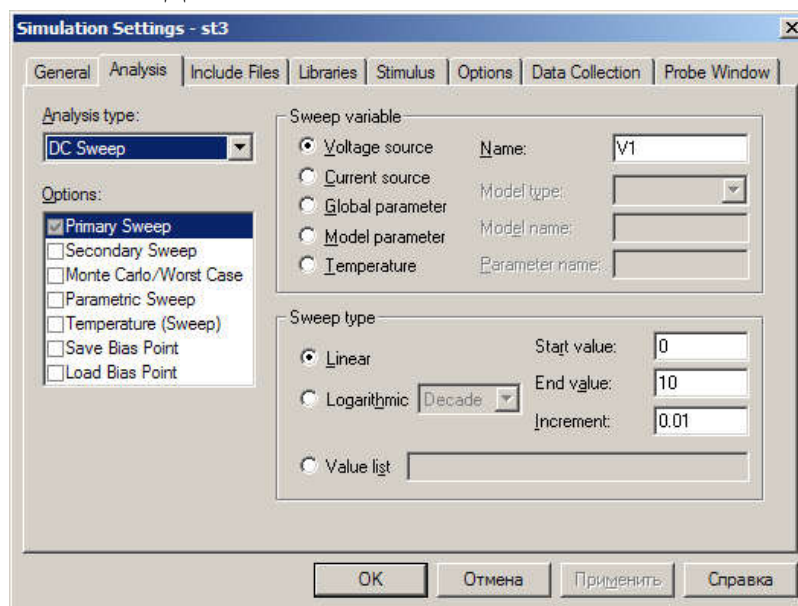


Рисунок 4.7 - Установки для построения передаточной характеристики

Провести расчет схемы, нажав на клавишу **F11** или кнопку «ПУСК» мышкой, и получить характеристику $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$. С помощью электронных курсоров определить $U_{\text{ВЫХ МИН}}$ и $U_{\text{ВЫХ МАКС}}$, соответствующие $U_{\text{ВХ МИН}}$ и $U_{\text{ВХ МАКС}}$. По этим данным определить требуемые параметры.

Контрольные вопросы

1. Какие физические эффекты используются в исследованном параметрическом стабилизаторе для стабилизации напряжения?
2. Чем отличаются такие параметры как нестабильность напряжения и коэффициент пульсаций напряжения?
3. Можно ли определить коэффициент пульсаций выходного напряжения через коэффициент пульсаций входного напряжения и коэффициент стабилизации?
4. Какова основная причина пульсаций напряжения на входе параметрического стабилизатора? Какова, по вашему мнению, частота этих пульсаций?

Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

1. титульный лист;
2. содержание;
3. наименование работы и цель исследований;
4. схему исследования;
5. результаты расчётов;
6. результаты по п.4-п.5 программы исследований;
7. сравнительный анализ результатов таблицы 2 и обсуждение полученных диаграмм;
8. ответы на контрольные вопросы;
9. перечень источников, использованных при выполнении работы.

3 ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы

1. Формирование навыков проектирования электронных устройств в среде OrCAD.
2. Изучение вольтамперных характеристик и параметров биполярных транзисторов.

Основные теоретические сведения

В 1948 году Д. Бардин и В. Брайтен обнаружили, что полупроводниковые устройства с двумя $p-n$ переходами способны создавать усиление электрических колебаний по мощности. Они назвали это устройство транзистором (от английских слов “transfer” – преобразователь и “resistor” – сопротивление).

В настоящее время промышленность выпускает плоскостные транзисторы, представляющие собой монокристалл полупроводника, в котором две области с проводимостью одного типа разделены областью с проводимостью противоположного типа. Таким образом, могут быть получены структуры $p-n-p$ и $n-p-n$ типа (рисунок 1). Между областями с разными типами проводимости образуются $p-n$ переходы. $P-n$ переход, образующийся между эмиттером и базой, называется эмиттерным переходом (ЭП); переход, образующийся между базой и коллектором, называют коллекторным переходом (КП).

Дырки (в $p-n-p$ транзисторе), создающие эмиттерный ток, из области эмиттера попадают в очень узкую (10-50 мкм) n -область базы, откуда большая их часть (95-99%) проходит в p -область к коллектору, образуя коллекторный ток I_k . Остальные дырки образуют ток базы I_b . Для суммы всех токов с учетом их направлений (рисунок 2, а) справедливо равенство $I_b + I_b + I_k = 0$. Следует помнить, что ток, направленный к транзистору, считается положительным,

от транзистора – отрицательным, причем направление тока определяется направлением движения положительных зарядов. Транзистор, выполняя те же функции, что и электронная лампа – триод, обладает целым рядом преимуществ: отсутствием цепи накала, более высоким КПД, малыми размерами, весом и др.

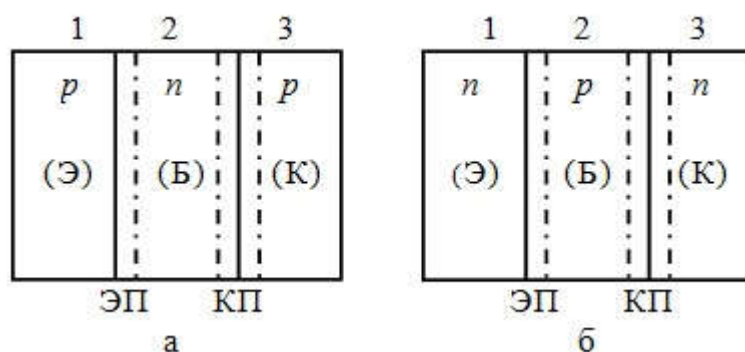


Рисунок 1 - Транзисторы $p-n-p$ (а) и $n-p-n$ (б) типа. Каждая область имеет свое название: область 1 – эмиттер (Э), область 2 – база (Б), область 3 – коллектор (К)

Физические основы работы транзисторов

Рассмотрим физические основы работы так называемых биполярных транзисторов, т. е. таких, в которых ток обусловлен движением как основных, так и неосновных носителей заряда. Будем рассматривать транзистор $p-n-p$ типа, в работе которого основную роль играют дырки. Физические основы $n-p-n$ транзистора аналогичны основам работы $p-n-p$ транзистора, но в нем основную роль играют электроны.

На рисунке 2 изображен биполярный транзистор, включенный по схеме с общей базой (рисунок 2, а) и его условное обозначение (рисунок 2, б). Левый $p-n$ переход включен в прямом направлении. При этом через него течет большой ток основных носителей – дырок. Левая p -область инжектирует дырки в соседнюю n -область. Эта p -область, играющая роль катода в ламповом триоде, называется эмиттером. Попавшие в n -область, называемую базой, дырки с помощью диффузионного механизма перемещаются к

правому p - n переходу, включенному в обратном направлении. Часть дырок в базе рекомбинирует с электронами. Оставшаяся часть достигает правого p - n перехода. Так как дырки в n -области являются неосновными носителями, а правый p - n переход включен в обратном направлении, то под действием ускоряющего поля правого p - n перехода дырки втягиваются в p -область.

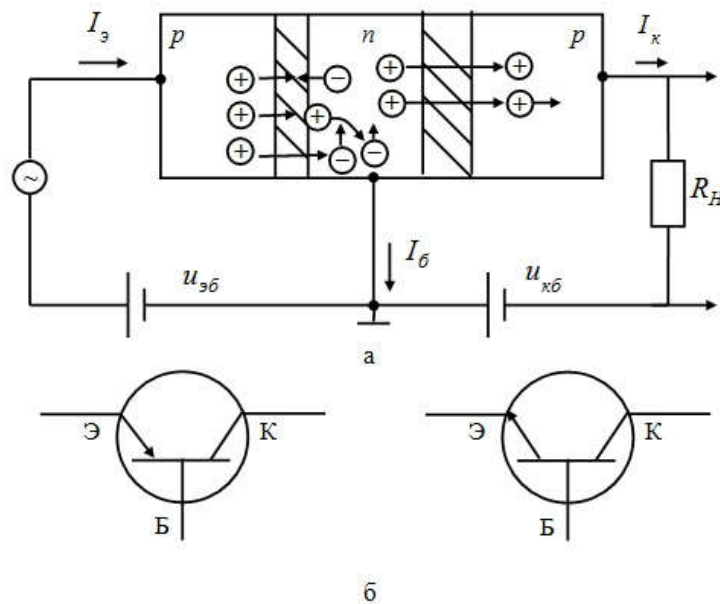


Рисунок 2 - Биполярный транзистор: а – схема включения с общей базой; б – условное обозначение транзистора, p - n - p типа (слева) и n - p - n типа (справа)

Эта p -область, собирающая дырки, называется коллектором. База и коллектор играют соответственно роль сетки и анода в ламповом триоде.

Усилительные свойства транзистора возникают в результате взаимосвязи токов эмиттера и коллектора. Определим условия, при которых эти взаимодействия имеют место. Предположим, что толщина материала базы велика по сравнению с диффузионной длиной.

При этом помним, что носитель заряда в полупроводнике от момента рождения до момента рекомбинации проходит в среднем определенное расстояние, называемое диффузионной длиной. Это означает, что дырка, инжектированная в базу, не доберется до кол-

лектора из-за того, что она рекомбинирует в пути. Таким образом, ток эмиттера не достигнет коллекторного $p-n$ перехода и ни о какой взаимосвязи тока эмиттера и коллектора не может быть и речи.

Для того чтобы такое взаимодействие имело место, нужно свести к минимуму рекомбинацию носителей в базе. Это может быть достигнуто в основном двумя путями:

- 1) толщина базы делается очень малой ($\sim 10^{-6}$ м), меньше, чем диффузионная длина носителей;
- 2) степень легирования материала базы делается малой (меньше степени легирования областей эмиттера и коллектора). В результате рекомбинация сводится к минимуму и ток эмиттера почти без потерь достигает коллектора. Таким образом,

$$I_{\text{Э}} \approx I_{\text{К}}. \quad (1)$$

Приближенное равенство (1) позволяет объяснить работу транзистора как усилителя.

Коэффициент усиления определяется формулой

$$K_A = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}}, \quad (2)$$

где буквой A обозначен какой-либо из параметров выходного и входного сигналов: ток (I), напряжение (U), мощность (P).

Очевидно, коэффициент усиления по току в схеме с общей базой $\alpha = K_I < 1$ из-за неизбежной, хотя и малой рекомбинации в базе. Обычно α лежит в пределах $0,9 \dots 0,995$. Другая ситуация имеет место с напряжением. Так как эмиттерный переход включен в прямом направлении, его дифференциальное сопротивление $r_{\text{Э}}$ мало. Дифференциальное сопротивление коллекторного перехода $r_{\text{К}}$ очень велико (он включен в обратном направлении). Так как $I_{\text{Э}} \approx I_{\text{К}}$, то небольшое входное напряжение преобразуется в значительное выходное. Энергия для такого преобразования отбирается у источни-

ков питания, а сам транзистор выступает в качестве активного элемента (преобразователя).

Поскольку $U_{ВЫХ} = I_K \cdot R_H$ (R_H – сопротивление нагрузки), а $U_{ВХ} = I_{\mathcal{E}} \cdot r_{\mathcal{E}}$, то при сопротивлении нагрузки существенно меньшем r_K :

$$K_U \approx \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{I_K \cdot R_H}{I_{\mathcal{E}} \cdot r_{\mathcal{E}}} = \frac{R_H}{r_{\mathcal{E}}} \gg 1 \quad (3)$$

В этой схеме коэффициент усиления мощности также много больше единицы

$$K_P \approx \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}} = \frac{I_K^2 \cdot R_H}{I_{\mathcal{E}}^2 \cdot r_{\mathcal{E}}} = \frac{I_K \cdot R_H}{I_{\mathcal{E}} \cdot r_{\mathcal{E}}} \cdot \frac{I_K}{I_{\mathcal{E}}} = \alpha \cdot K_U \quad (4)$$

Следует отметить, что кроме рассмотренной схемы включения с общей базой, существуют и другие схемы включения (рисунок 3).

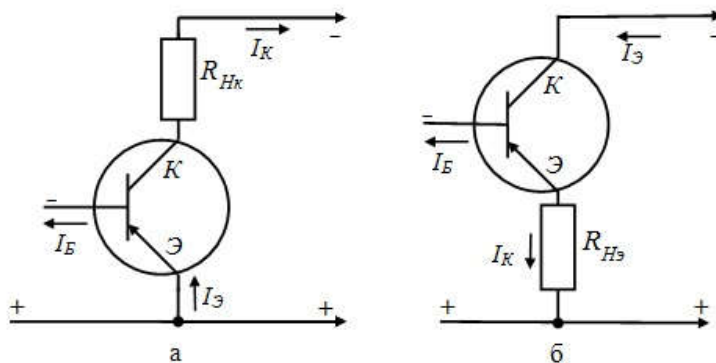


Рисунок 3 - Включения *p-n-p* транзистора по схеме с общим эмиттером (а) и общим коллектором (б)

В схеме с общим эмиттером (рисунок 3, а) входной сигнал подается между эмиттером и базой, а снимается с резистора, подключенного к выходам эмиттера и коллектора. Входным током является ток базы. Последнее вызывает инжекцию носителей из эмиттера и большой коллекторный ток $I_{\mathcal{E}} \approx I_K$. Это обстоятельство

объясняет механизм усиления тока по схеме с общим эмиттером. При этом

$$\beta = K_I \approx \frac{I_K}{I_B} = -\frac{I_K}{I_{\text{Э}} - I_K} = \frac{1}{\left(\frac{I_{\text{Э}}}{I_K}\right) - 1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha}\right) - 1} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (5)$$

Учитывая, что α лежит в пределах $0,9 \dots 0,995$ получим $\beta \approx 10 - 200$. В таблице 1 приведены параметры транзисторов для различных схем включения.

Таблица 1. Параметры маломощных транзисторов в различных схемах включения

| Схема | Коэффициент усиления | | | Сопротивление | |
|---------------------|----------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| | по току | по напряжению | по мощности | входное | выходное |
| С общей базой | 1 | 10^3 | 10^3 | Десятки Ом | Сотни кОм |
| С общим эмиттером | $10 \dots 10^2$ | 10^2 | 10^3 | Единицы кОм | Десятки кОм |
| С общим коллектором | $10 \dots 10^2$ | 1 | 10^2 | Десятки кОм | Сотни Ом |

Работа транзисторов по любой схеме рассчитывается исходя из параметров, связывающих его входные $i_{вх}$, $u_{вх}$ и выходные токи и напряжения $i_{вых}$, $u_{вых}$.

Для анализа работы биполярных транзисторов наиболее удобными являются так называемые h -параметры. При таком способе описания транзистора в качестве независимых переменных принимаются $u_{БЭ}$ – напряжение база-эмиттер и i_K – ток коллектора (ток коллектор-эмиттер). В линейном режиме эти величины связа-

ны с током база-эмиттер (i_b) и с напряжением коллектор-эмиттер ($u_{кэ}$) линейной зависимостью

$$\begin{cases} \Delta u_1 = h_{11} \cdot \Delta i_1 + h_{12} \cdot \Delta u_2 \\ \Delta i_2 = h_{21} \cdot \Delta i_1 + h_{22} \cdot \Delta u_2 \end{cases} \quad (6)$$

В формулах (6) малыми буквами u и i обозначены напряжение и ток выходного и входного сигнала. Кроме них на электроды транзистора подают постоянное напряжение, задающее режим его работы. Эти постоянные напряжения и соответствующие им токи в систему (6) в явном виде не входят, ими определяются численные значения h -параметров.

Из уравнения (6) виден физический смысл h -параметров:

$$h_{11э} = \left(\frac{\partial u_1}{\partial i_1} \right)_{u_2 = const} ; \quad h_{12э} = \left(\frac{\partial u_1}{\partial u_2} \right)_{i_1 = const} ; \quad (7)$$

$$h_{21э} = \beta = \left(\frac{\partial i_2}{\partial i_1} \right)_{u_2 = const} ; \quad h_{22э} = \left(\frac{\partial i_2}{\partial u_2} \right)_{i_1 = const} .$$

Параметр $h_{11э}$ имеет размерность сопротивления (Ом) и является дифференциальным входным сопротивлением. Параметр $h_{12э}$ показывает, как изменение напряжения на выходе сказывается на входном напряжении при $i_b = const$. Этот параметр называется «коэффициент обратной связи по напряжению». Параметр β называется «коэффициент передачи тока базы» и по своему смыслу является коэффициентом усиления тока **при коротком замыкании выхода** по переменной составляющей. Параметр $h_{22э}$ с размерностью (Ом⁻¹) имеет смысл дифференциальной проводимости коллекторного выхода.

Перечисленные h -параметры являются «внешними параметрами транзистора». Они зависят от режима работы транзистора и от схемы его включения. Зная эти внешние параметры транзистора, можно вычислить «внутренние параметры транзистора»: $r_{э}$ – сопротивление p - n перехода эмиттер-база (переход включен в прямом направлении); r_b – сопротивление базовой области транзисто-

ра; r_k – сопротивление p - n перехода коллектор-база (переход включен в обратном направлении).

