

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам

по дисциплине «Электроника и электротехника»

для студентов специальностей

1 – 37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей»

1 – 37 01 07 – «Автосервис»

УДК 621.382(075.8)

Представлен цикл из шести лабораторных работ, в которых изучаются характеристики основных электронных приборов и принципы построения наиболее широко используемых электронных устройств на их основе. Лабораторные работы выполняются с использованием системы схемотехнического моделирования *Electronics Workbench*. Материалы по каждой работе содержат краткие теоретические сведения, порядок выполнения работы и контрольные вопросы.

Лабораторные работы соответствуют программе дисциплины «Электроника и электротехника» для студентов специальностей 1-37 01 06 – «Техническая эксплуатация автомобилей» и 1-37 01 07 – «Автосервис».

Составители: А.С. Смаль, старший преподаватель,
Т.В. Тромза, ассистент.

Рецензент: Г.А. Ковалевич, директор ОАО «Брестский радиотехнический завод»

Общие требования к выполнению работ и оформлению отчёта

Лабораторные работы выполняются студентами в порядке нумерации. Поскольку использование компьютеров позволяет выполнять работы фронтальным методом, каждая работа выполняется после прочтения соответствующего материала на лекциях. Это даёт возможность использовать конспект лекций при подготовке к лабораторным работам.

К очередной работе студент должен готовиться самостоятельно и заблаговременно, используя методические указания, рекомендуемую литературу и конспект лекций. В начале каждого занятия преподаватель опрашивает студентов, проверяя их подготовку.

При подготовке к работе следует сформировать структуру отчёта, т. е. записать наименование и цель работы, а также выполняемые задания по пунктам. Если в заданиях предусмотрены предварительные расчёты, необходимые для последующего моделирования или эксперимента, их следует выполнить заранее. В заданиях, предусматривающих построение характеристик устройств или других функциональных зависимостей, необходимо нарисовать заготовки таблиц и оставить место для построения графиков.

По литературе [1,2] необходимо освоить работу с программой *Electronics Workbench*:

- изучить панели инструментов и их назначение;
- научиться выбирать электронные компоненты из библиотек, формировать схемы и подключать необходимые измерительные приборы.

Краткое описание интерфейса программы *Electronics Workbench* и примеры построения и анализа электрических цепей приведены в **Приложении**.

Типы компонентов для исследования и построения схем назначаются преподавателем индивидуально каждому студенту.

Задания по экспериментальной проверке полученных результатов на лабораторном стенде также выдаются индивидуально.

Отчёт по лабораторной работе может быть выполнен либо как электронный документ с представлением в распечатанном виде, либо в рукописном оформлении на листах формата А4. Он должен иметь титульный лист и соответствовать принятым в университете стандартам. При рукописном оформлении все построения выполняются с помощью чертёжных инструментов. Условные обозначения компонентов на схемах должны соответствовать требованиям ГОСТ.

Отчёт должен содержать:

- наименование и цель работы;
- принципиальные схемы исследуемых устройств;
- основные определения, касающиеся исследуемых компонентов и схем;
- основные характеристики, назначение и области применения исследуемых устройств;
- таблицы с результатами измерений;
- графики, выполненные на миллиметровой бумаге либо в распечатанном виде с обязательным нанесением координатной сетки;
- расчёты и формулы, по которым они выполнялись, с необходимыми пояснениями;
- выводы.

Работа должна быть защищена студентом после ее выполнения и оформления отчёта. При подготовке к защите следует использовать контрольные вопросы.

Исследование полупроводниковых диодов и стабилитронов

Цель работы: изучение принципа действия полупроводниковых диодов и стабилитронов; освоение методики получения вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов и расчёта их основных параметров.

1.1 Краткие теоретические сведения

Носителями заряда в полупроводниках являются *электроны* и *дырки*. В чистом полупроводнике их концентрация одинакова. Такой полупроводник обладает *собственной электропроводностью*. Введение *донорной* или *акцепторной* примеси позволяет существенно увеличить концентрацию свободных электронов или дырок и получить соответственно полупроводник с *электронной (n-типа)* или *дырочной (p-типа)* проводимостью. Области указанных типов могут быть созданы в одном кристалле полупроводника. В этом случае между *p-* и *n-* областями формируется граничный слой, который называется *электронно-дырочным переходом* либо, кратко, *p – n-переходом*. Основными свойствами *p – n-перехода* являются:

- сильная зависимость тока от полярности приложенного к переходу напряжения (так называемое *вентильное свойство*, или *односторонняя проводимость*);
- возможность электрического пробоя;
- ёмкость перехода, зависящая от приложенного напряжения.

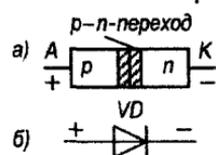


Рисунок 1.1 - Структура (а) и УГО (б) диода

Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на физических явлениях, происходящих в области *p – n-перехода*. Различные полупроводниковые приборы получают созданием в кристалле определённого числа *p – n-переходов*. При этом свойства и характеристики приборов зависят от количества, порядка чередования и размеров *p-* и *n-* областей, а также концентрации примесей в них.

Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор с одним *p – n-переходом*, имеющий два вывода. На рисунке 1.1 показаны структура и условное графическое обозначение (УГО) диода. Вывод от *p-* области называется *анодом*, а вывод от *n-* области *катодом*. В процессе работы к диоду может прикладываться напряжение, как в *прямом* (плюсом к аноду, см. рис. 1.1), так и в *обратном направлении* (плюсом к катоду).