Графически проиллюстрировать работу каскада с ОЭ можно, используя входные и выходные статические характеристики биполярного транзистора. Статические характеристики транзистора могут задаваться соответствующими аналитическим выражениями, а могут быть представлены графически. Поскольку функции двух переменных графически представляются поверхностью, то при изображении на плоскости их представляют в параметрической форме (изолиниями, полученными при фиксации одного из аргументов - параметра). Несколько характеристик одного типа, полученные при различных значениях параметра и образуют семейство характеристик. Семейства входных и выходных характеристик транзистора считаются основными и приводятся в справочниках (рисунок 4). С их помощью легко могут быть получены два других семейства характеристик. В различных схемах включения транзистора в качестве входных и выходных токов и напряжений выступают токи, протекающие в цепях различных электродов, и напряжения, приложенные между различными электродами. Поэтому конкретный вид статических характеристик зависит от схемы включения транзистора.

В схеме с ОЭ входным током является ток базы I_b , а выходным – ток коллектора, соответственно, входным напряжением является напряжение $U_{бэ}$, а выходным – напряжение $U_{кэ}$.

Для снятия статических характеристик БТ в **PSpice** используется **DC Sweep** анализ – многовариантный анализ по постоянному току. DC – direct current – постоянный ток.

DC Sweep анализ позволяет получать характеристики схемы (токи, напряжения, мощности) при изменении параметров источников напряжения, источников тока, глобальных параметров схемы, параметров модели и температуры элемента. При анализе задаются интервалы изменения перечисленных параметров, характер и шаг их измерения. Возможно также табличное задание изменения пере-

численных параметров. Существует возможность одновременного изменения двух параметров.

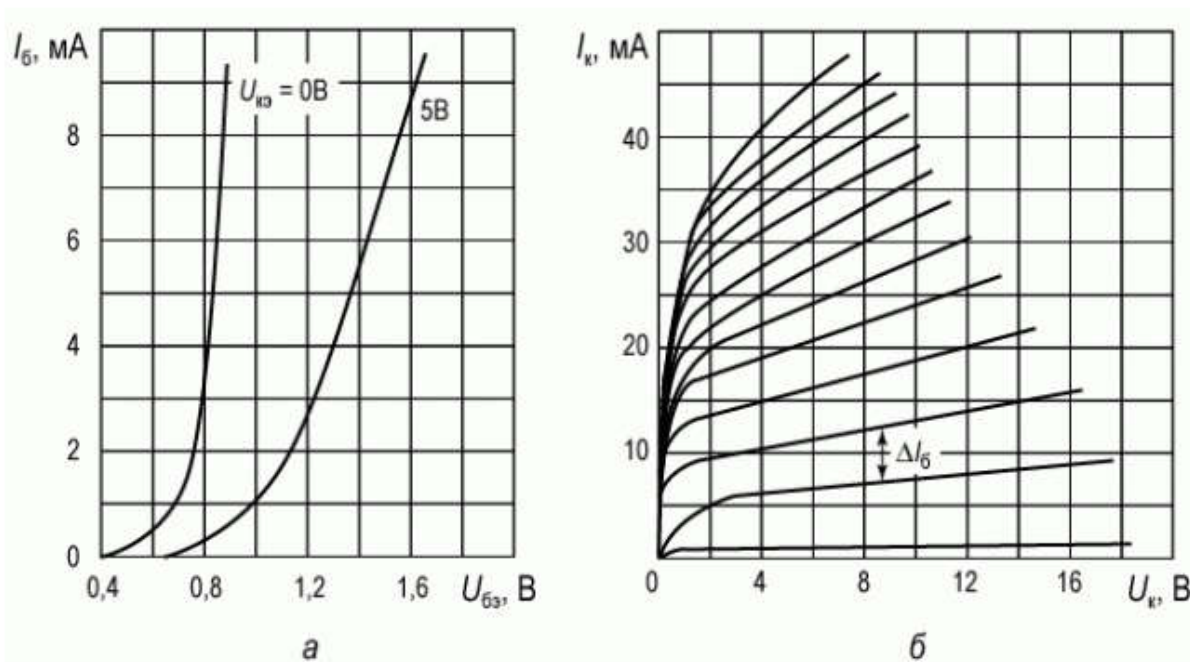


Рисунок 4 - Вольтамперные характеристики биполярного транзистора КТ215В, включенного по схеме с общим эмиттером: а) входные характеристики; б) выходные характеристики

Подготовка к работе

1. Изучить принцип работы биполярного транзистора, его схемы включения и режимы работы.
2. Изучить входные и выходные характеристики и параметры биполярного транзистора.
3. В таблице 2 в соответствии с порядковым номером студента в учебном журнале выбрать биполярный транзистор для исследования его характеристик и определения параметров. Режим измерения выбирается исходя из номера группы (значение тока коллектора ($i_{\text{к0}}$)) и номера подгруппы (значение напряжения на коллекторном переходе ($u_{\text{кэ0}}$)).

Таблица 2. Варианты заданий

| № | Модель | Режим измерения |
|---|--------|-----------------|
|---|--------|-----------------|

| вар. | транзистора | 1 | 2 | 1 | 2 |
|------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | $i_{к0}$, мА | $i_{к0}$, мА | $u_{кэ0}$, В | $u_{кэ0}$, В |
| 1 | MM3906 | 20 | 40 | 10 | 15 |
| 2 | MM4001 | 20 | 40 | 10 | 15 |
| 3 | PN2906 | 20 | 40 | 10 | 15 |
| 4 | PN2907 | 20 | 40 | 10 | 15 |
| 5 | Q2N1132 | 20 | 40 | 10 | 15 |
| 6 | Q2N1420 | 20 | 40 | 10 | 15 |
| 7 | Q2N4248 | 20 | 40 | 10 | 15 |
| 8 | DH3467CD | 20 | 40 | 10 | 15 |
| 9 | DH3467CN | 20 | 40 | 10 | 15 |
| 10 | DH3468CN | 20 | 40 | 10 | 15 |
| 11 | MPS2907 | 20 | 40 | 10 | 15 |
| 12 | MM4258 | 20 | 40 | 10 | 15 |

Программа исследований

1. Собрать схему исследования биполярного транзистора с ОЭ в OrCAD(рисунок 5)или Multisim (рисунок 6). В последнем случае используется LabViewInstrument – BJTAnalyzer.

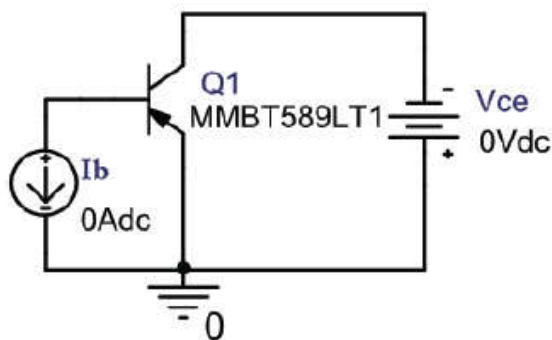


Рисунок 5 - Схема для снятия выходных характеристик БТ с ОЭ в OrCAD

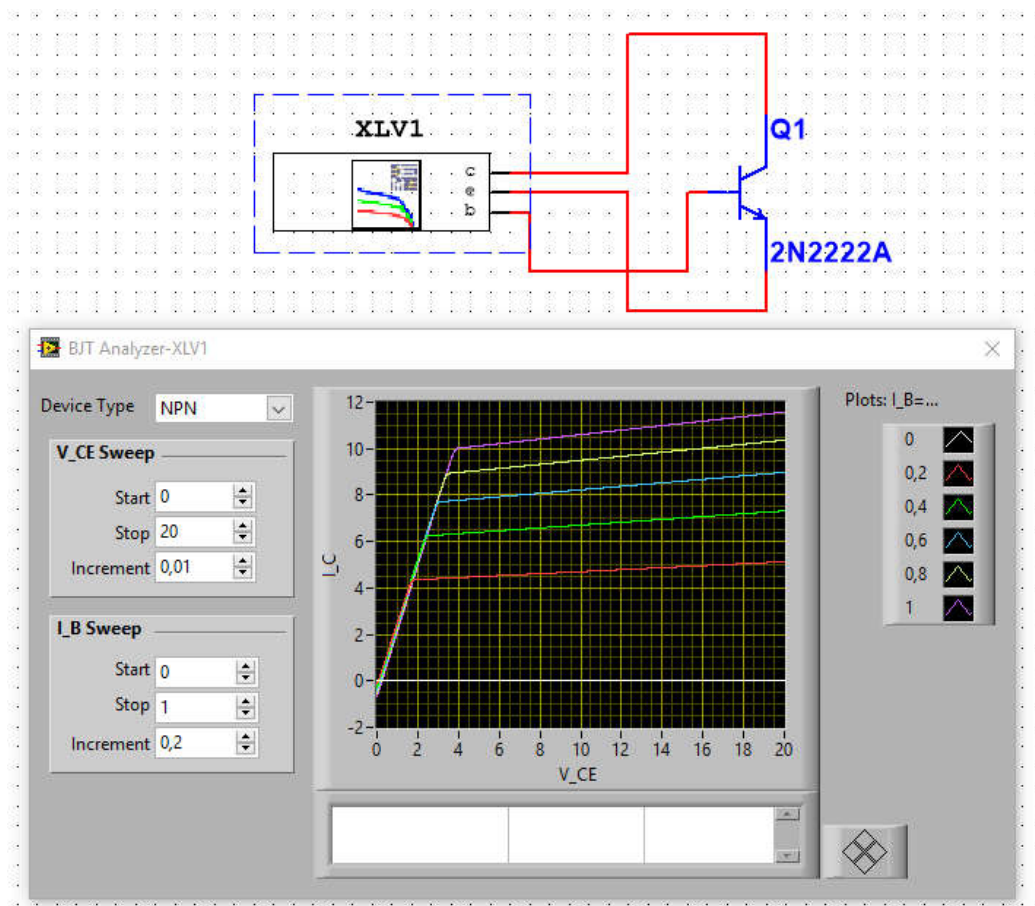


Рисунок 6 – Схема для снятия выходных характеристик БТ с ОЭ в Multisim

2. Получить семейство выходных ВАХ биполярного транзистора в схеме с ОЭ. В OrCAD следует:

- Выбрать тип анализа **DC Sweep**.
- В **Options** выбрать **Primary Sweep** и задать параметры основной переменной.

В качестве основной переменной (**Primary Sweep**) выбираем напряжение источника V_{ce} , начальное значение (**Start Value**) можно задать равным нулю. Конечное значение (**End Value**) задать равным $U_{кэмах}$ – максимально допустимому напряжению коллектор-эмиттер для данного транзистора (справочный параметр, указан в технической документации на транзистор в разделе Maximum Ratings, параметр –Collector-EmitterVoltage), шаг (**Increment**) – 10 мВ. Пример показан на рисунке 4.2.

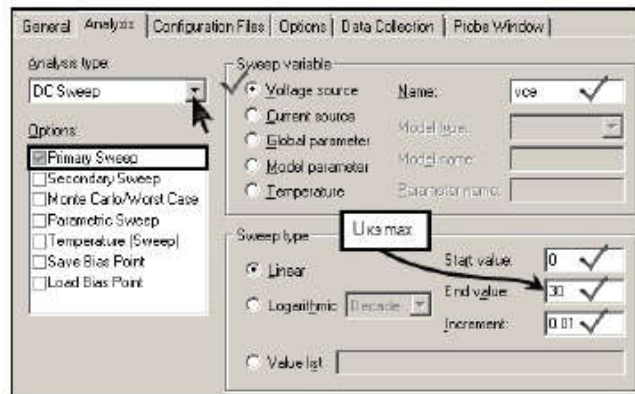


Рисунок 4.2 - Настройка параметров Primary Sweep. Выходные характеристики

В **Options** выбрать **Parametric Sweep** и задать параметры второстепенной переменной.

В качестве второстепенной или параметрической переменной (**Parametric Sweep**) выбираем ток источника **I_b**, начальное значение (**Start Value**) задать равным нулю. Конечное значение (**End Value**) задать равным 1 мА, шаг (**Increment**) – 100 мкА. Пример показан на рисунок 7.

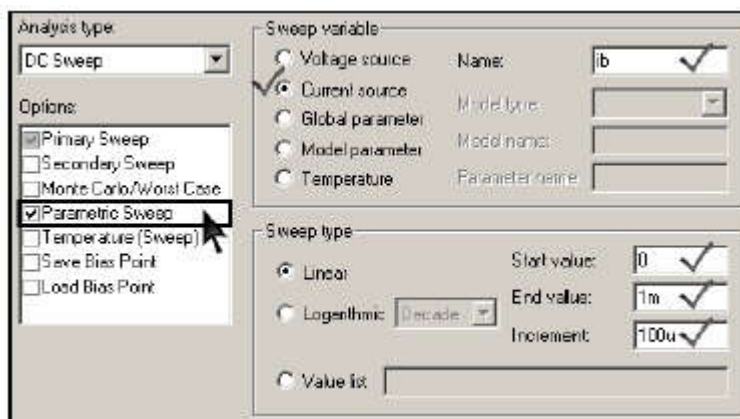


Рисунок 7 - Настройка параметров Parametric Sweep. Выходные характеристики

– Построить графики выходных характеристик транзистора. Открыть окно Add Traces. В строку Trace Expression ввести выражение $IC(Q1)$ – ток коллектора транзистора. Если полученный ток отрицательный, для удобства дальнейшей работы, изменить знак перед выражением.

- Отмасштабировать оси, так чтобы граничные отображаемые значения соответствовали $U_{кэмах}$ и $I_{кмах}$ (справочные параметры, указанные в технической документации на транзистор).
- Поместить графики выходных характеристик в отчете.

3. Зафиксировать с помощью режима трассировки параметры рабочей точки $I_{к0}$, $U_{кэ0}$, $I_{б0}$.

Рабочая точка выбирается в соответствии с лабораторным заданием.

- Включить режим трассировки. Команда **Trace>Cursor>Display** или щелчок соответствующего значка панели инструментов. После вызова курсора появляется новое окно (**Probe Cursor**) с текущими координатами положения двух курсоров обозначенных A1 и A2.
 - Выбрать трассируемый график и поместить на него курсор. Для выбора или смены трассируемого графика нужно щелкнуть мышкой по соответствующему символу графика в строке легенды, при этом щелчок левой кнопкой мыши закрепляет за графиком курсор A1, а щелчок правой – курсор A2. Переместить курсор с графика на график можно, используя сочетания клавиш **Ctrl+←** или **Ctrl+→** (курсор A1) и **Ctrl+Shift+←** или **Ctrl+Shift+→** (курсор A2).
 - Навести курсор на рабочую точку, и поставить метку с координатами (параметры рабочей точки – $U_{кэ0}$ и $I_{к0}$), команда **Plot>Label>Mark** или щелчок соответствующей пиктограммы панели инструментов. Зафиксировать в заготовке отчета значения $U_{кэ0}$ и $I_{к0}$. Для определения тока базы ($I_{б0}$) щелкнуть правой кнопкой мыши на выходную характеристику соответствующую выбранной рабочей точки, щелкнуть пункт Information (рисунок 4.4).
4. Определить параметры $h_{11э}$ и $h_{12э}$.
- С помощью курсоров и показаний окна Probe Cursor определить и зафиксировать в заготовке отчета необходимые данные для

нахождения h -параметров транзистора ($h_{21э}$ и $h_{22э}$) в окрестности рабочей точки.

- Пример работы по определению приращений для нахождения выходных h -параметров транзистора показан на рисунок 8.