Вольт-амперной характеристикой (ВАХ) называют зависимость тока от напряжения $I = f(U)$ (или зависимость напряжения от тока $U = f(I)$). Типичная ВАХ диода представлена на рисунке 1.2. *Прямая* и *обратная ветви* характеристики соответствуют *прямому* и *обратному включению* диода. Как видно из приведённой ВАХ, обратный ток диода $I_{обр.}$ очень мал, в то время как прямой ток $I_{пр.}$ резко возрастает при незначительном увеличении напряжения, т. е. диод проводит ток преимущественно

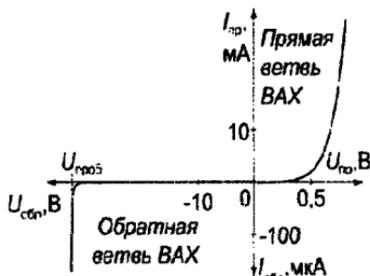


Рисунок 1.2 - ВАХ полупроводникового диода

в одном направлении. Напряжение на диоде при прямом включении $U_{\text{пр}}$ для кремниевых диодов составляет примерно 1 В, для германиевых – 0,5 В. Низкая обратная проводимость сохраняется в широком диапазоне изменения обратного напряжения $U_{\text{обр}}$. При некотором значении $U_{\text{обр}} = U_{\text{проб}}$ происходит электрический пробой $p - n$ -перехода, и он теряет свои запирающие свойства (участок обратной ветви ВАХ, резко уходящий вниз).

Свойства полупроводниковых диодов оценивают рядом параметров. Различают общие параметры, которыми характеризуется любой полупроводниковый диод, и специальные параметры, присущие только отдельным типам диодов.

К общим параметрам диодов относятся:

- *допустимая температура перехода*, $T_{\text{пер.макс}}$ — максимальная температура, при которой не возникает тепловой пробой $p - n$ -перехода;
- *допустимая мощность*, рассеиваемая диодом, $P_{\text{доп.макс}}$;
- *допустимый прямой ток*, $I_{\text{пр.макс}}$ — мощность и ток, при которых температура $p - n$ -перехода достигает значения $T_{\text{пер.макс}}$;
- *допустимое обратное напряжение*, $U_{\text{обр.макс}}$ — напряжение, при котором исключается возможность теплового пробоя $p - n$ -перехода ($U_{\text{обр.макс}} \approx 0,8 U_{\text{проб}}$);
- *прямое сопротивление диода постоянному току* (статическое),

$$R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}}; \quad (1.1)$$

- *прямое дифференциальное сопротивление*,

$$r_{\text{пр}} = \left. \frac{dU_{\text{пр}}}{dI_{\text{пр}}} \right|_{I_{\text{пр}}-\text{задан}} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta I_{\text{пр}}} \right|_{I_{\text{пр}}-\text{задан}}; \quad (1.2)$$

- *обратные статическое*, $R_{\text{обр}}$, *и дифференциальное*, $r_{\text{обр}}$, *сопротивления.*

Значения $R_{\text{пр}}$ и $r_{\text{пр}}$ можно определить приближённо графоаналитическим методом по ВАХ следующим образом. В заданной точке ВАХ (рис. 1.3), например т. А с координатами ($U_{\text{пр}} = 700 \text{ мВ}$; $I_{\text{пр}} = 6 \text{ мА}$), проводят касательную BB' , и определяют значения ΔU и ΔI (соответственно BC и $B'C$). Можно считать, что точка пересечения касательной с осью напряжений (т. В) примерно соответствует напряжению открытия диода $U_{\text{до}}$. По формулам (1.1) и (1.2) соответственно можно найти:

$$R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}} = \frac{(700 \text{ мВ})}{6 \text{ мА}} \approx 170 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{пр}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{BC}{B'C} = \frac{(725 - 665) \text{ мВ}}{(10,4 - 0) \text{ мА}} \approx 6 \text{ Ом}. \quad (1.3)$$

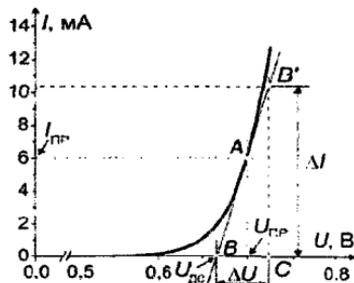


Рисунок 1.3 – К определению статического и динамического сопротивлений диода

Аналогично для обратной ветви ВАХ можно определить значения $R_{\text{обр}}$ и $r_{\text{обр}}$.

Классификация полупроводниковых диодов осуществляется по ряду признаков, важнейшими из которых являются вид исходного полупроводникового материала и назначение. В зависимости от типа исходного материала различают германиевые, кремниевые, селеновые диоды и другие. По назначению диоды делятся на *выпрямительные, универсальные, стабилитроны, варикапы, фотодиоды, светоизлучающие* и другие.

Диоды применяются в качестве дискретных компонентов линейных электронных схем для выпрямления переменного тока (в источниках питания и других функциональных узлах), ограничителей напряжения, смесителей, модуляторов (умножителей), параметрических приборов (стабилизаторов, в схемах температурной компенсации и т. п.), преобразователей оптического излучения в электрический ток и наоборот. В цифровой технике диоды применяются для реализации логических функций, схем смещения и фиксации уровней напряжения. Возможны и другие специальные применения.

Выпрямительные диоды (рис. 1.1, б) предназначены для преобразования переменного тока в постоянный в ограниченном диапазоне частот. Выбор данных диодов осуществляется по *среднему прямому току $I_{\text{пр.ср.}}$ и обратному напряжению $U_{\text{обр.}}$* .