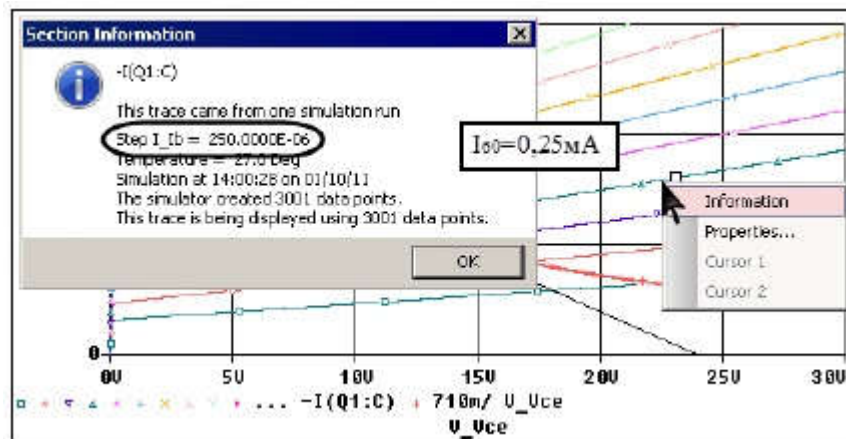
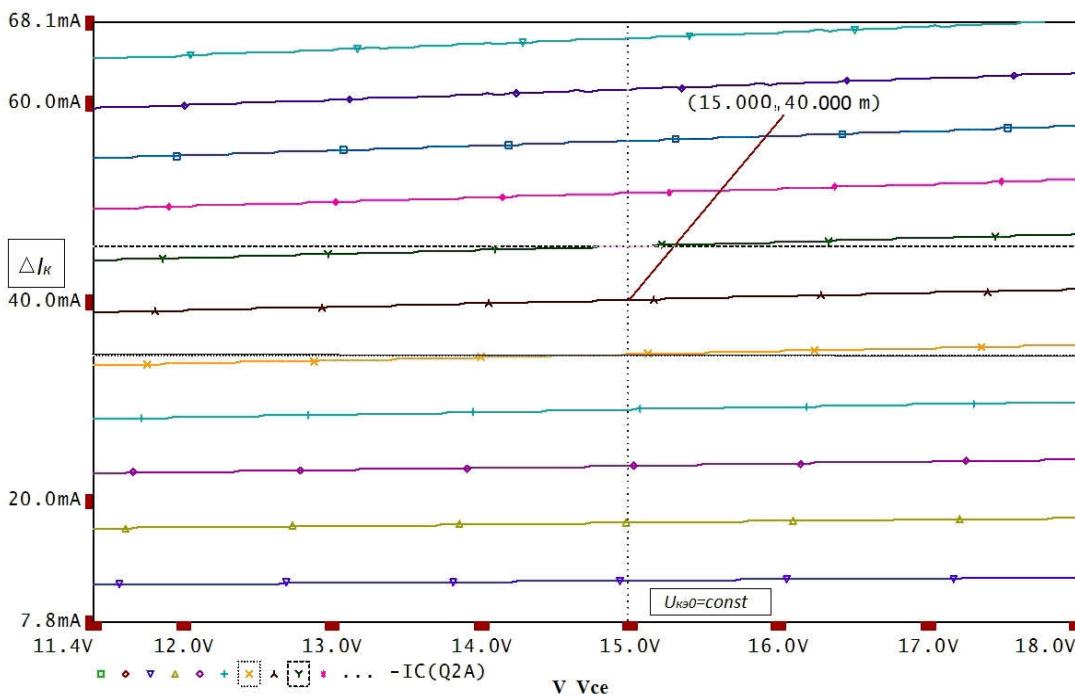
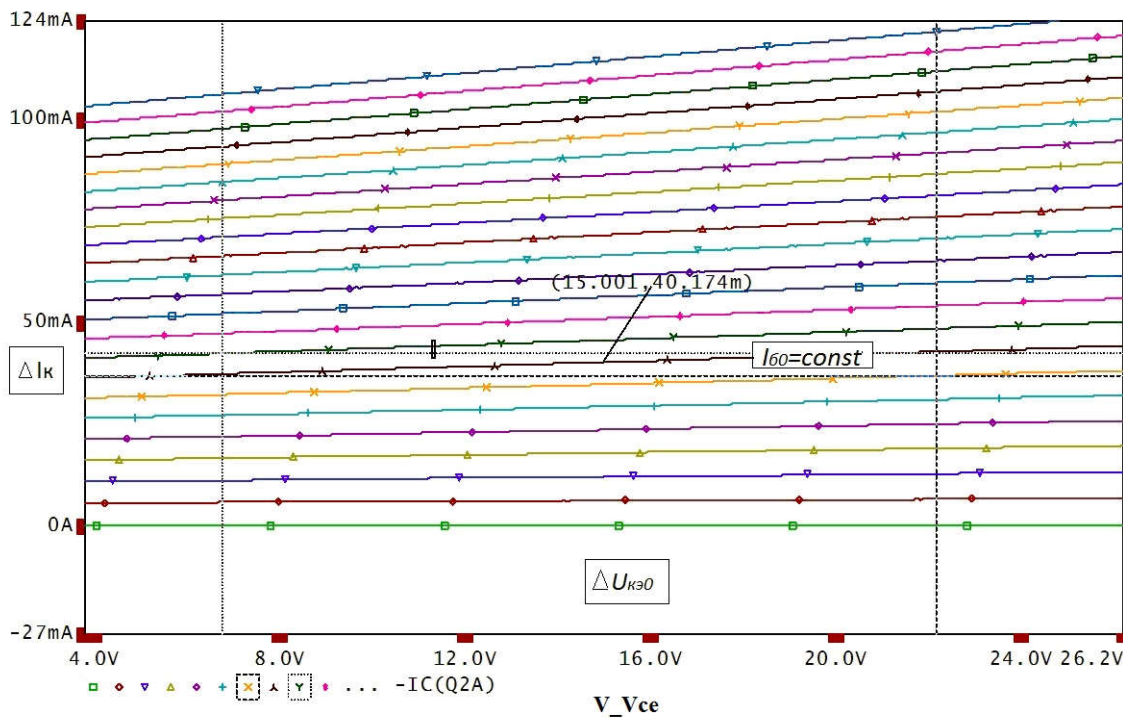


Рисунок 8 - Определение значения параметрической переменной

В нижней строке окна **Probe Cursor** содержится разница между координатами курсоров по осям X и Y.



а



б

Рисунок 9 - Определение приращений для нахождения выходных h-параметров (а – $h_{21э}$, б – $h_{22э}$)

5. Получить семейство входных ВАХ выбранного биполярного транзистора для схемы с ОЭ.

- Собрать схему для снятия входных характеристик (рисунок 10).

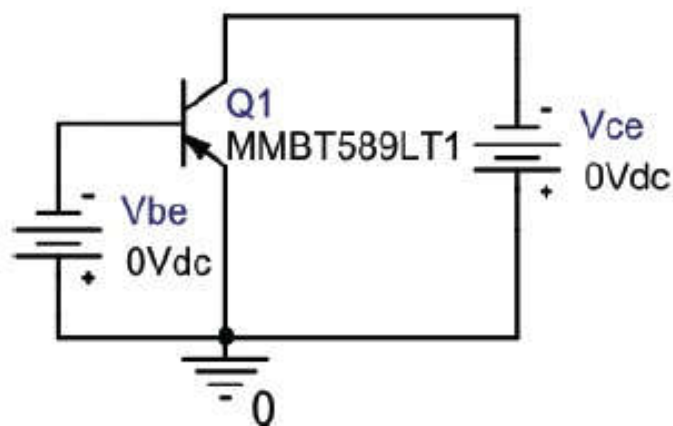


Рисунок 10– Схема для снятия входных характеристик транзистора (OrCAD)

- Выбрать тип анализа DC Sweep.

- В Options выбрать Primary Sweep и задать параметры основной переменной.

В качестве основной переменной (Primary Sweep) выбираем напряжение источника V_{be} , начальное значение (Start Value) можно задать равным 0,5 В. Конечное значение (End Value) задать равным 0,8 В, шаг (Increment) – 1 мВ. Пример показан на рисунок 11.

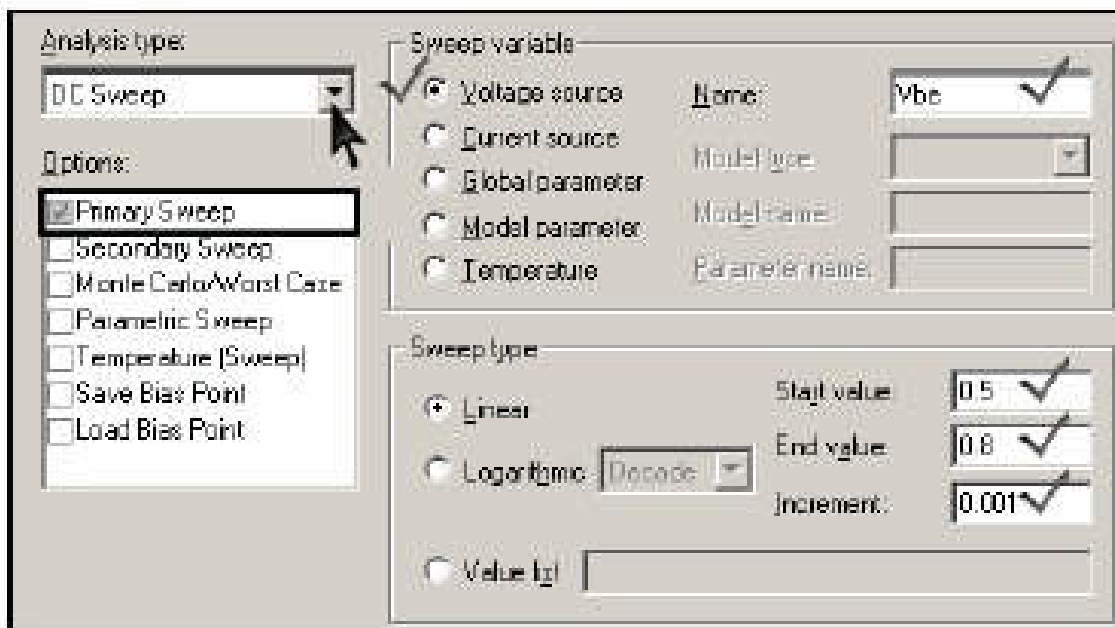


Рисунок 11– Настройка параметров Primary Sweep. Входные характеристики

В Options выбрать Parametric Sweep и задать параметры второстепенной переменной. В качестве второстепенной или параметрической переменной (Parametric Sweep) выбираем напряжение V_{ce} , начальное значение (Start Value) задать на 10 % меньше $U_{кэ0}$. Конечное значение (End Value) задать на 10 % больше $U_{кэ0}$, шаг – 10 % от $U_{кэ0}$. Пример показан на рисунок 12.

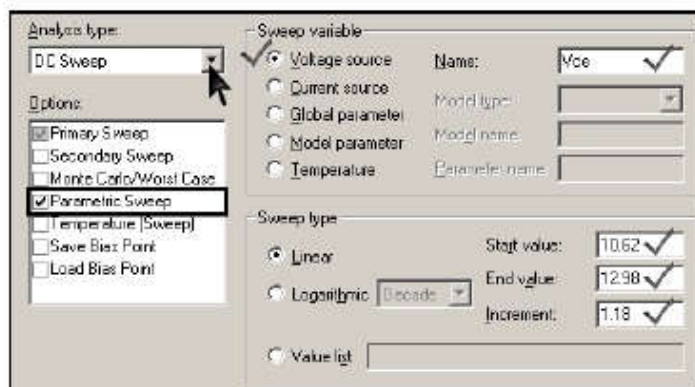


Рисунок 12 - Настройка параметров Parametric Sweep. Входные характеристики ($U_{кэ0}=11,8\text{ В}$)

- Построить графики входных характеристик транзистора. Открыть окно Add Traces. В строку Trace Expression ввести выражение $I_B(Q1)$ – ток базы транзистора. Для удобства дальнейшей работы, при необходимости изменить знак перед выражением.
- Определить и зафиксировать в заготовке отчета напряжение $U_{бэ0}$.

Изменяя параметры второстепенной переменной (источник V_{be}) и масштабируя графики привести построение к такому виду, чтобы область построения включала окрестность рабочей точки (точки соответствующей току $I_{б0}$) примерный вид графиков показан на рисунок 13.

6. Определить параметры $h_{11э}$ и $h_{12э}$. С помощью курсоров и показаний окна **Probe Cursor** определить и зафиксировать в заготовке отчета необходимые данные для нахождения h -параметров транзистора ($h_{11э}$ и $h_{12э}$). Пример на рисунок 14. Определение параметра $h_{12э}$ требует большого приближения области рабочей точки, поскольку кривые практически сливаются.

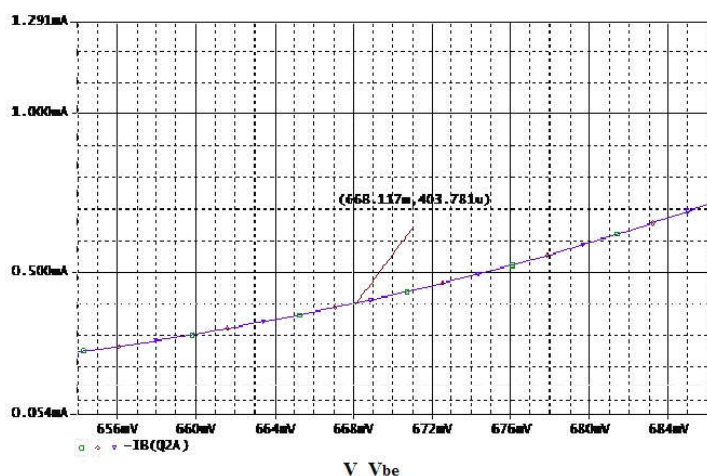
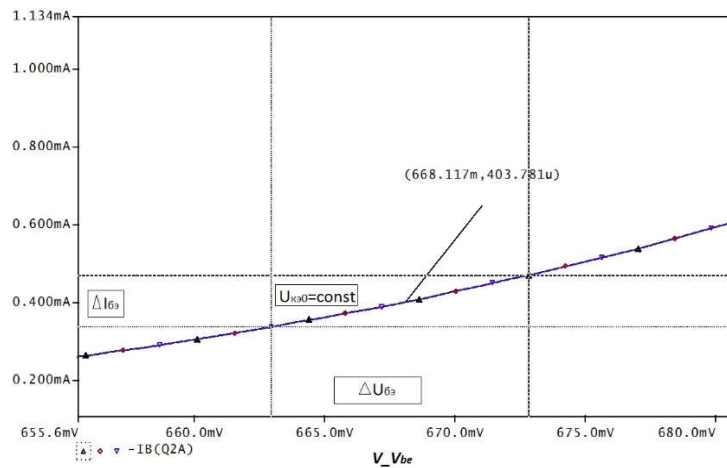
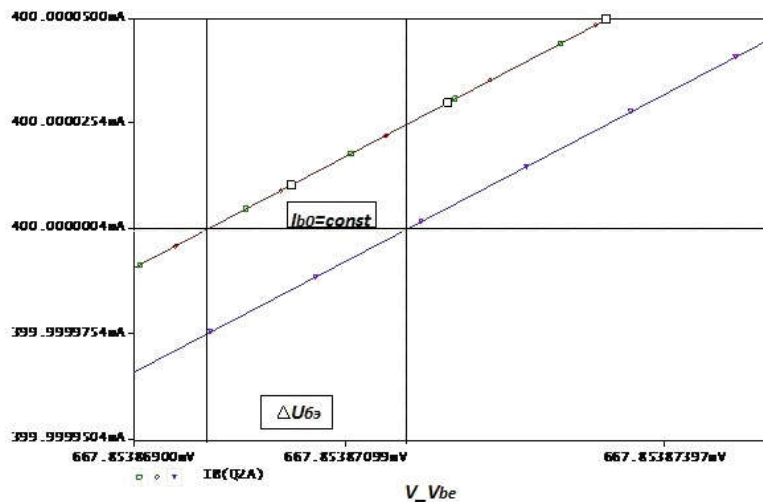


Рисунок 13– Входные характеристики транзистора



а



б

Рисунок 14 - Определение приращений для нахождения входных h -параметров (а – $h_{11э}$, б – $h_{12э}$)

Контрольные вопросы

1. Что такое инжекция носителей тока?
2. В какой области биполярного транзистора происходит инжекция носителей тока?
3. Что означает термин «биполярный транзистор»? Какие еще типы транзисторов вы знаете?
4. Какую роль играют электроны в работе р-п-р транзистора?
5. Какую роль играют дырки в работе р-п-р транзистора?
6. Что такое основные и неосновные носители тока в полупроводниках?

7. Какие носители тока инжектируются в базу в р-n-p транзисторе и n-p-n транзисторе?
8. Какие физические процессы происходят в базовой области транзистора после инжекции туда неосновных носителей тока?
9. Какие параметры транзистора изменятся, если при прочих одинаковых условиях увеличить ширину базовой области (область между эмиттером и коллектором)?
10. Почему коэффициент передачи тока эмиттера (α) меньше единицы?
11. Почему коэффициент передачи тока базы (β) больше единицы?
12. Как изменяется ширина запирающего слоя, если к р-n переходу приложить внешнее напряжение в прямом и обратном направлении?
13. Каков физический смысл h-параметров в схеме с ОЭ?

Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

1. Титульный лист;
2. Оглавление;
3. Наименование работы, цель исследований;
4. Исследуемые схемы;
5. Графики выходных ВАХ биполярного транзистора;
6. Графики входных ВАХ биполярного транзистора;
7. Результаты экспериментов;
8. Расчёт h-параметров биполярного транзистора;
9. Ответы на контрольные вопросы;
10. Перечень литературы, использованной при подготовке и выполнении работы.

4 ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы

1. Формирование навыков проектирования электронных устройств.
2. Изучение принципа работы полевого транзистора, снятие его основных характеристик в схеме включения с общим истоком.

Основные теоретические положения

Полевые транзисторы – это полупроводниковые приборы, у которых для управления током используется зависимость электрического сопротивления токопроводящего слоя (канала) от напряжённости поперечного электрического поля (рисунок 1).

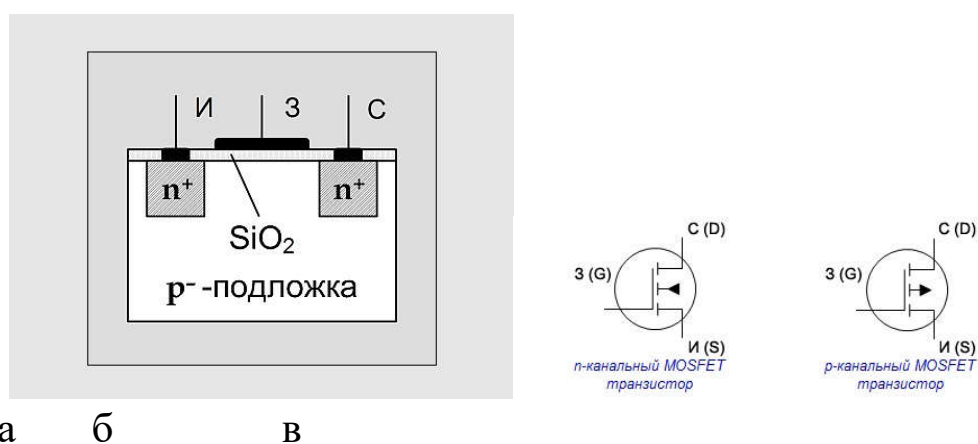


Рисунок 1 - Структура полевого транзистора n – типа проводимости с индуцированным каналом (а) и условно-графическое обозначение полевых транзисторов с каналом n – типа (б) и каналом p – типа (в)

Различают полевые транзисторы (ПТ) с *изолированным затвором* и затвором на основе электрического перехода (*управляющим переходом*).

Каналом служит однородный слой полупроводника n-типа или p-типа. Внешние выводы от начала канала и его конца называются истоком и стоком. Тонкий слой канала (доли мкм) располагается на подложке – более толстой пластине полупроводника, имеющего противоположный тип проводимости. Для электрической изоляции канала от подложки используется p-n переход между ними, который для этого должен находиться под обратным напряжением.

Управляющий электрод – затвор – располагается вдоль канала и электрически изолирован от него. Изменение потенциала затвора приводит к изменению толщины канала, т.е. его проводимости. Для изоляции затвора от канала используют либо обратное смещенный p-n переход (полевые транзисторы с управляющим p-n переходом), либо слой диэлектрика – двуокиси кремния SiO₂ (МДП транзисторы).

МДП-транзисторы подразделяются на транзисторы со *встроенным каналом* и с *индуцированным каналом*. В первом проводящий канал создан технологически («встроен») путем введения соответствующей примеси (донорной для получения n-канала или акцепторной для получения p-канала). Во втором канал возникает (индуцируется) только при подаче на изолированный затвор напряжения определенной полярности и величины.

К основным параметрам полевых транзисторов причисляют входное сопротивление, внутреннее сопротивление транзистора, также называемое выходным, крутизну стоко-затворной характеристики, напряжение отсечки и другое. Входное сопротивление транзистора – это отношение приращения напряжения затвор-исток к приращению тока затвора. Внутреннее сопротивление транзистора – это отношение приращения напряжения сток-исток к приращению тока стока при заданном напряжении затвор-исток. Крутизна стоко-затворной характеристики – это отношение приращения тока стока к приращению напряжения затвор-исток при фиксированном напряжении сток-исток:

$$S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}.$$

Выходные характеристики. Идеализированные выходные характеристики полевого транзистора (ПТ) с индуцированным каналом $I_c = f(U_{cu})$ при $U_{зи} = const$ изображены на рисунке 2, а. На графике можно четко выделить три зоны. Первая из них — зона резкого возрастания тока стока. Это так называемая «омическая» область. Канал «исток-сток» ведет себя как резистор, чье сопротивление управляется напряжением на затворе транзистора.

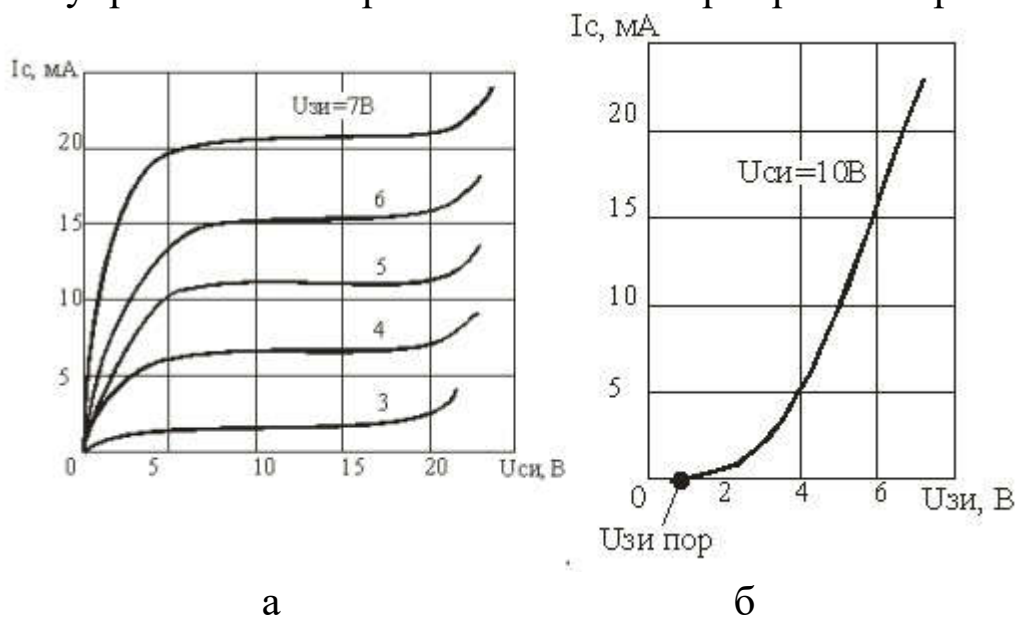


Рисунок 2 – Семейство выходных (стоковых) (а) и входная (стоко-затворная) (б) характеристики ПТ

Вторая зона — **область насыщения**. Она почти горизонтальна. Здесь происходит перекрытие канала в области стока, которое увеличивается при дальнейшем росте напряжения исток-сток. Соответственно, растет и сопротивление канала, а стоковый ток меняется очень слабо. Именно этот участок характеристики используют в усилительной технике, поскольку здесь наименьшие нелинейные искажения сигналов и оптимальные значения малосигнальных параметров, существенных для усиления. К таким параметрам относятся крутизна характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления.

Третья зона графика — **область пробоя**. Причиной пробоя являются большие значения напряженности электрического поля,

появляющиеся в переходе сток-затвор. В этом месте происходит ударная генерация пар носителей электрон-дырка.

Стоко-затворные (передаточные) характеристики. Это зависимость тока стока от напряжения $U_{зи}$ при фиксированных значениях напряжения $U_{си}$. Эта зависимость для $U_{си} > U_{си\text{ нас}}$ показана на рисунке 2, б. И именно ее крутизна является одним из основных параметров полевого транзистора.

Подготовка к работе

1. Изучить рекомендуемую литературу и описание данной лабораторной работы.
2. Нарисовать схемы для снятия семейства стоко-затворных характеристик и семейства стоковых характеристик МДП-транзистора, где в качестве измерительных приборов использовать миллиамперметр и вольтметр.
3. Показать, как по стоко-затворным характеристикам определить крутизну транзистора S , а по стоковым характеристикам – выходное сопротивление.

Таблица 1. Исходные данные

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | | | | | | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ПТ | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| M2SK | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 3 | 3 | 6 | 6 | 7 | 1 | 1 | 1 | 2 | 5 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 |
| | 3 | 5 | 6 | 7 | 4 | 1 | 4 | 9 | 0 | 0 | 6 | 1 | 5 | 1 | 8 |
| $E_{пит}, В$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 0 | 2 | 5 | 0 | 2 | 5 | 0 | 2 | 5 | 0 | 2 | 5 | 0 | 2 | 5 |

Программа исследований

Исследование характеристик транзистора проводится с помощью моделирования его работы на персональной ЭВМ. В данной работе используется программа OrCAD 9.2, включающая модели полевых транзисторов разных уровней.

В работе с помощью программы Schematics “собирается” схема для снятия стоко-затворной и стоковой характеристик транзистора (рисунок 4.1), а с помощью программы PSpice проводится их расчет.

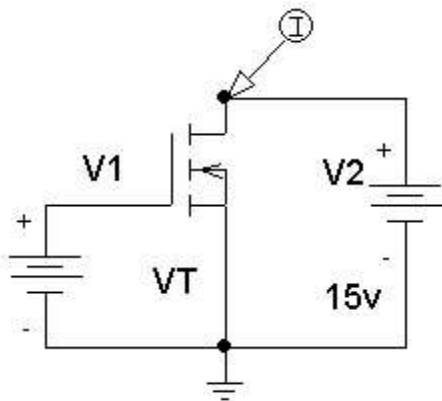





Рисунок 3 - Рабочая схема для снятия ВАХ полевого

1. В операционной системе «Windows» под управлением программы «Capture CIS» собрать схему для снятия вольт - амперных характеристик полевого транзистора (рисунок 3). Для этого:

1.1 Открыть библиотеку элементов (пиктограмма - ) и из нее вытянуть на рабочее поле все требуемые элементы. Искать нужные элементы удобно по их именам: источник постоянного напряжения V1 - VDC, МДП-транзистор – JPWRMOS или HARRIS, земля – GND (пиктограмма - ) .

2.2 Расположить элементы на рабочем поле в соответствии с принципиальной схемой рисунка 3, не соединяя их. Для этого на элемент, с которым надо что-то сделать, поместить курсор мыши и щелкнуть его левой кнопкой. При этом элемент окрасится. Отмеченный элемент можно повернуть (Ctrl/R), удалить (Delete) или переместить. В последнем случае отмеченный элемент захватить мышью и, нажав на левую кнопку, переместить в нужное место, после чего кнопку отпустить

2.3 Соединить элементы на рабочем поле в соответствии с принципиальной схемой. Для этого курсор мыши перевести в режим рисования соединительных линий (иконка - ) . Подвести карандаш к выводу одного из элементов и щелкнуть левой кнопкой (ЛК). Под-

вести курсор к другой точке схемы и снова щелкнуть ЛК. И так далее. Для отмены режима рисования щелкнуть правой кнопкой.



2.4 Ввести обозначения транзистора и источников в соответствии с рисунком 3. Для этого дважды щелкнуть на элемент, а лучше на его имя. В выплывшем окне откорректировать имя.


2.5 Сохранить схему под оригинальным именем $D:\text{user}\langle\text{group}\rangle\langle\text{fio}\rangle\langle\text{name}\rangle$, где $\langle\text{group}\rangle$ – группа, $\langle\text{fio}\rangle$ – ФИО студента, $\langle\text{name}\rangle$ – любое имя. *Внимание – не допускается использование кириллицы.*

2. Снять стоко-затворную характеристику полевого транзистора $I_c(U_{зи})$ при фиксированном значении напряжения $U_{cu} = E_n$. Для этого:

2.1 Установить напряжение источника V2. Для этого дважды щелкнуть на параметр элемента. В выплывшем окне установить значение параметра равным E_n .

2.2 Установить маркер ток на сток транзистора VT1 для задания вывода тока стока I_c ;

2.3 Установить режим расчета стоко-затворной характеристики. Для этого необходимо создать профиль симуляции (пиктограмма - ). В появившемся диалоговом окне задать имя профиля, например Lab1. Затем вызвать окно параметров симуляции *Simulation Settings* (пиктограмма - ). На вкладке *Analysis* выбрать *Analysis type* – *DC Sweep* и установить параметры анализа: тип источника – *Voltage Source*, *Name* - *V1*; *Sweep Type* – *Linear*; *Start Value* = 0; *End Value* +5; *Increment* = 0.1.


2.4 Произвести расчет (пиктограмма -  или F11) и получить стоко-затворную характеристику $I_c(U_{зи})$.

2.5 При $I_c = 1\text{A}$ и при максимальном значении I_c определить крутизну транзистора, сравнить полученные результаты.

3. Снять семейство выходных характеристик $I_c(U_{cu})$. Для этого:

3.1 Устанавливаем режим расчета выходной характеристики *DC Sweep* и параметры анализа: тип источника – *Voltage Source*, *Name* = *V2*; *Sweep Type* – *Linear*; *Start Value* = 0; *End Value* = 10; *Increment* = 0.005.

3.2 В диалоговом окне *Simulation Settings* разрешаем *Secondary Sweep* (отметить чекбокс) и задаем режим изменения напряжения для источник V1: тип источника – *Voltage Source*, *Name = V1*; *Sweep Type – Linear*; *StartValue = 2V*; *EndValue = 5V*; *Increment = 0.5*.

3.3 Производим расчет (иконка -  или F11) .

4. По снятым выходным характеристикам определить выходное сопротивление транзистора в окрестности рабочей точки А с координатами (Еп\2, 1А).

4.1 Для определения выходного сопротивления максимально увеличить кривую, соответствующую току в 1А. При увеличении участка характеристики взять допуск по 0,5В в обе стороны от рабочей точки.

Контрольные вопросы

1. На каком принципе основано управление током в полевом транзисторе?
2. Что представляет собой канал полевого транзистора? От чего зависит толщина канала?
3. Каким образом изолируется канал от подложки? Из каких соображений устанавливается полярность напряжения на стоке?
4. Каким образом обеспечивается изоляция затвора от канала в различных типах полевых транзисторов? Из каких соображений устанавливается полярность напряжения на затворе?
5. Что называется напряжением отсечки и напряжением насыщения?
6. Чем отличается полевой транзистор от биполярного как управляемый источник тока?
7. Какие дифференциальные параметры характеризуют полевой транзистор в режиме малого сигнала? Напишите уравнение для приращения тока стока.
8. Какие соотношения между электрическими величинами (сигналами) отражает малосигнальная эквивалентная схема транзистора?
9. Как зависит от напряжения затвор-исток крутизна передаточной характеристики в области насыщения выходных характеристик?

Содержание отчета

1. Титульный лист;
2. Оглавление;
3. Наименование работы, цель исследований;
4. Исследуемые схемы;
5. Результаты расчётов и экспериментов;
6. Анализ полученных результатов;
7. Ответы на контрольные вопросы;
8. Перечень литературы, использованной при подготовке и выполнении работы.

5 ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы

1. Формирование навыков проектирования электронных устройств.
2. Изучение работы усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером ОЭ и определение его основных параметров.

Основные теоретические положения

Усилительный каскад с общим эмиттером (ОЭ) относится к самым распространённым. Это определяется тем, что он обеспечивает наибольший коэффициент усиления по мощности. Схема усилительного каскада представлена на рисунке 1.

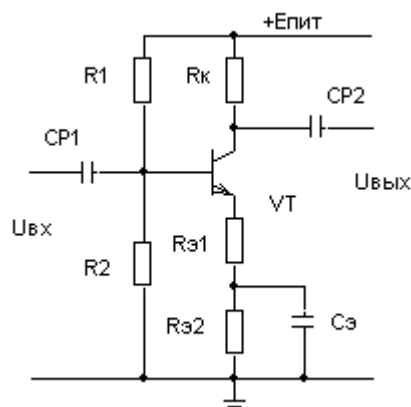


Рисунок 1 – Схема усилительного каскада ОЭ

В схеме используются резистивно-ёмкостные связи. Конденсаторы C_{P1} и C_{P2} являются разделительными и обеспечивают неизменность режима по постоянному току при подключении источника сигнала и нагрузки. Конденсатор $C_{э}$, шунтирующий часть эмиттерного сопротивления, уменьшает глубину отрицательной обратной связи (ООС) на переменном токе и увеличивает коэффициент сопротивления. Неглубокая ООС, создаваемая резистором $R_{э1}$, стабилизирует усиление и уменьшает нелинейные искажения.

Рабочий режим каскада ОЭ можно определить из следующей системы уравнений:

$$U_{\text{пит}} = I_{\text{к}} R_{\text{к}} + U_{\text{кэ}} + I_{\text{э}} R_{\text{э}},$$

$$U_{\text{пит}} = I_{R_1} R_1 + U_{\text{бэ}} + I_{\text{э}} R_{\text{э}},$$

$$I_{R_2} R_2 = U_{\text{бэ}} + I_{\text{э}} R_{\text{э}},$$

$$I_{\text{б}} = I_{R_1} - I_{R_2},$$

$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}},$$

$$I_{\text{к}} = \beta I_{\text{б}}.$$

Здесь $R_{\text{к}}$ и $R_{\text{э}}$ – сопротивления в цепи коллектора и эмиттера.

В активном режиме напряжение $U_{\text{бэ}}$ существенно не меняется из-за высокой крутизны входной вольтамперной характеристики. Следовательно, можно считать, что $U_{\text{бэ}} \approx \text{const} = 0,7 \text{ В}$.

К основным параметрам усилительных каскадов относятся:

$K_u = (\Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}})$ – коэффициент усиления напряжения;

$R_{\text{вх}} = (\Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{вх}})$ – входное сопротивление каскада;

$R_{\text{вых}} = (\Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вых}})$ – выходное сопротивление каскада.