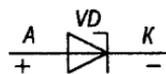


Рисунок 1.4 - УГО стабилитрона

Полупроводниковые стабилитроны (диоды Зенера) (рис.1.4)

используются для стабилизации уровней напряжений в различных схемах (отсюда происходит второе название стабилитронов – *опорные диоды*). Работа стабилитрона осуществляется в режиме пробоя $p-n$ -перехода при обратном включении. Соответствующий участок обратной ветви ВАХ отличается малым $r_{\text{обр.}}$, т.е. слабой зависимостью напряжения от тока. При ограничении обратного тока состояние пробоя в стабилитроне может поддерживаться неограниченно долго. Стабилизацию низковольтного напряжения в пределах (0,5 ... 2) В можно получить при использовании прямой ветви ВАХ диодов, называемых *стабилсторами*.

Основными электрическими параметрами стабилитронов: *напряжение стабилизации $U_{\text{СТ}}$, максимальный и минимальный токи стабилизации $I_{\text{СТ max}}$, $I_{\text{СТ min}}$; максимально допустимая мощность рассеяния $P_{\text{доп.max}}$* .

Основные электрические параметры стабилитронов: *напряжение стабилизации*

$U_{\text{СТ}}$, максимальный и минимальный токи стабилизации $I_{\text{СТ max}}$, $I_{\text{СТ min}}$; максимально допустимая мощность рассеяния $P_{\text{доп.max}}$.

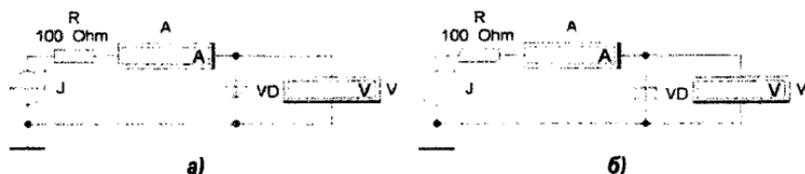


Рисунок 1.5 - Схемы для получения прямой ветви ВАХ диода (а) и обратной ветви ВАХ стабилитрона (б)

1.2 Порядок выполнения

Задание 1: Получение прямой ветви вольт-амперной характеристики диода:

а) собрать схему измерения в соответствии с рис. 1.5, а; задать указанный преподавателем тип диода;

Необходимо соблюдать полярность подключения вольтметра V и амперметра A , отрицательные клеммы которых обозначены более широкой чёрной полосой и могут находиться на любой грани изображения компонента при его вращении.

б) снять зависимость $I_{\text{пр}}(U_{\text{пр}})$ для прямой ветви характеристики, последовательно устанавливая значения тока источника $I_{\text{пр}} = (0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2; 5; 10)$ мА и измеряя соответствующие значения напряжения $U_{\text{пр}}$ (результаты свести в таблицу);

в) построить вольт-амперную характеристику диода $I = f(U)$;

г) рассчитать прямые статическое $R_{\text{пр}}$ и дифференциальное $r_{\text{пр}}$ сопротивления диода в произвольных точках характеристики (см. рис. 1.3 и пример расчёта (1.3)).

Задание 2: Получение обратной ветви вольт-амперной характеристики стабилизатора:

а) собрать схему измерения в соответствии с рис. 1.5, б; задать указанный преподавателем тип стабилизатора;

б) снять зависимость $I_{\text{обр}}(U_{\text{обр}})$ для обратной ветви характеристики, последовательно устанавливая значения тока $I_{\text{обр}} = (0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2; 5; 10; 20)$ мА и измеряя соответствующие значения напряжения $U_{\text{обр}}$ (результаты свести в таблицу);

в) построить вольт-амперную характеристику стабилизатора $I = f(U)$;

г) рассчитать обратные дифференциальное $r_{\text{обр}}$ и статическое $R_{\text{обр}}$ сопротивления на участке пробоя (аналогично пункту г) из Задания 1).

1.3 Контрольные вопросы

1. В чём отличие между собственной и примесной электропроводностью в полупроводниках?

2. Что такое $p - n$ -переход и какими основными свойствами он обладает?

3. Как зависит величина тока, протекающего через $p - n$ -переход, от полярности приложенного к переходу напряжения?

4. Перечислите основные типы диодов и область их применения.

5. Какие основные параметры выпрямительных диодов?

6. В каком режиме работает стабилизатор?

7. Какие основные параметры стабилизаторов?

8. В чём отличие дифференциального сопротивления от статического?

9. Как с помощью ВАХ можно определить дифференциальное сопротивление диода?

Лабораторная работа №2

Исследование биполярного и полевого транзисторов

Цель работы: изучение принципа действия биполярных и полевых транзисторов; освоение методики получения вольт-амперных характеристик транзисторов и расчёта их основных параметров.

2.1 Краткие теоретические сведения

Транзистор – электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним или несколькими электрическими переходами, пригодный для усиления мощности и имеющий три или более выводов. Действие транзисторов основано на управлении движением носителей электрических зарядов в полупроводниковом кристалле.

Транзисторы классифицируют по характеру переноса носителей заряда, по числу и порядку чередования областей $p - n$ -переходов, по мощности и т. д.

По характеру переноса носителей заряда различают транзисторы *биполярные* и *униполярные (полевые)*. В биполярных транзисторах (БТ) физические процессы определяются движением носителей заряда обоих знаков, которые для отдельных областей могут являться неосновными, а в полевых транзисторах (ПТ) — движением основных носителей заряда одного знака.

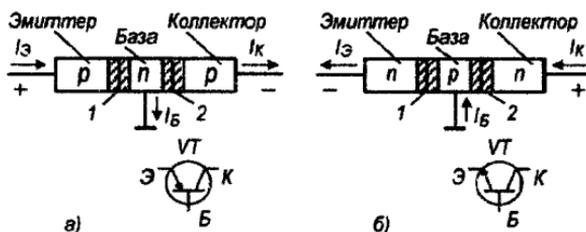


Рисунок 2.1 - Структура биполярных транзисторов и их УГО (внизу): $p - p - p$ типа (а); $n - p - n$ типа (б)
1 - эмиттерный переход; 2 - коллекторный переход

Структура кристалла и УГО данных типов транзисторов представлены на рисунке 2.1. Среднюю область кристалла называют базой (Б), одну крайнюю область — эмиттером (Э), а другую — коллектором (К). Соответственно один переход называется эмиттерным (1) другой — коллекторным (2). Часть базы, находящаяся между запирающими слоями переходов называется активной.