Основные параметры каскада можно рассчитать, используя h -параметры малосигнальной схемы замещения транзистора:

$$K_u = - \frac{h_{21э} [R_{\text{к}} \parallel R_{\text{н}} \parallel (1/h_{22э})]}{h_{11э} + (h_{21э} + 1)R_{\text{э}1}}$$

$$R_{\text{вх}} = [h_{11э} + (h_{21э} + 1)R_{\text{э}1}] \parallel R_{\text{б}}$$

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{к}} \parallel (1/h_{22э})$$

В этих выражениях $R_{\text{б}} = R_1 \parallel R_2$; $R_{\text{г}}$ – сопротивление источника сигнала, $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки.

h -параметры можно приближенно определить через рабочий ток транзистора $I_{\text{к}}$ и коэффициент усиления транзистора β следующим образом:

$$h_{11э} \approx \beta \frac{\Phi_{\text{т}}}{I_{\text{к}}}, \quad h_{21э} = \beta, \quad h_{22э} \approx 0.$$

Здесь $\Phi_{\text{т}}$ – тепловой потенциал, который для комнатной температуры $+20^\circ\text{C}$ примерно равен 25 мВ.

Работа схемы исследуется методом моделирования.

Подготовка к работе

1. Изучить схему усилительного каскада, его основные характеристики и параметры, методы их расчёта и экспериментального определения по описанию лабораторной работы.
2. Для схемы усилительного каскада ОЭ (рисунок 2.1) выбрать исходные данные в соответствии с номером подгруппы и номером рабочего места (таблица 2) и рассчитать:
 - коллекторный ток (I_K) и напряжение коллектор-эмиттер ($U_{кэ}$),
 - коэффициент усиления каскада в режиме холостого хода ($K_{u\text{ хх}}$).

Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1.

| Параметр | Расчет | Эксперимент |
|-------------------|--------|-------------|
| I_K , мА | | |
| $U_{кэ}$, В | | |
| $K_{u\text{ хх}}$ | | |

Таблица 2. Варианты заданий

| № | β | $E_{\text{пит}}$, В | $R_{1,к}$ Ом | $R_{2,к}$ Ом | R_K , Ом | $R_{э1}$, Ом | $R_{э2}$, Ом |
|------|---------|----------------------|-----------------|-----------------|---------------|------------------|------------------|
| 1.1 | 35 | 10 | 8.4 | 1.6 | 820 | 82 | 100 |
| 1.2 | 50 | 12 | 7.5 | 2.4 | 510 | 51 | 130 |
| 1.3 | 70 | 15 | 12 | 2.2 | 390 | 39 | 62 |
| 1.4 | 75 | 10 | 8.4 | 1.6 | 200 | 20 | 30 |
| 1.5 | 80 | 12 | 15 | 5.1 | 470 | 47 | 150 |
| 1.6 | 120 | 15 | 24 | 4.3 | 430 | 43 | 39 |
| 1.7 | 100 | 10 | 18 | 3.3 | 820 | 100 | 100 |
| 1.8 | 45 | 12 | 20 | 6.2 | 510 | 82 | 100 |
| № | β | $E_{\text{пит}}$, В | $R_{1,к}$ Ом | $R_{2,к}$ Ом | R_K , Ом | $R_{э1}$, Ом | $R_{э2}$, Ом |
| 1.9 | 120 | 15 | 36 | 6.2 | 390 | 39 | 51 |
| 1.10 | 35 | 10 | 8.4 | 1.6 | 820 | 82 | 100 |

| | | | | | | | |
|------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1.11 | 50 | 12 | 7.5 | 2.4 | 510 | 100 | 82 |
| 1.12 | 70 | 15 | 12 | 2.2 | 390 | 51 | 51 |
| 2.1 | 75 | 10 | 8.4 | 1.6 | 200 | 30 | 20 |
| 2.2 | 80 | 12 | 15 | 5.1 | 470 | 82 | 120 |
| 2.3 | 120 | 15 | 24 | 4.3 | 430 | 39 | 39 |
| 2.4 | 100 | 10 | 18 | 3.3 | 820 | 150 | 51 |
| 2.5 | 45 | 12 | 20 | 6.2 | 510 | 82 | 100 |
| 2.6 | 120 | 15 | 36 | 6.2 | 390 | 62 | 30 |
| 2.7 | 35 | 12 | 8.4 | 1.6 | 820 | 82 | 100 |
| 2.8 | 50 | 15 | 7.5 | 2.4 | 510 | 51 | 130 |
| 2.9 | 70 | 18 | 12 | 2.2 | 390 | 39 | 62 |
| 2.10 | 75 | 15 | 8.4 | 1.6 | 200 | 20 | 30 |
| 2.11 | 80 | 15 | 15 | 5.1 | 470 | 47 | 150 |
| 2.12 | 120 | 18 | 24 | 4.3 | 430 | 43 | 39 |

Для самоконтроля ответить на приведенные далее вопросы.

Вопросы для самоконтроля

1. Как экспериментально определить входное сопротивление усилительного каскада?
2. Почему нельзя определить входное сопротивление через отношение постоянного напряжения на базе к постоянному току базы?
3. Если падение напряжения на транзисторе в режиме покоя близко к нулю, к каким последствиям во временной диаграмме выходного напряжения это приведёт?
4. Как связаны между собой постоянные напряжения на базе и эмиттере транзистора в отсутствии сигнала?

Программа исследований

1. Собрать схему согласно рисунку 2.

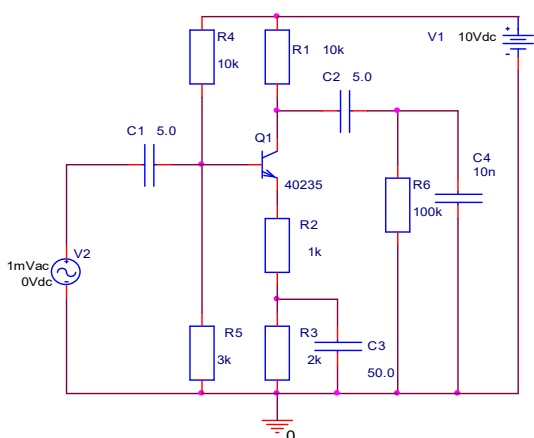


Рисунок 2 - Схема усилительного каскада с общим эмиттером

Установить номинальные значения сопротивлений и напряжения питания в соответствии с вариантом задания (таблица 1). Емкости конденсаторов: $C1=5\mu$, $C2=5\mu$, $C3=50\mu$, $C4=10\text{n}$.

- Для синусоидального источника входного сигнала VSIN установить: $V_{OFF}=0$; $V_{AMPL}=100\text{mV}$; $FREQ=1\text{k}$.
- Установить начальные значения для сопротивления



нагрузки $R6=1\text{M}$ (1Meg) и амплитуды входного сигнала 100mV.

- Выделить щелчком главной кнопки мыши транзистор (появится цветная рамка). Щелчком по вспомогательной кнопки мыши открыть меню и выбрать режим редактирования параметров модели (EditPspiceModel). В окне параметров модели транзисторов найти $BF=(\text{коэффициент усиления } \beta)$. Выделить значение и, набрав новое, сохранить параметры.
- Сохранить схему.

2. Определить режим схемы по постоянному току и сравнить с расчетом. С этой целью:

- Установить режим расчета схемы по постоянному току (*PSpice – BiasPoint - Enable*).
- Запустить программу расчета *PSpice(F11)*.
- Определить напряжение на коллекторе, базе и эмиттере транзистора, нажав на пиктограмму **V**.
- Для определения токов нажать на пиктограмму **I**.

3. Подав на вход синусоидальный сигнал с частотой $f=1\text{kГц}$ и амплитудой $U_m=100\text{мВ}$, проверить работоспособность усилителя. Определить коэффициент усиления $K_{u \text{ xx}}$. Сравнить с расчетом. Для этого:

- Установить режим расчета схемы во временной области в соответствии с рисунком 3.
- Установить на входе и выходе схемы маркеры для вывода осциллограмм напряжения ();
- Запустить программу расчета *PSpice* В её окне с помощью электронных курсоров определить амплитуду входного и выходного синусоидального сигнала. Курсоры доступны после нажатия на пиктограмму , и их можно перемещать левой или правой кнопками мыши. В окошке **ProbeCursor** первая колонка цифр - для оси абсцисс (X), вторая колонка для оси ординат (Y). Для более точных измерений любой элемент графика можно увеличить с помощью лупы. Коэффициент усиления каскада определяется как отношение амплитуд неискаженного выходного сигнала к входному

$$(K_u = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{ВХ}}).$$

- Увеличивая амплитуду входного сигнала до 1В, наблюдать за изменением амплитуды и формы выходного сигнала. Результаты свести в таблицу 3 и построить зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды входного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ – амплитудную характеристику. Определить максимальное значение входного сигнала, не приводящее к искажениям выходного сигнала (динамический диапазон).

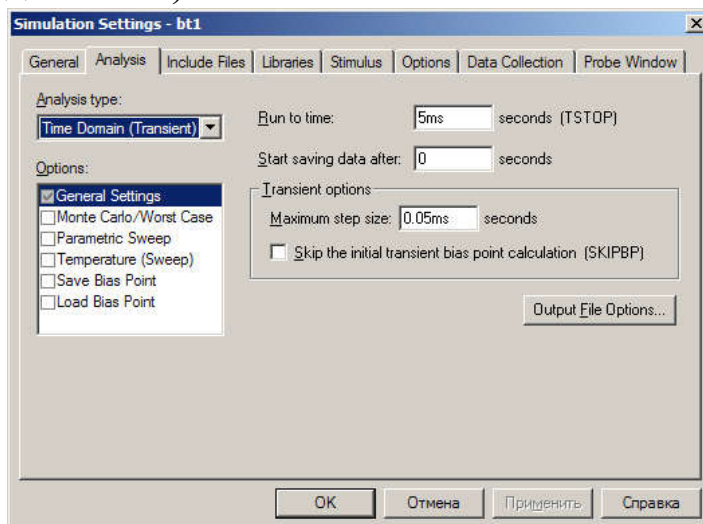


Рисунок 3 - Настройки режима временных диаграмм

Таблица 3

| | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $U_{ВХ}$, мВ | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| $U_{ВЫХ+}$, В | | | | | | | | | | |
| $U_{ВЫХ-}$, В | | | | | | | | | | |

4. Установить амплитуду входного сигнала равной 100мВ. Изменяя сопротивление нагрузки от $0,5R_K$ до $3R_K$ с шагом $0,5 R_K$ определить амплитуду выходного сигнала и коэффициент усиления. Результаты занести в таблицу 4. Построить зависимость коэффициента усиления от сопротивления нагрузки.

Таблица 4

| | | | | | | |
|----------------|--|--|--|--|--|--|
| R_K , К | | | | | | |
| $U_{ВЫХ+}$, В | | | | | | |
| K_u | | | | | | |

Контрольные вопросы

1. В какой степени зависит коэффициент усиления усилительного каскада с ОЭ от коэффициента передачи транзистора β ? Как влияет на эту зависимость отсутствие шунтирующего эмиттерный резисторконденсатора?
2. С какой целью в усилительный каскад вводят эмиттерный резистор?
3. Влияет ли на коэффициент усиления каскада с ОЭ величина тока покоя?
4. Какие средства можно использовать для увеличения коэффициента усиления каскада с ОЭ при фиксированной величине сопротивления нагрузки?

Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

1. Титульный лист;
2. Оглавление;
3. Наименование работы, цель исследований;
4. Исследуемые схемы;
5. Результаты расчётов и экспериментов;
6. Анализ полученных результатов;
7. Ответы на контрольные вопросы;
8. Перечень литературы, использованной при подготовке и выполнении работы.

6 ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы

В работе изучается усилительный каскад с общим истоком (ОИ), экспериментально определяются его основные параметры и снимаются характеристики.

Основные теоретические положения

Схема усилительного каскада с общим истоком на n-МДП-транзисторе представлен на рисунке 1. Для p-МДП-транзистора следует сменить полярность источника питания.

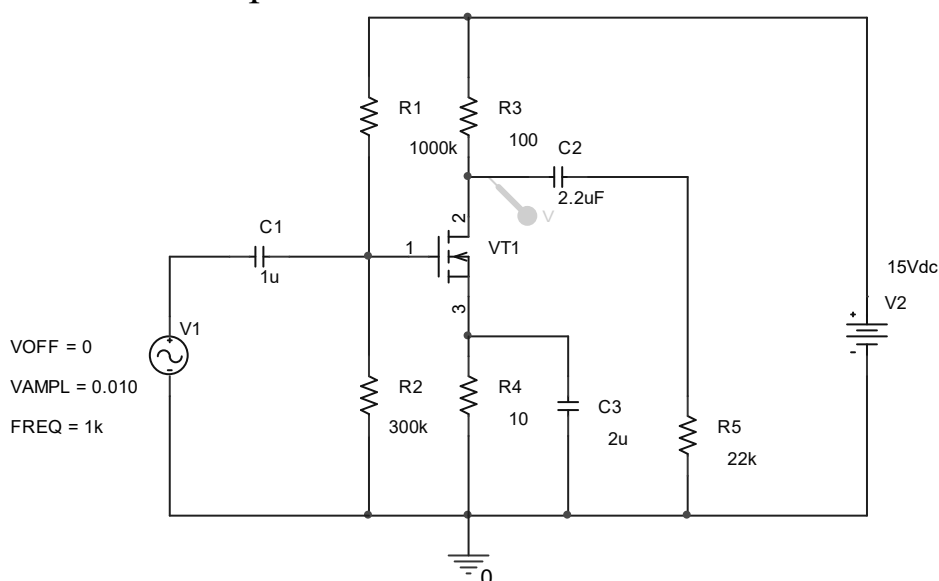


Рисунок 1 – Схема усилительного каскада с ОИ на n-канальном МДП-транзисторе

Назначение элементов схемы практически аналогично назначению элементов схемы с ОЭ на биполярном транзисторе.

Режим каскада определяется при подготовке к работе, по графическим характеристикам, снятым в лабораторной работе №4, а затем проверяется экспериментально.

Положение рабочей точки

Модуляция длины канала в полевом транзисторе приводит к тому, что стоко-затворные характеристики веерообразно расходятся, а пологий участок на выходных характеристиках имеет наклон (рисунок 2). Поэтому графическое определение рабочего режима каскадов на полевых транзисторах усложняется. Необходим итерационный процесс, который заключается в следующем:

1. Рассчитать потенциал затвора $\varphi_3 = U_{\text{пит}} R_2 / (R_1 + R_2)$, где $U_{\text{пит}}$ – напряжение источника питания.
2. На стоко-затворные характеристики (рисунок 2) нанести линию нагрузки, определяемую уравнением $U_{\text{зи}} = \varphi_3 + I_c R_{\text{и}}$. Прямая проводится через точку $(\varphi_3, 0)$ под наклоном, соответствующим значению сопротивления $R_{\text{и}}$. Для схемы ОИ – это R_4 . Искомая рабочая точка лежит между точками A_1 и D_1 , то есть между точками пересечения линии нагрузки со стоко-затворными характеристиками, снятыми при $U_{\text{си}} = -5\text{В}$ и $U_{\text{си}} = -15\text{В}$.

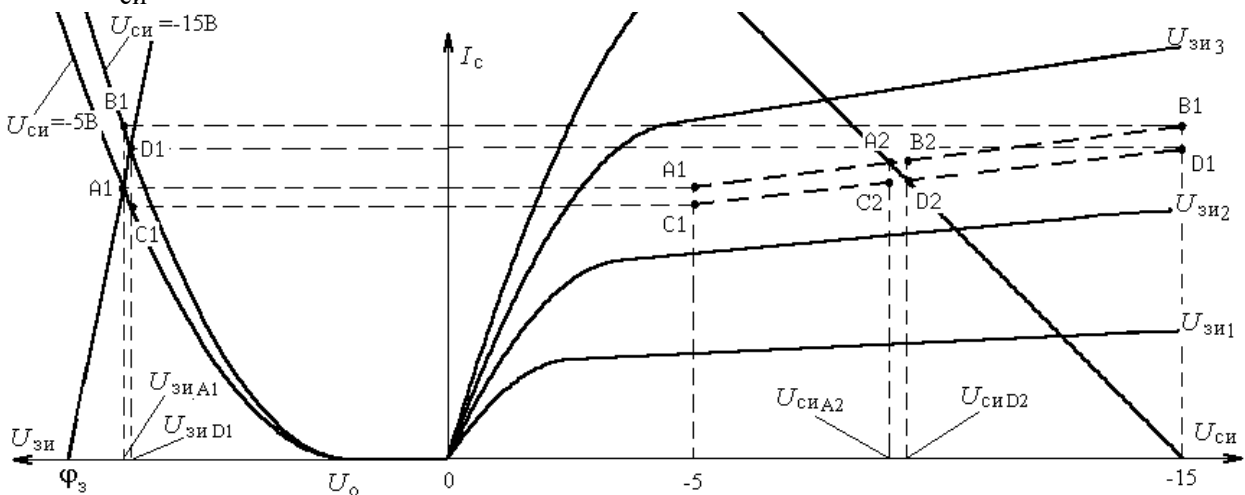


Рисунок 2 – Графическое определение рабочего режима

3. На стоко-затворных характеристиках находим вспомогательные точки B_1 и C_1 ($U_{\text{зи}B1} = U_{\text{зи}A1}$ и $U_{\text{зи}C1} = U_{\text{зи}D1}$).

4. Соответствующие точки A_1 , B_1 , C_1 и D_1 наносятся на график стоковых характеристик и строятся вспомогательные характеристики, снятые при постоянных напряжениях на затворе $U_{зиA1}$ и $U_{зиD1}$ (на рисунке 2 проведены штриховой линией).
5. На выходных характеристиках через точку $(U_{ип}, 0)$ проводится прямая нагрузки по постоянному току в соответствии с уравнением $U_{пит} = U_{си} - (R_3 + R_4)I_c$. Точки пересечения линии нагрузки с построенными частями стоковых характеристик (точки A_2 и D_2) определяют границы положения точки покоя усилительного каскада на выходных характеристиках.
6. На вспомогательных характеристиках определяем дополнительные точки B_2 и C_2 , для которых $U_{сиB2} = U_{сиD2}$ и $U_{сиC2} = U_{сиA2}$.
7. Перенести (если возможно) точки A_2 , B_2 , C_2 и D_2 на стоко-затворные характеристики и построить вспомогательные характеристики, снятые при постоянных напряжениях на стоке $U_{сиA2}$ и $U_{сиD2}$ (на рисунке 2 не показано).
8. Итерационный процесс повторяется с п. 4 до тех пор, пока не будет достигнута желаемая точность. В лабораторной работе можно ограничиться одной итерацией.

Графическое определение малосигнальных параметров транзистора

1. Крутизна транзистора S определяется по стоко-затворным характеристикам по наклону касательной к кривой $I_c(U_{зи})$ в рабочей точке в соответствии с определением: $S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$ при $U_{си} = \text{const}$.
2. Дифференциальное выходное сопротивление транзистора по определению равно $r_{си} = \Delta U_{си} / \Delta I_c$ при $U_{зи} = \text{const}$. Определяется $r_{си}$ по снятым выходным (стоковым) характеристикам по наклону касательной к кривой $I_c(U_{си})$ в рабочей точке.

Подготовка к работе

1. Изучить схемы усилительных каскадов и ознакомиться с методикой расчёта.
2. Дополнить схемы необходимыми средствами исследования.
3. Для схемы усилительного каскада с ОИ (рисунок 1) рассчитать параметры режима покоя:
 - ток в цепи стока I_c ;
 - напряжение между стоком и истоком $U_{си}$;
 - напряжение между затвором и истоком $U_{зи}$;
 - крутизну транзистора в рабочей точке S .

Полученные результаты записать в таблицу (см. п. 4 рабочего задания).

4. Изобразить малосигнальную схему замещения усилительного каскада ОИ с включенным и отключенным конденсатором C_3 . Рассчитать основные параметры каскада (K_u , $R_{вх}$, $R_{вых}$).

Расчет основных параметров каскада

К основным параметрам усилительных каскадов относятся:

$K_u = (\Delta U_{вых} / \Delta U_{вх})$ – коэффициент усиления напряжения;

$R_{вх} = (\Delta U_{вх} / \Delta I_{вх})$ – входное сопротивление каскада;

$R_{вых} = (\Delta U_{вых} / \Delta I_{вых})$ – выходное сопротивление каскада.

Для усилительного каскада ОИ эти параметры можно рассчитать, используя параметры малосигнальной схемы замещения транзистора S и $r_{си}$:

$$K_u = -S(R_c \parallel r_{си}) \xi_{вых};$$

$$R_{вх} = R_1 \parallel R_2;$$

$$R_{вых} = R_c,$$

где $\xi_{вых} = \frac{R_H}{R_H + R_{вых}}$ – коэффициент деления выходного напряжения.

Программа исследований

- Снять и построить амплитудную характеристику усилительного каскада ОИ для $R_H = \infty$, $C_H = 0$ при включенной и отключенной цепи обратной связи. Для этого:
 - Изменяя входное синусоидальное напряжение получить несколько отсчётов выходного напряжения. Измерения заканчиваются при явном ограничении выходного напряжения.
 - По наклону линейной части амплитудной характеристики определите коэффициент усиления каскада при отключенном и включенном конденсаторе C_3 .
 - Зарисовать семейство амплитудных характеристик.
 - Определите динамический диапазон входного сигнала.
 - Результаты занести в таблицу

| Схема | без ООС | | с ООС | |
|-------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Параметр | K_{uXX} | $U_{ВХ макс, В}$ | K_{uXX} | $U_{ВХ макс, В}$ |
| Эксперимент | | | | |
| Расчет | | *** | | *** |

- Снять и построить нагрузочную характеристику $K_u(R_H)$ каскада с ОИ без ООС. При изменении сопротивления нагрузки следить за формой выходного сигнала – сигнал должен быть синусоидальным.

| $R_H, (ОМ)$ | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 | ∞ |
|---------------|----|----|----|-----|-----|-----|------|----------|
| $U_{ВХ}, (В)$ | | | | | | | | |
| $U_H, (В)$ | | | | | | | | |
| K_u | | | | | | | | |

- По графику $K_u(R_H)$ или по данным предыдущего пункта определить выходное сопротивление каскада ОИ без ООС.

| $R_H, (ОМ)$ | $U_H, (В)$ | $R_{ВЫХ}, (ОМ)$ |
|-------------|------------|-----------------|
| ∞ | | $R_{ВЫХ} =$ |
| 1000 | | |

4. Снять и построить амплитудно-частотную характеристику усилительного каскада с ОИ без ООС ($R_H = \infty$, $C_H = 10$ нФ).

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| f , (кГц) | 0.046 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 1. | 2. | 4. | 10 | 22 | 46 | 10 | 22 |
| | | 0 | 2 | 6 | 0 | 2 | 6 | | | | 0 | 0 |
| $U_{Г}$, (В) | | | | | | | | | | | | |
| $U_{н}$, (В) | | | | | | | | | | | | |
| K_u | | | | | | | | | | | | |
| K_u , (дБ) | | | | | | | | | | | | |

5. Результаты исследования для каскада с ОИ без ООС и результаты расчеты занести в таблицу.

| | | | | |
|-------------|--------------|----------------|------------|------------------|
| Параметр | $K_{u_{xx}}$ | $R_{вых}$, Ом | f_H , Гц | f_{ϕ} , кГц |
| Расчет | | | | |
| Эксперимент | | | | |

Исследование усилительного каскада ОС*

6. Снять амплитудную характеристику каскада. По характеристике определить коэффициент усиления каскада и динамический диапазон.

| | | |
|-------------|--------------|-------------------|
| Параметр | $K_{u_{xx}}$ | $U_{вх макс}$, В |
| Эксперимент | | |
| Расчет | | *** |

7. Исследовать работу каскада аналогично п. 2. Зарисовать осциллограммы и определить коэффициент усиления $K_{u_{xx}}$.

| | | |
|-------------|--------------|--------------|
| Параметр | $U_{вх}$, В | $K_{u_{xx}}$ |
| Эксперимент | | |

8. Снять и построить нагрузочную характеристику $K_u(R_H)$ каскада ОС ($C_H=0$). По графику $K_u(R_H)$ определить выходное сопротивление каскада.

| | | | | | | | | |
|--------------|----|----|----|-----|-----|-----|------|----------|
| R_H , (Ом) | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 | ∞ |
|--------------|----|----|----|-----|-----|-----|------|----------|

* Выполняется по указанию преподавателя

| | | | | | | | | |
|---------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $U_{BX}, (B)$ | | | | | | | | |
| $U_H, (B)$ | | | | | | | | |
| K_u | | | | | | | | |

| | | |
|-------------|------------|-----------------|
| $R_H, (OM)$ | $U_H, (B)$ | $R_{ВЫХ}, (OM)$ |
| ∞ | | $R_{ВЫХ} =$ |
| 100 | | |

9. Экспериментальные результаты и расчеты занести в таблицу.

| Параметр | $K_{иХХ}$ | $R_{ВХ}, кОМ$ | $R_{ВЫХ}, Ом$ |
|-------------|-----------|---------------|---------------|
| Расчет | | | |
| Эксперимент | | *** | |

Контрольные вопросы

1. С какой целью в цепь истока каскада с ОИ включается резистор?
2. Какие факторы ограничивают значения сопротивлений делителя в цепи затвора?
3. Усилительный каскад на полевом транзисторе с р-п переходом может работать с автосмещением. Почему этот способ не реализуется в каскадах с МДП-транзисторами
4. Какой фактор определяет входное сопротивление усилительного каскада с ОИ на МДП-транзисторе в области высоких частот.

Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

1. Титульный лист;
2. Оглавление;
3. Наименование работы, цель исследований;
4. Исследуемые схемы;
5. Результаты расчётов и экспериментов;
6. Анализ полученных результатов;
7. Ответы на контрольные вопросы;

8. Перечень литературы, использованной при подготовке и выполнении работы.

7 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В САПР

Цель работы

- Изучение приёмов построения схем и исследования электронных устройств в САПР OrCAD.
- Исследование статических характеристик операционных усилителей.

Основные теоретические положения

Операционные усилители (ОУ) представляют собой усилители постоянного тока с низкими значениями входных токов и напряжения смещения нуля и с высоким коэффициентом усиления. Функция преобразования сигнала схемой на ОУ почти исключительно определяется свойствами цепей обратных связей усилителя и отличается высокой стабильностью. Операционные усилители почти полностью вытеснили усилители на дискретных компонентах, а также применяются в составе многих систем на кристалле. Практически все операционные усилители являются дифференциальными. Их выходное напряжение определяется разностью напряжений, приложенных к неинвертирующему и инвертирующему входам ОУ.

На электрических схемах операционный усилитель обозначается в соответствии с ГОСТ 2.759-82 (рисунок 1).

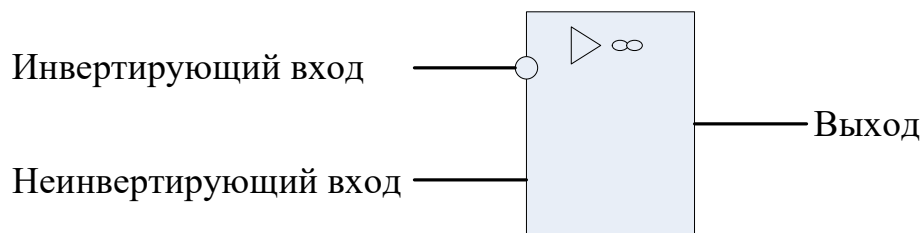


Рисунок 1 – Условное графическое обозначение операционного усилителя

Альтернативные обозначения, применяемые в зарубежной и отечественной литературе представлены на рисунке 2 а, б.

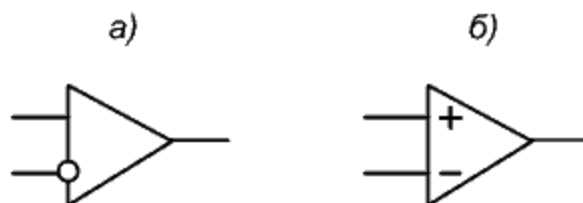


Рисунок 2 – Альтернативные обозначения ОУ

На условных обозначениях не показаны зажимы питания и вспомогательных цепей (коррекции смещения и частотной).

Электрическая схема операционного усилителя представляет собой двух-, реже трёхкаскадную схему на полевых или биполярных транзисторах. Первый каскад практически всегда построен по дифференциальной схеме. Его симметричность и определяет стабильность характеристик и параметров ОУ. Второй и третий каскады построены по схеме с общим эмиттером. Выходной каскад реализуется по схеме двухтактного повторителя напряжения, что обеспечивает высокий к.п.д., низкое выходное сопротивление и большую мощность. Он снабжается **схемами защиты от коротких замыканий** выходного зажима на землю и полюса источников питания.

Обычно ОУ питаются от двух **разнополярных источников**, что обеспечивает им симметричную относительно начала координат передаточную характеристику, т.е. позволяет усиливать сигналы любой полярности. Практически все ОУ допускают применение

однополярного питания, что привносит специфику в вид передаточной характеристики.

Основные статические характеристики и параметры ОУ

Передаточная (амплитудная) характеристика ОУ. Одной из основных характеристик операционного усилителя является передаточная характеристика. Она связывает выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ с дифференциальным входным напряжением $U_{\text{ВХ.ДФ}}$, т.е. разностью входных напряжений на неинвертирующем и инвертирующем входах. В рабочей области эта зависимость носит линейный характер:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{и.ДФ}} \cdot U_{\text{ВХ.ДФ}} \quad (1)$$

Коэффициент усиления дифференциального сигнала $K_{\text{и.ДФ}}$ лежит в пределах от единиц тысяч до десятка миллионов. Передаточная характеристика идеального операционного усилителя, представленная выражением (1) должна проходить через начало координат. Реальные операционные усилители при нулевом входном напряжении имеют ненулевое выходное напряжение.

Напряжение, которое следует приложить между входами операционного усилителя чтобы получить нулевое выходное напряжение называется напряжением смещения, приведенным ко входу – $U_{\text{см}}$. Напряжение смещения – один из основных источников статической ошибки.

Передаточная характеристика позволяет определить коэффициент усиления дифференциального сигнала, **максимальное выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ макс}}$, минимальное выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ мин}}$ и напряжение смещения $U_{\text{см}}$.**

Коэффициент усиления синфазного сигнала. Реальные ОУ усиливают и синфазную составляющую входных напряжений $U_{\text{ВХ.СФ}}$ (в отличие от идеального ОУ):

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{и.СФ}} \cdot U_{\text{ВХ.СФ}} \quad (2)$$

В качестве синфазного напряжения принимается среднее значение входных напряжений. Качественные усилители имеют низкое значение коэффициента усиления синфазного сигнала ($K_{u.cф} \sim 10$). Неравенство нулю коэффициента усиления синфазного сигнала приводит к ошибке в схемах, в которых синфазный сигнал не равен нулю

Нормируемым параметром является не сам коэффициент усиления синфазного сигнала, а **коэффициент ослабления синфазной составляющей $K_{осс}$** :

$$K_{осс} = 20 \lg(K_{u.дф}/K_{u.cф}) \text{ [дБ]}. \quad (3)$$

Его величина лежит в пределах 40 -120дБ.

Для реального усилителя выходное напряжение определяется по выражению:

$$U_{вых} = K_{u.дф} \cdot (U_{вх.дф} + U_{вх.cф}/K_{осс}). \quad (4)$$

Входные токи. Разность входных токов. При подключении операционного усилителя к источникам входных сигналов во входные зажимы втекают токи $I_{вх1}$ и $I_{вх2}$, в общем случае не равные друг другу. Их величины и величина разности входных токов $\Delta I_{вх}$ — являются нормируемыми параметрами. Неравенство нулю входных токов приводит к ошибкам преобразования сигнала. Они связаны с падением напряжения на внутренних сопротивлениях источников сигналов и резисторах, включённых на входах ОУ. Следует принимать во внимание то, что входные токи не равны нулю при равенстве нулю входных сигналов. Они слабо зависят от величин входных сигналов. По своей природе они являются токами, задающими режим работы входного биполярного усилительного каскада, или токами утечки усилительного каскада на полевых транзисторах.

Входные сопротивления ОУ. Изменение входных токов при изменении величин входных напряжений характеризует входное сопротивление операционного усилителя. Различают сопротивление для дифференциального сигнала и сопротивления для синфазных сигналов. У современных операционных усилителей эти сопротивления чрезвычайно велики. Дифференциальное сопротивление

ние при этом существенно меньше синфазного сопротивления инвертирующего и неинвертирующего входов.

Выходное сопротивление. Это внутренне сопротивление усилителя, приводящее к изменению выходного напряжения при изменении тока, отбираемого от усилителя. Выходное сопротивление операционных усилителей составляет от нескольких десятков до нескольких сотен Ом.

Предельно-допустимые параметры. Операционные усилители повреждаются при превышении предельных значений эксплуатационных параметров. К нормируемым предельным параметрам относятся максимальные значения величин напряжений питания, максимальные значения дифференциальных и синфазных входных напряжений, минимальное сопротивление нагрузки. Для большинства усилителей недопустим выход входных напряжений за пределы напряжений питания.

Подготовка к работе

При подготовке к работе придерживаться приведенного далее плана.

- Изучить порядок создания проекта в САПР OrCAD.
- Изучить установки различных режимов симуляции электронных схем.
- Изучить основные характеристик и параметры операционных усилителей.
- Изучить способы измерения основных характеристик и параметров операционных усилителей.
- Изучить схему экспериментального исследования характеристик и параметров операционных усилителей.
- Познакомиться со справочными данными операционных усилителей.
- Для самоконтроля ответить на приведенные ниже вопросы.

1. Какова величина выходного напряжения идеального ОУ, если оба входа подключены к общему проводу?
2. Какова величина выходного напряжения реального ОУ, если оба входа подключены к общему проводу?
3. На какую минимальную величину следует изменить входное напряжение, чтобы выходное изменилось от минимального значения до максимального значения?
4. Как определить коэффициент усиления ОУ по его передаточной характеристике?
5. Какой из двух коэффициентов усиления больше - дифференциального или синфазного сигналов?
6. Какой примерный диапазон изменения выходного напряжения соответствует правильно снятой передаточной характеристике? Используйте ответ на этот вопрос для контроля результатов исследований.