В большинстве выпускаемых биполярных транзисторов площадь коллекторного перехода больше площади эмиттерного, концентрация основных носителей заряда в эмиттере значительно превышает концентрацию основных носителей заряда в базе.

Поскольку БТ включают во входную и выходную цепи с помощью трёх выводов (электродов), то один электрод должен быть общим для обеих цепей. Соответственно различают схемы с *общей базой* (ОБ), с *общим эмиттером* (ОЭ), с *общим коллектором* (ОК), которые приведены на рисунке 2.2.

В зависимости от полярности и величины напряжений во входной и выходной цепях возможны следующие режимы работы БТ:

отсечки — напряжения на обоих переходах обратные (транзистор закрыт);

насыщения — напряжения на обоих переходах прямые (транзистор открыт);

активный — напряжение на эмиттерном переходе прямое, а на коллекторном — обратное (транзистор открыт);

инверсный — напряжение на коллекторном переходе прямое, а на эмиттерном — обратное (транзистор открыт).

На рисунке 2.2 полярность электродов указана для активного режима.

Рассмотрим принцип работы транзистора $n - p - n$ типа в активном режиме. Под действием прямого напряжения, приложенного к эмиттерному переходу, основные носи-

Биполярный транзистор

— полупроводниковый прибор, содержащий три полупроводниковые области с чередующимися типами проводимости, разделённые двумя взаимодействующими $p - n$ -переходами. В зависимости от порядка чередования областей различают транзисторы типа $p - n - p$ или $n - p - n$.

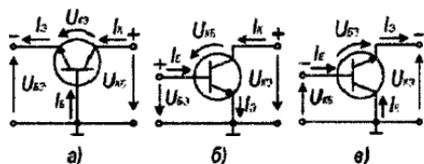


Рисунок 2.2 - Схемы включения БТ: ОБ (а); ОЭ (б); ОК (в)

тели заряда (электроны) из эмиттера инжектируются в базовую область. Поскольку ширина базы мала, а концентрация дырок в ней намного меньше количества инжектируемых электронов, то большая часть электронов за счёт диффузии и напряжения, приложенного к коллекторному переходу, попадает в область коллектора. В результате в цепи коллектора возникает ток. Небольшая часть электронов в области базы рекомбинирует с дырками. Восполнение рекомбинировавших дырок происходит за счёт тока в цепи базы. Увеличение напряжения и тока входной цепи приводит к увеличению инжекции электронов в базу и соответственно — выходного тока. Таким образом, с помощью входной цепи можно управлять током выходной цепи, обеспечивая функцию усиления сигнала.

Работа транзистора $p-n-p$ типа происходит аналогичным образом. Отличие заключается только в том, что подключаемые внешние источники напряжения имеют противоположную полярность (сравните рис. 2.1, а и 2.2).

Статические характеристики биполярного транзистора – это графические зависимости между его напряжениями и токами. Для построения характеристик из четырех переменных две выражают как функции оставшихся. Это можно сделать шестью способами. Соответственно существует шесть систем функциональной связи (характеристик). Наиболее часто используется система H -параметров, в которой принято

$$\begin{cases} U_{\text{ВХ}} = f_1(I_{\text{ВХ}}; U_{\text{ВЫХ}}), \\ I_{\text{ВЫХ}} = f_2(I_{\text{ВХ}}; U_{\text{ВЫХ}}). \end{cases} \quad (2.1)$$

Из (2.1) в статическом режиме можно получить четыре семейства характеристик. Из них на практике обычно используются входная ($U_{\text{ВХ}} = f(I_{\text{ВХ}}) |_{U_{\text{ВЫХ}}=\text{const}}$) и выходная ($I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}}) |_{I_{\text{ВХ}}=\text{const}}$) вольт-амперные характеристики, которые однозначно определяют взаимосвязь между напряжениями и токами транзистора. Внешний вид характеристик зависит от схемы включения транзистора.

Транзистор при конкретной схеме включения может рассматриваться как активный нелинейный четырёхполюсник (рис. 2.3, а). На низких частотах его параметры имеют активный характер. При малых сигналах их можно считать линейными. В этом случае H -параметры переходят в h -параметры, и (2.1) преобразуется к системе линейных уравнений, описывающих изменения напряжений и токов транзистора:

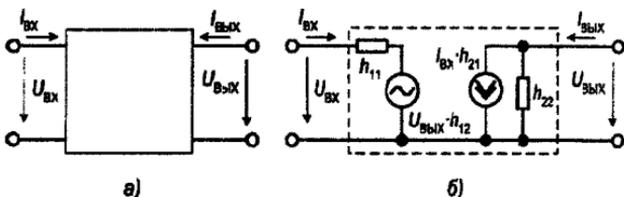


Рисунок 2.3 - Четырёхполюсник (а) и малосигнальная эквивалентная схема БТ в h -параметрах (б)

$$\begin{cases} \Delta U_{\text{ВХ}} = h_{11} \Delta I_{\text{ВХ}} + h_{12} \Delta U_{\text{ВЫХ}}; \\ \Delta I_{\text{ВЫХ}} = h_{21} \Delta I_{\text{ВХ}} + h_{22} \Delta U_{\text{ВЫХ}}, \end{cases} \quad (2.2)$$