Программа исследований

1. Выбрать по таблице 1 исследуемый операционный усилитель в соответствии с номером группы, подгруппы и рабочего места.

Таблица 1. Варианты заданий.

| Гр. Подгр | 1.1 | 1.2 | 2.1 | 2.2 |
|---------------|---------|--------|----------|---------|
| Рабочее место | | | | |
| 1 | AD648A | LM324 | OP-27 | AN6552 |
| 2 | AD741 | LM358 | OPA3581J | AN6553 |
| 3 | HA-2600 | LM675 | OPA3582J | AN6554 |
| 4 | HA-5154 | LM741 | OPA3583 | HA17084 |
| 5 | LF411 | LM759C | OPA3584J | HA17558 |
| 6 | LF412 | TL082 | SMX10114 | HA17741 |
| 7 | LM118 | TL084 | TL082 | M5216 |
| 8 | LM124 | MC1458 | uA771 | M5228 |
| 9 | LM12CLK | MC1558 | uA772 | M5238 |

| | | | | |
|----|-------|---------|--------|----------|
| 10 | LM158 | MC33076 | uA798 | M5260 |
| 11 | LM224 | MC1741 | AN4558 | MB3607 |
| 12 | LM258 | 0P-07 | AN6551 | TA75062P |

2. Создать проект OrCAD и построить схему исследования ОУ в соответствии с рис.4.
3. Задать установки симуляции в соответствии с рис. 3.

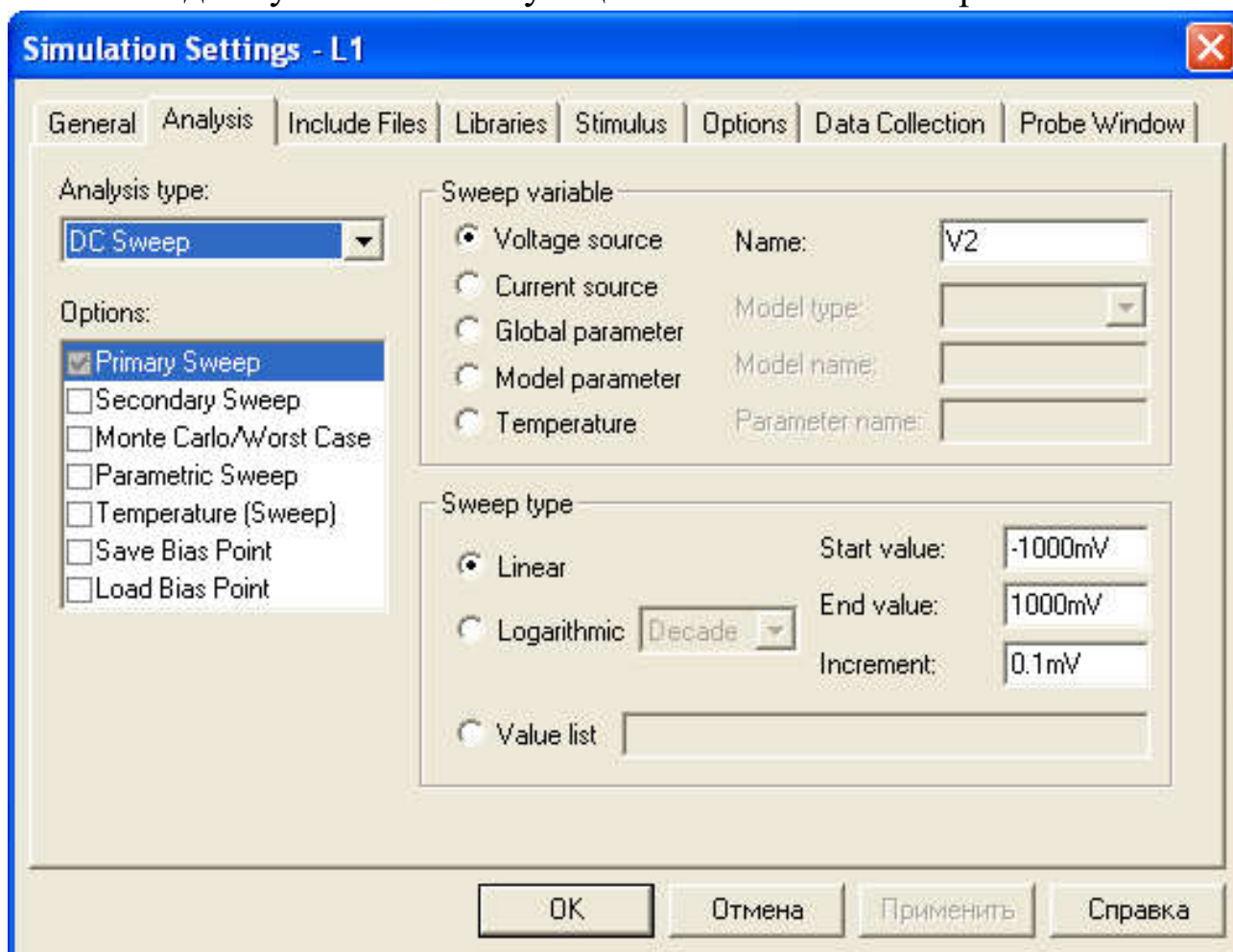


Рисунок 3 – Окно установок режима DC Sweep

4. Получить амплитудную характеристику ОУ, запустив симуляцию.
5. Определить по амплитудной характеристике напряжение смещения ОУ.
6. Определить коэффициент усиления дифференциального сигнала.

7. Определить значения максимального и минимального выходного напряжения ОУ.
8. Определить коэффициент усиления синфазного сигнала.
9. Рассчитать коэффициент ослабления синфазного сигнала.

Схема исследования ОУ представлена на рисунке 4. На входе ОУ включены два источника постоянного напряжения V1 – синфазного напряжения и V2 – дифференциального напряжения. При получении передаточной характеристики дифференциального сигнала напряжение источника V1 устанавливается равным нулю, а V2 – варьируется в интервале, включающем напряжение смещения операционного усилителя. Для усилителей широкого применения этот интервал может быть установлен равным 20мВ.

Для получения передаточной характеристики синфазного сигнала напряжение источника V2 устанавливается равным напряжению смещения, а V1- варьируется в пределах $\pm 1В$.

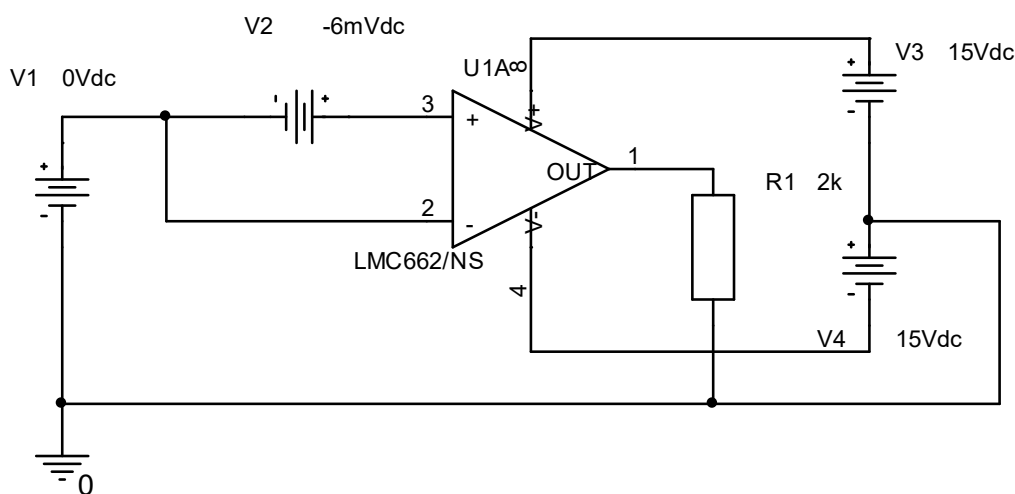


Рисунок 4 – Схема исследования статических характеристик ОУ

Методические указания

После получения амплитудной характеристики по п.4 программы исследований необходимо включить режим лупы и растянуть интересующую часть характеристики, выделив мышкой нужную область.

Для определения дифференциального коэффициента усиления (п.6) на амплитудной характеристике ОУ необходимо выделить линейный участок рабочей области и, задавшись приращением входного напряжения $\Delta U_{\text{вх дф}}$, измерить соответствующее приращение выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$. Коэффициент усиления дифференциального сигнала определяется как:

$$K_{\text{и сф}} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх дф}} \quad (5)$$

Для определения коэффициента усиления синфазного сигнала (п.8) установить напряжение источника V2 равным напряжению смещения ОУ. В установках симуляции заменить имя источника V2 на V1. Снять амплитудную характеристику для синфазного сигнала и по ней вычислить коэффициент усиления синфазного сигнала аналогично вычислению коэффициента усиления дифференциального сигнала.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала (п.9) вычисляется по выражению (3).

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- содержание;
- наименование работы и цель исследований;
- схему исследования ОУ;
- результаты по п.4-п.9 программы исследований, включая передаточные характеристики дифференциального и синфазного сигналов;
- анализ результатов, полученных в п.4-п.9 и их сопоставление с типовыми характеристиками ОУ широкого применения;
- перечень источников, использованных при выполнении работы.

Контрольные вопросы

1. С какой целью операционный усилитель питается от двух источников?
2. Относительно какой точки схемы подаются входные и снимается выходное напряжение?
3. Как определить инвертирующий и неинвертирующий входы усилителя?
4. Какие дополнительные выводы могут использоваться в операционных усилителях, помимо входных, выходного и выводов питания?
5. Почему максимальные значения выходных напряжений ОУ не достигают величин напряжения питания?
6. При нулевых входных напряжениях входные токи не равны нулю. Чем это вызвано?
7. Какие причины приводят к отличию синфазного коэффициента усиления от нуля?

8 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Цель работы

- Изучение приёмов и приобретение навыков исследования динамических характеристик электронных устройств в САПР ORCAD.
- Изучение динамических характеристик и параметров операционных усилителей.

Исследование электронных устройств на переменном токе в среде САПР OrCAD

Один из способов изучения, оптимизации, настройки аналоговых электронных устройств – изучение временных диаграмм сигналов, проходящих через устройство. Основным прибором, используемым для этих целей, является электронный осциллограф. При симуляции электронных устройств в среде САПР OrCAD временные диаграммы могут быть получены в режиме «**Time Domain**».

В качестве управляемых параметров режима в окне «**Simulation Setting**» необходимо установить время исследования, задержку начала запоминания сигнала и максимальный шаг временного разрешения. Рядом с вводимой цифрой без пробела следует указать единицу измерения времени: ns – наносекунда, us – микросекунда, ms – миллисекунда, s – секунда (можно не указывать).

Величина времени измерения увязывается с продолжительностью или периодичностью тестового сигнала, подаваемого на входы устройства и скоростью переходных процессов в нём. Обычно время измерения равно нескольким периодам периодического тестового сигнала. Максимальный шаг по времени определяет степень детализации получаемых сигналов. Малый шаг повышает

точность исследований, но одновременно увеличивает время симуляции (иногда до неприемлемых значений).

Временные диаграммы позволяют оценить длительности фронта и спада импульсных сигналов, амплитуду импульса, величину выброса, времени установления и другие параметры сигналов. В этом режиме можно наблюдать одновременно несколько сигналов. Для этого в нужных точках исследуемых схем следует установить вольтметры или амперметры. При этом дополнительно можно оценить фазовые соотношения сигналов или временные задержки.

Изменяя частоту тестового синусоидального сигнала, можно построить зависимость выходного напряжения или коэффициента передачи от частоты – амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Однако это можно сделать более естественным способом – автоматически изменяя частоту входного сигнала и фиксируя выходной сигнал для каждого значения частоты. Такой режим называется режимом частотного сканирования (сweeping) – «**АС Sweep**». Режим похож на рассмотренный ранее режим сканирования на постоянном токе, но изменяемым параметром входного сигнала является его частота (рисунок 1). В этом режиме можно управлять начальным и конечным значением частоты сканирования, а также количеством отсчётов в пределах декады (т.е. шагом по частоте). Масштаб частоты может быть линейным или логарифмическим.

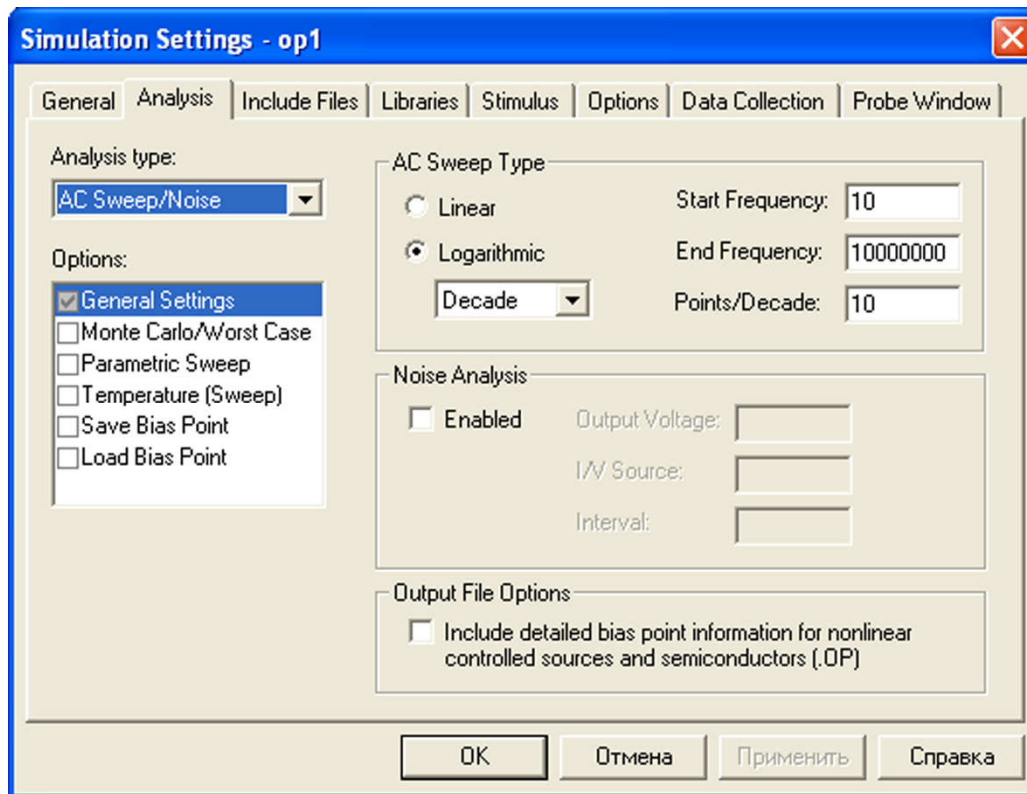


Рисунок 1 – Режим частотного сканирования

Если необходимо получить логарифмический масштаб и по оси амплитуд, то это реализуется непосредственно на полученной диаграмме. Щелчком вне поля графика с внешней стороны нужной оси (вертикальной или горизонтальной) вызывается окно настроек «Axis Settings» и выбирается логарифмический масштаб отображения (**Log**).

Динамические характеристики и параметры ОУ

Динамические свойства ОУ определяются видом амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и такими параметрами как - максимальная скорость нарастания выходного напряжения [В/мкс] и время установления выходного напряжения с заданной точностью $t_{уст}$.

Вид АЧХ операционного усилителя представлен на рис. 2.

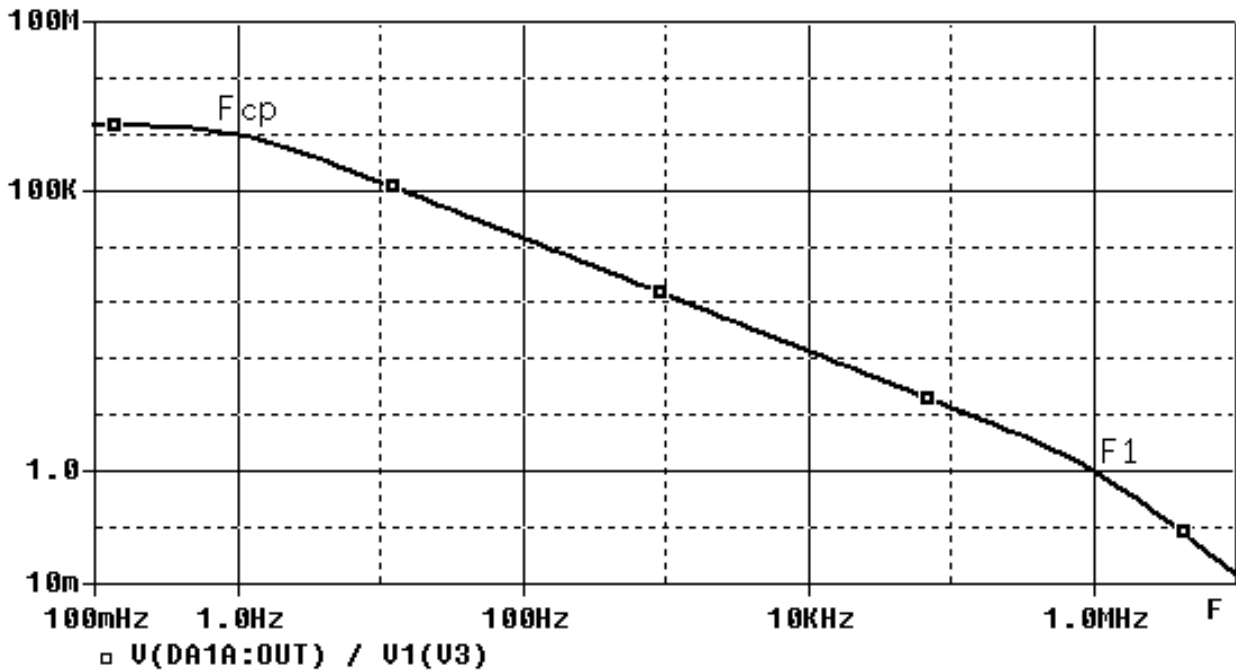


Рисунок 2 – АЧХ типового операционного усилителя.

На диаграмме можно выделить две характерные точки. Первая соответствует частоте среза F_{cp} . На этой частоте коэффициент усиления ОУ уменьшается на 3 дБ. Вторая точка соответствует частоте единичного усиления ОУ – F_1 .

На частоте выше частоты среза f_{cp} усиление падает с примерно постоянной скоростью 20дБ/дек до частоты единичного усиления f_1 . Такая характеристика гарантирует устойчивость ОУ при любой глубине отрицательной обратной связи. При этом выходное напряжение отстаёт по фазе от входного на угол 90-135°. Усиление операционного усилителя на любой частоте f в диапазоне от f_{cp} до f_1 можно оценить как:

$$K = f_1/f. \quad (1)$$

Так как в большинстве устройств операционный усилитель работает с обратной связью, то это означает ослабление обратной связи и падение точности преобразования сигналов с ростом частоты.

Максимальное значение выходного сигнала современных операционных усилителей для положительных и отрицательных сигналов по абсолютной величине немного меньше соответствующих напряжений питания. Однако для сигналов переменного тока

максимальное значение может не достигаться. Лимитирующим фактором во многих случаях оказывается **максимальная скорость нарастания выходного напряжения** операционного усилителя ρ . Она не зависит от глубины обратной связи, охватывающей усилитель. Поэтому измерение этого параметра допустимо в схеме с отрицательной обратной связью.

Дополнительным параметром, часто нормируемым производителем, является «**полоса полной мощности**» операционного усилителя. Она характеризуется значением частоты, на которой максимальная мощность неискажённого синусоидального сигнала уменьшается в 2 раза по сравнению с низкими частотами.

При обработке импульсных сигналов качество усилителя характеризуют **временем установления выходного сигнала** с заданной точностью. Под временем установления **Туст** понимают временной интервал, отсчитываемый от момента подачи ступенчатого входного сигнала до момента последнего вхождения выходного напряжения в коридор ошибок. Этот параметр зависит от глубины обратной связи, характера и величины нагрузки. Поэтому производитель операционного усилителя всегда оговаривает условия измерения.

Подготовка к лабораторной работе

Изучить основные динамические характеристики, параметры операционных усилителей и способы их измерения. Проанализировать значения основных динамических параметров операционных усилителей, относящихся к стандартным, быстродействующим и прецизионным. Составить представление о диапазонах значений этих параметров в зависимости от класса операционного усилителя. Для самоконтроля ответить на прилагаемые вопросы.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется частотой среза операционного усилителя?

2. В какой области частот коэффициент усиления операционного усилителя не зависит от частоты сигнала?
3. Какому закону подчиняется функциональная зависимость коэффициента усиления от частоты в области частот, где эта зависимость проявляется (приблизённо)?
4. Чему равен фазовый сдвиг, вносимый операционным усилителем в диапазоне частот от частоты среза до частоты единичного усиления?
5. Объясните проблемы, вызываемые напряжением смещения операционного усилителя, при получении АЧХ операционного усилителя без отрицательной обратной связи.
6. Какие дополнительные проблемы могут возникать при снятии АЧХ в приведенной выше ситуации?
7. Какие требования к длительности фронта и спада входного сигнала прямоугольной формы предъявляются при измерении максимальной скорости нарастания выходного напряжения операционного усилителя?

Программа исследований

1. Выбрать для исследования операционный усилитель в соответствии с работой №1. Создать в среде OrCAD схему для получения его АЧХ (рисунок 3).

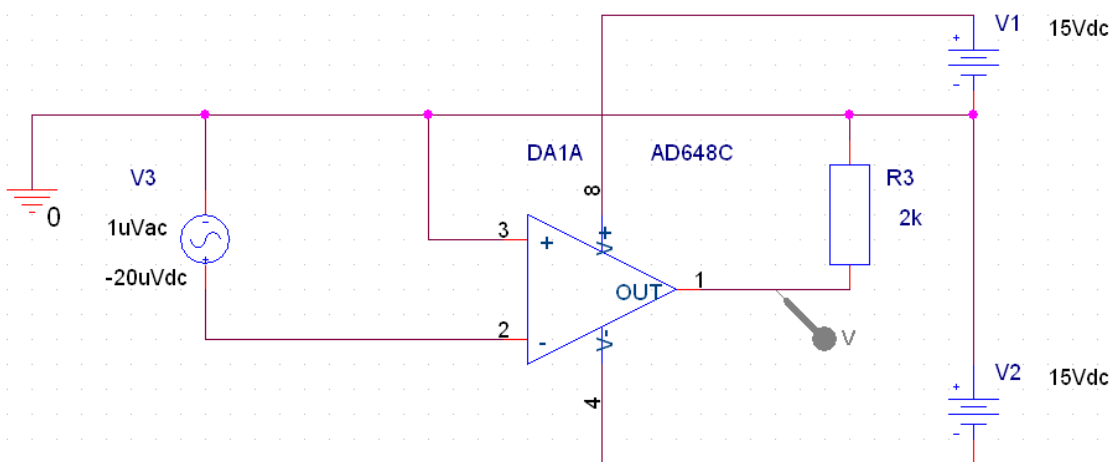


Рисунок 3 – Схема исследования АЧХ операционного усилителя

2. Снять и сохранить АЧХ операционного усилителя.
3. Создать в среде OrCAD схему инвертирующего усилителя с коэффициентом усиления равным единице в соответствии с рисунком 4.
4. Получить АЧХ операционного усилителя. Сопоставить с АЧХ, полученной в п.2 исследований.
5. Определить по полученной АЧХ коэффициент усиления операционного усилителя.
6. Определить по полученной АЧХ частоту среза операционного усилителя.
7. Определить по полученной АЧХ частоту единичного усиления операционного усилителя.
8. Заменить в схеме рис.4. источник входного сигнала на источник прямоугольных импульсов с параметрами:

U_m – амплитуда импульса, В 1;

$t_{фр} = t_{сп}$ – длительности фронта и спада, нс 10;

$t_{и}$ – длительность импульса, мкс 10;

T – период следования, мкс 20.

Определить максимальную скорость нарастания выходного сигнала ОУ.

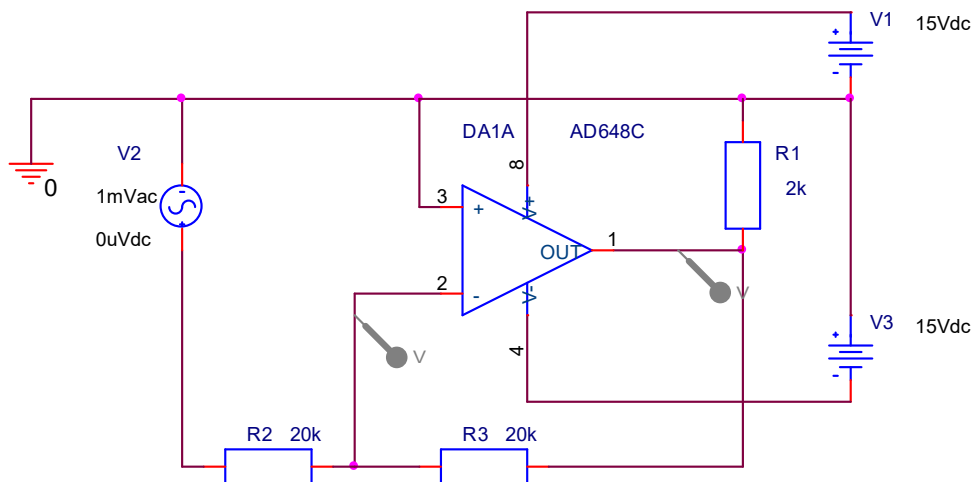


Рисунок 4 – Схема исследования динамических характеристик и параметров операционного усилителя при отрицательной обратной связи

Методические указания

При получении АЧХ по п.2. программы исследований необходимо установить величину напряжения постоянной составляющей равной величине напряжения смещения операционного усилителя. Исследования необходимо начинать с режима получения временных диаграмм. В процессе измерений может потребоваться коррекция напряжения смещения. При этом следует добиться малой величины постоянной составляющей выходного напряжения (в пределах 1-2В) применяя метод итераций. Затем следует перейти в режим частотного сканирования «AC Sweep», установить нижнюю и верхнюю границы частотного диапазона 1 Гц и 10 МГц и снять АЧХ.

При получении АЧХ по п.4. программы исследований необходимо сразу установить режим «AC Sweep». После запуска симуляции и получения АЧХ необходимо в соответствии с рисунком 5 вначале удалить все текущие диаграммы, а затем добавить новую диаграмму, представляющую собой зависимость коэффициента передачи от частоты.

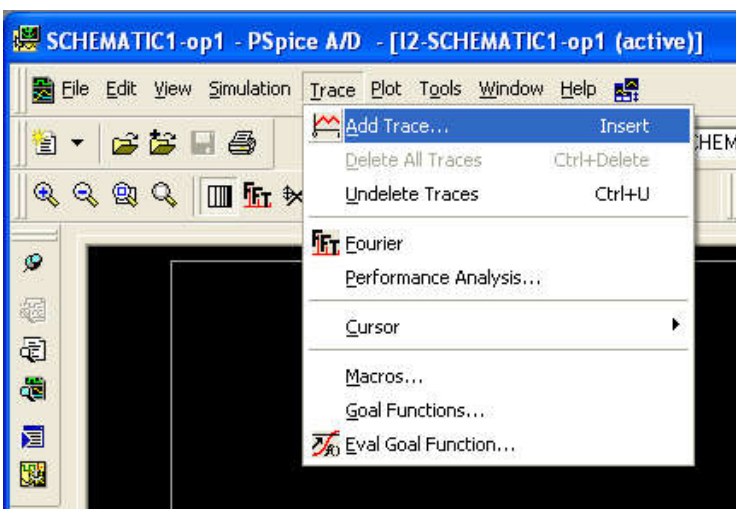


Рисунок 5 – Добавление новой диа-

Для построения новой диаграммы в окне «Add-Traces» необходимо в левом списке напряжений выбрать выходное напряжение, в правом списке выбрать операцию деления, а затем делитель в виде напряжения на инвертирующем входе опе-

граммы.

рационального усилителя
(рисунок 6).

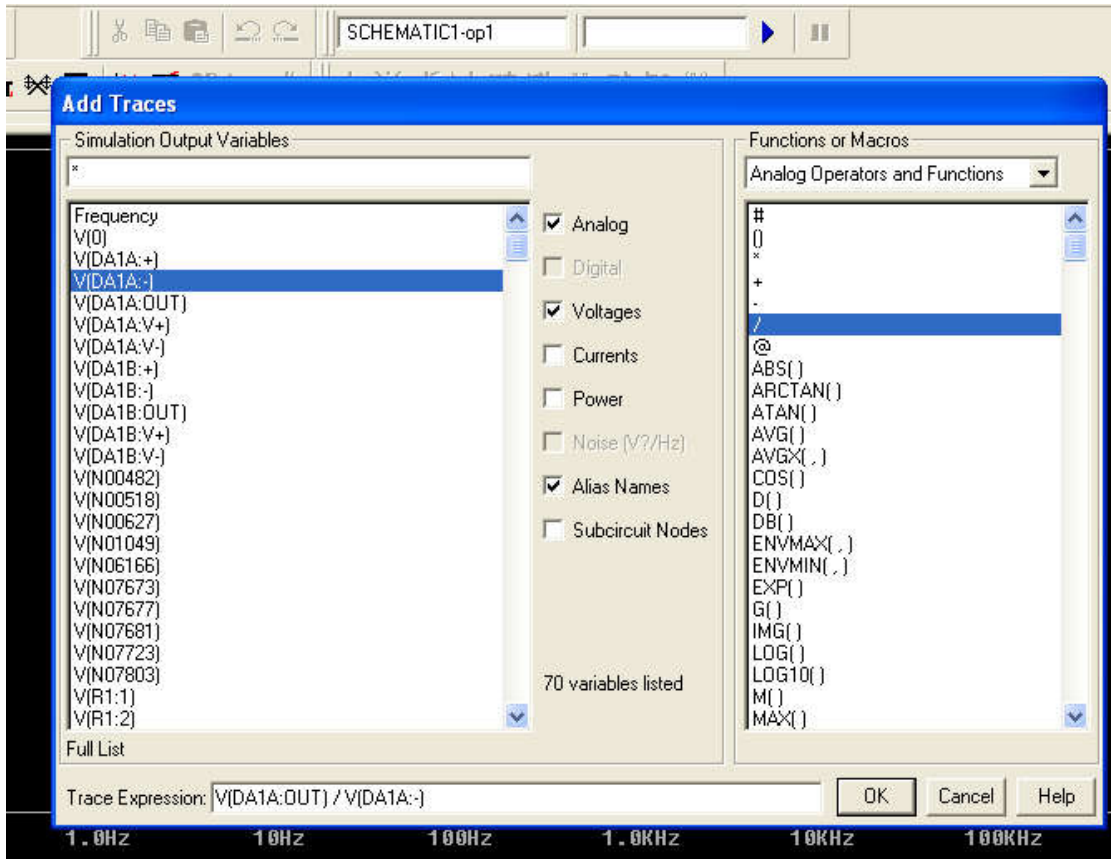


Рисунок 6 - Настройка вида новой диаграммы

После завершения настройки нажать «ОК». При сопоставлении двух вариантов АЧХ сравнить единицы измерения, положение точек перегиба АЧХ и скорости спада. Есть ли влияние отрицательной обратной связи на АЧХ и почему? Эквивалентны ли полученные результаты? В каком случае требуются меньшие затраты на получение АЧХ?

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

10. титульный лист;
11. содержание;
12. наименование работы и цель исследований;

13. схемы исследования ОУ;
14. результаты по п.1 – п.9 программы исследований, в т.ч. сравнительный анализ методов исследования АЧХ;
15. перечень источников, использованных при выполнении работы.

При подготовке к защите следует проконтролировать себя по прилагаемым ниже контрольным вопросам.

Контрольные вопросы

1. Какие факторы влияют на вид АЧХ операционного усилителя?
2. Может ли привести к изменению вида АЧХ некомпенсированное напряжение смещения ОУ?
3. В чём состоит преимущество метода исследования АЧХ в схеме с обратной связью?
4. Чем отличаются АЧХ, полученные в п.2 п.4 программы исследований?
5. Сопоставьте АЧХ интегрирующей RC-цепи и АЧХ операционного усилителя. В чём их схожесть и различие?
6. Каков вид АЧХ одиночного усилительного каскада с общим эмиттером?
7. Какими схемотехническими средствами достигается вид АЧХ, присущий абсолютно устойчивым операционным усилителям?
8. Какие причины приводят к ограничению скорости изменения сигнала на выходе операционного усилителя?
9. Известны частота и амплитуда синусоидального напряжения на выходе операционного усилителя. По каким параметрам выбирается операционный усилитель способный обеспечить минимальные искажения указанного сигнала?
10. Требуется усилить прямоугольные импульсы с заданной длительностью фронта и спада. Влияет ли на требования к максимальной скорости нарастания операционного усилителя

амплитуда усиленных импульсов на выходе усилителя, необходимая величина коэффициента усиления, амплитуда входных импульсов? Ответ обосновать.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григораш О.В. Электротехника и Электроника [Текст]: учебник –Ростов н/Д.: Феникс 2008 г.- 462 с. (70 экз.)
2. М.В. Бобырь, В.И. Иванов, В. С. Титов, А.С. Ястребов. Электротехника и электроника [Текст] : учебное пособие : в 2 кн. Кн. 2 : Электроника. - Курск : КурскГТУ, 2009. - 240 с (59 экз.)
3. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника [Текст]: учебное пособие. - 2-е изд., стер. - М. : Академия, 2008. - 400 с. (5 экз.)
4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника [Текст]: учебник. – 2-е изд. стер. - М. : Альянс, 2008. - 496 с. (100 экз.).