где

$$h_{11} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} \right|_{U_{\text{ВЫХ}}=\text{const}} \quad - \text{ дифференциальное входное сопротивление}; \quad (2.3)$$

$$h_{12} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}} \right|_{I_{\text{ВХ}}=\text{const}} \quad - \text{коэффициент обратной передачи по напряжению}; \quad (2.4)$$

$$h_{21} \approx \left. \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} \right|_{U_{\text{ВЫХ}}=\text{const}} \quad - \text{коэффициент прямой передачи тока (усиление по току)}; \quad (2.5)$$

$$h_{22} \approx \left. \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}} \right|_{I_{\text{ВХ}}=\text{const}} \quad - \text{дифференциальная выходная проводимость}. \quad (2.6)$$

В соответствии с выражениями (2.2) – (2.6) биполярный транзистор можно представить в виде малосигнальной эквивалентной схемы, которая показана на рисунке 2.3, б. Эквивалентная схема транзистора в h -параметрах справедлива для любой схемы включения транзистора, отличаться будут только значения h -параметров, зависящие от того, какие токи и напряжения являются входными и выходными, поэтому для каждой схемы включения транзистора их обозначают соответствующими индексами: «б» – для схемы с ОБ, «э» – с ОЭ, «к» – с ОК. Значения h -параметров приводятся в справочниках, их также можно приближённо определить графоаналитическим методом по статическим характеристикам транзисторов (рис. 2.4). Для определения всех h -параметров необходимо иметь не менее двух характеристик каждого семейства (входных и выходных). Параметры рассчитываются по конечным приращениям вблизи рабочей точки транзистора.

В качестве примера рассмотрим определение h -параметров для транзистора, включённого по схеме с ОЭ, с помощью представленных на рисунке 2.4 соответствующих входных (а) и выходных (б) вольт-амперных характеристик.

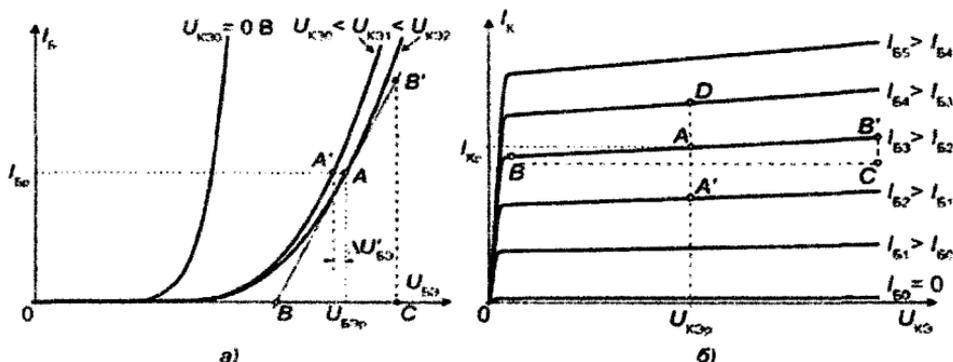


Рисунок 2.4 – Входные (а) и выходные (б) статические характеристики БТ

Для определения параметров $h_{11э}$ и $h_{12э}$ на семействе входных характеристик (рис.2.4, а) задаются рабочей точкой $A(I_{B\text{р.}}, U_{BЭ\text{р.}})$, через которую проводят касательную BB' . Затем строят треугольник CBB' и в соответствии с (2.3) и (2.4) находят:

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{BЭ}}{\Delta I_B} = \frac{BC}{B'C}; \quad h_{12э} = \frac{\Delta U'_{BЭ}}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{AA'}{U_{КЭ2} - U_{КЭ1}} \quad (2.7)$$

Следует отметить, что ввиду малости $\Delta U'_{БЭ} (< 1\text{ мВ})$ определить его значение по входным ВАХ очень сложно, поэтому обычно параметр $h_{12э}$ во внимание не принимают.

Семейство выходных ВАХ (рис. 2.4, б) используют для определения параметров $h_{21э}$ и $h_{22э}$. Задавшись значениями тока $I_{Кр}$ и напряжения $U_{КЭр}$ (рабочая точка А), проводят касательную BB' (на рис. 2.4, б она совпадает с прямолинейным участком ветви ВАХ, соответствующей входному току $I_{ВХ} = I_{БЭ}$), строят треугольник $СВВ'$ и находят, используя соотношения (2.5), (2.6):

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} = \frac{A'D}{I_{Б4} - I_{Б2}}; \quad h_{22э} = \frac{\Delta U'_{К}}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{B'C}{BC} \quad (2.8)$$

Рабочая точка на всех характеристиках должна соответствовать одним и тем же выбранным значениям тока и напряжения. В соответствии с этим требованием необходимо, чтобы $U_{КЭ2} = U_{КЭр}$; $I_{Б3} = I_{Бр}$.

Аналогичным образом определяются h -параметры для схем с ОБ и ОК.

Полевой транзистор (ПТ) — полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем (отсюда и название — *полевой*). Действие полевого транзистора обусловлено носителями заряда одной полярности, поэтому полевые транзисторы называют также *униполярными*.

По способу создания проводящего канала различают полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом, имеющие *объёмный* канал, и со структурой металл — диэлектрик (окисел) — полупроводник (МДП- или МОП-транзисторы), имеющие *приповерхностный* канал (*встроенный* или *индуцированный*). В зависимости от электропроводности полупроводника проводящий канал может быть n - или p - типа.

Полевой транзистор с управляющим переходом (ПТУП) представляет собой пластину полупроводникового материала, в центральной части которого имеется область с проводимостью противоположной проводимости проводящего канала. Электрод, подключённый к этой области, называется *затвором* (З). Между затвором и проводящим каналом образуется $p-n$ -переход, обеднённый слой которого расположен в основном в объёме проводящего канала, имеющего гораздо меньшую концентрацию примеси. На торцах проводящего канала расположены два электрода. Электрод, от которого начинают движение основные носители заряда в канале, называют *истоком* (И), а электрод, к которому движутся основные носители заряда, называют *стоком* (С). На рисунке 2.5 показаны структура ПТУП с проводящим каналом n -типа и условные обозначения ПТУП с проводящими каналами разных типов.

В основе работы ПТУП лежит изменение площади поперечного сечения проводящего канала при подаче на $p-n$ -переход управляющего напряжения ($U_{ЗИ}$), смещающего его в обратном направлении. На рисунке 2.5, а показаны полярности прикладываемых напряжений и направления токов, соответствующие рабочему режиму работы транзистора. При $U_{ЗИ} = 0$ и $U_{СИ} \neq 0$ через проводящий канал протекает ток стока, называемый начальным: $I_{Снач}$.

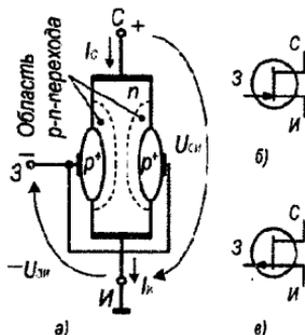
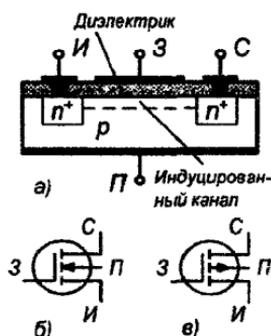


Рисунок 2.5 - Структура (а) и УГО ПТУП с каналом n - (б) и p - типа (в)

При увеличении обратного напряжения $U_{3И}$ увеличивается ширина $p-n$ -перехода и соответственно уменьшается площадь поперечного сечения проводящего канала. Уменьшение площади поперечного сечения проводящего канала влечёт увеличение его сопротивления, что приводит к уменьшению тока стока I_C при неизменном и отличном нуля напряжении между стоком и истоком $U_{СИ}$. В цепи затвора при этом протекает малый обратный ток (входное сопротивление до $10^7 \dots 10^9$ Ом). При некотором обратном напряжении, называемом *напряжением отсечки* ($U_{3И\text{отс.}}$), канал может быть полностью перекрыт, и в цепях стока и истока начнут протекать малые обратные токи. При напряжении $U_{3И} = 0$ площадь поперечного сечения проводящего канала максимальна, а его сопротивление минимально. Прямое напряжение на $p-n$ -переход не подают, так как в этом случае теряется возможность управления током стока, появляется входной ток, что приводит к значительному уменьшению входного сопротивления.

МОП-транзисторы. В МОП-транзисторах электрод затвора изолирован от канала слоем диэлектрика (обычно это окисел — SiO_2), поэтому эти транзисторы называют также *полевыми транзисторами с изолированным затвором (ПТИЗ)*. Благодаря такой структуре входное сопротивление ПТИЗ достигает $10^{12} \dots 10^{15}$ Ом. Различают две разновидности ПТИЗ — с *индуцированным* (наведённым полем) и со *встроенным* каналом.



ПТИЗ с индуцированным каналом n -типа (рис. 2.6, а) содержит две сильно легированные n^+ -области истока (И) и стока (С), созданные в исходной полупроводниковой пластине кремния p -типа, которая называется подложкой (П). Поверхность подложки покрыта слоем диэлектрика, поверх которого нанесена тонкая металлическая плёнка (обычно из алюминия), служащая затвором (З).

Высоколегированные n^+ -области истока и стока с полупроводником подложки p -типа образуют $p-n$ -переходы, поэтому при любой полярности напряжения между стоком и истоком один из этих переходов оказывается включённым в обратном направлении и препятствует протеканию тока канала, следовательно, между истоком и стоком отсутствует токопроводящий канал. При подаче на затвор положительного относительно истока напряжения к поверхности полупроводника притягиваются дополнительные электроны, а дырки выталкиваются из этой области — подзатворная область *обогащается* электронами. При некотором положительном *пороговом напряжении* ($U_{3И\text{пор.}} > 0$) на затворе относительно истока в приповерхностной области подложки p -типа образуется (*индуцируется*) слой с инверсным типом проводимости (на рисунке 2.6, а показан штриховой линией). Этот слой соединяет n^+ -области истока и стока и формирует между ними токопроводящий канал n -типа.

ПТИЗ со встроенным каналом конструктивно отличается от транзистора с индуцированным каналом тем, что канал формируется на этапе изготовления транзистора путём легирования транзистора. На рис. 2.7 а показана структура ПТИЗ с каналом n -типа. По принципу действия этот транзистор аналогичен ПТИЗ с индуцированным каналом. Однако, ввиду наличия проводящего канала, через транзистор будет протекать ток $I_{C\text{нач}}$ даже при ну-

левой разности потенциалов между истоком и затвором. При отрицательном напряжении между истоком и затвором ($U_{ЗИ} < 0$) поле затвора выталкивает электроны из канала в подложку p -типа. Канал обедняется электронами, его сопротивление увеличивается, и ток стока уменьшается. Такой режим называют *режимом обеднения*. Если же на затвор подаётся напряжение $U_{ЗИ} > 0$, то подзатворная область обогащается электронами, и ток стока увеличивается.

Подобно биполярным транзисторам полевой транзистор можно включить по одной из трёх схем: с общим истоком (ОИ — аналогична схеме с ОЭ), с общим стоком (ОС — аналогична схеме с ОК) и общим затвором (ОЗ — аналогична схеме с ОБ). Последняя схема (ОЗ) в усилительных устройствах практически не используется ввиду малости входного сопротивления и отсутствия усиления тока. Наибольшее усиление мощности обеспечивает схема с ОИ. Схема с ОС обладает повышенным входным сопротивлением и чаще всего применяется в качестве буферного каскада.

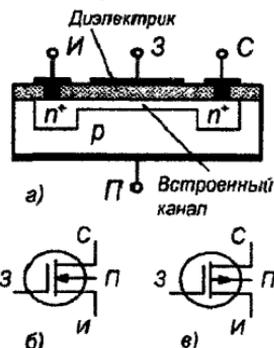


Рисунок 2.7 - Структура (а) и УГО ПТИЗ со встроенным каналом p - (б) и p - типа (в)

Статические вольт-амперные характеристики полевого транзистора.

Для анализа работы полевых транзисторов используют следующие характеристики:

стоко-затворные – зависимость выходного тока (I_C) от входного напряжения ($U_{ЗИ}$) при заданном напряжении между стоком и истоком: $I_C = f(U_{ЗИ})|_{U_{СИ}=\text{const}}$;

выходные – зависимость выходного тока (I_C) от выходного напряжения ($U_{СИ}$) при заданном напряжении между затвором и истоком: $I_C = f(U_{СИ})|_{U_{ЗИ}=\text{const}}$.

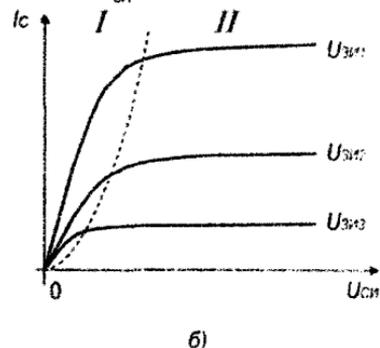
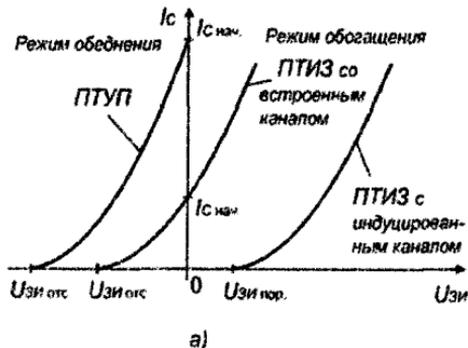


Рисунок 2.8 - Стоко-затворная (а) и выходные (б) характеристики ПТ различных типов с каналом p -типа

На рисунке 2.8 приведены вольт-амперные характеристики полевых транзисторов с различными структурами с проводящим каналом p -типа. Из рисунка 2.8, а видно, что ПТУП может работать только в режиме обеднения проводящего канала носителями заряда, ПТИЗ с индуцированным каналом работает только в режиме обогащения, а ПТИЗ со встроенным каналом может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения. Выходные ВАХ (рис. 2.8, б) полевых транзисторов различных типов по форме подобны. Отличие состоит в следующем:

- для ПТУП $U_{\text{зи}1} = 0$, а $U_{\text{зи}3} = U_{\text{зи отс.}} < 0$;
- для ПТИЗ со встроенным каналом $U_{\text{зи}1} > 0$, $U_{\text{зи}2} = 0$, $U_{\text{зи}3} = U_{\text{зи отс.}} < 0$;
- для ПТИЗ с индуцированным каналом $U_{\text{зи}3} = U_{\text{зи пор.}} > 0$, $U_{\text{зи}1} > U_{\text{зи}2} > U_{\text{зи}3}$.

На выходных ВАХ (рис. 2.8, б) можно выделить две рабочие области слева (*I*) и справа (*II*) от штриховой линии. Область *I* называют крутой областью характеристики; область *II* – пологой, или областью насыщения. В крутой области транзистор может быть использован как омическое управляемое напряжением сопротивление. В усилительных каскадах транзистор работает на пологом участке характеристики.

К основным параметрам полевых транзисторов относят:

- *крутизну* характеристики, характеризующую управляющее действие затвора:

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{\text{зи}}} \right|_{U_{\text{си}}=\text{const}} ; \quad (2.9)$$

- дифференциальное сопротивление проводящего канала полевого транзистора:

$$r_{\text{си}} = \left. \frac{dU_{\text{си}}}{dI_C} \right|_{U_{\text{зи}}=\text{const}} ; \quad (2.10)$$

- *коэффициент усиления*, характеризующий усилительные свойства ПТ:

$$\mu = \left. \frac{dU_{\text{си}}}{dU_{\text{зи}}} \right|_{I_C=\text{const}} , \quad (2.11)$$

который связан с крутизной характеристики и дифференциальным сопротивлением проводящего канала полевого транзистора соотношением

$$\mu = -S r_{\text{си}}. \quad (2.12)$$

Значения основных параметров полевых транзисторов приводятся в справочниках. В справочниках также приводят для ПТУП и ПТИЗ со встроенным каналом значения начального тока стока $I_{\text{с нач.}}$ и напряжения отсечки $U_{\text{зи отс.}}$, а для ПТИЗ с индуцированным каналом — значение порогового напряжения $U_{\text{зи пор.}}$. Параметры полевого транзистора можно приближённо определить графоаналитическим методом по ВАХ. В этом случае их рассчитывают по конечным приращениям вблизи рабочей точки.

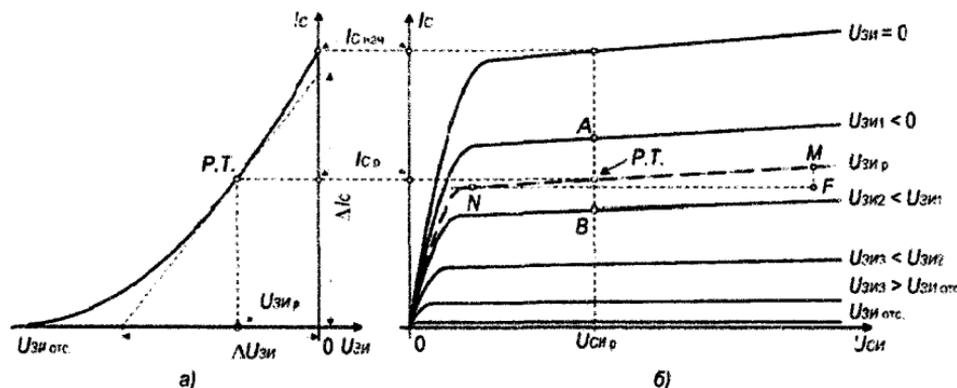


Рисунок 2.9 - Стоко-затворная (а) и выходные (б) ВАХ ПТУП

Рассмотрим на примере ПТУП определение дифференциальных параметров с помощью вольт-амперных характеристик, приведённых на рисунке 2.9. Отметим на стокозатворной ВАХ рабочую точку (*Р.Т.*) и проведём через неё касательную (штриховая линия на рис. 2.9, а), которая отсечёт на оси напряжений отрезок $\Delta U_{3и}$, а на оси токов — отрезок ΔI_C . Тогда, используя выражение (2.9), можно приближённо найти крутизну ПТУП в рабочей точке:

$$S \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3и}} \quad (2.13)$$

Крутизну можно определить также с помощью выходной ВАХ (рис. 2.9, б), если знаем значения токов стока в точках *A* и *B*, а также значения напряжений $U_{3и1}$ и $U_{3и2}$:

$$S \approx \frac{I_A - I_B}{U_{3и1} - U_{3и2}} \quad (2.14)$$

Теоретически крутизну можно определить, учитывая, что зависимость тока стока I_C ПТУП от напряжения $U_{3и}$ достаточно хорошо описывается выражением

$$I_C = I_{C \text{ нач.}} \left(1 - \frac{U_{3и}}{U_{3и \text{ отс.}}} \right)^2 \quad (2.15)$$

где $I_{C \text{ нач.}}$ — начальный ток стока при $U_{3и} = 0$; $U_{3и \text{ отс.}}$ — напряжение запираения транзистора. Дифференцируя (2.15) в соответствии с (2.9), получаем

$$S = \frac{2I_{C \text{ нач.}}}{|U_{3и \text{ отс.}}|} \left(1 - \frac{U_{3и}}{U_{3и \text{ отс.}}} \right) \quad (2.16)$$

Дифференциальное сопротивление проводящего канала полевого транзистора $r_{си}$ определяют по выходным ВАХ. Для этого к ветви выходной ВАХ, соответствующей заданному напряжению $U_{3и \text{ р.}}$, проводят касательную (прямая *MN* на рис. 2.9, б), строят прямоугольный треугольник (*MNF*) и определяют разность напряжений $\Delta U_{си}$ (*NF*) и токов ΔI_C (*MF*), откуда с учётом (2.10)

$$r_{си} \approx \frac{NF}{MF} = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_C} \quad (2.17)$$

2.2 Порядок выполнения

Задание 1: Получение входных и выходных вольт-амперных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером:

а) собрать в соответствии с рисунком 2.10 схему для получения ВАХ биполярного транзистора и задать указанный преподавателем тип исследуемого транзистора.

Обращайте внимание на полярность подключения источников тока (*I_Б*) и напряжения (*U_{кэ}*), вольтметра *V* и амперметра *A*, отрицательные клеммы которых обозначены более широкой чёрной полосой.

б) установить значение выходного напряжения $U_{кэ} = 5 \text{ В}$; последовательно изменяя

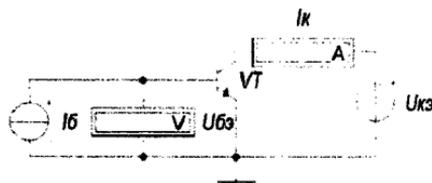


Рисунок 2.10 - Схема для получения входных и выходных ВАХ БТ

значение входного тока $I_B = (0; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; \dots)$ мкА (увеличивать ток базы до тех пор, пока выходной ток коллектора I_K не достигнет $10 \dots 15$ мА), измерять соответствующие значения входного напряжения $U_{БЭ}$; результаты измерения свести в таблицу;

е) при трёх значениях входного тока $I_B \approx (0,25; 0,50; 0,75) \times I_{B \max}$ (где $I_{B \max}$ — максимальное значение тока базы, установленного в предыдущем пункте) снять зависимости $I_K(U_{КЭ})|_{I_B = \text{const}}$; для этого, последовательно устанавливая значения выходного напряжения $U_{КЭ} = (0; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2; 5; 15)$ В, измерить соответствующие значения тока I_K ; результаты измерения свести в таблицу;

г) построить входные $I_B(U_{БЭ})|_{U_{КЭ} = \text{const}}$ и выходные $I_K(U_{КЭ})|_{I_B = \text{const}}$ ВАХ БТ; рассчитать h -параметры в произвольно выбранной рабочей точке, при этом рабочая точка на всех характеристиках должна соответствовать одним и тем же выбранным значениям тока и напряжения (см. рис. 2.4 и примеры расчёта (2.7), (2.8)).

Задание 2: Получение статических вольт-амперных характеристик полевого транзистора с управляющим p-n-переходом:

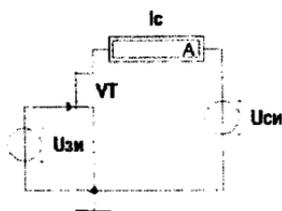


Рисунок 2.11 - Схема для получения ВАХ ПТУП

а) собрать схему (рис.2.11) для получения ВАХ полевого транзистора, указанного преподавателем;

Обращайте внимание на полярность подключения источников напряжения ($U_{зи}$ и $U_{си}$) и амперметра А.

б) установить значение напряжения $U_{СИ} = (6 \dots 8)$ В; изменяя напряжение $U_{ЗИ}$, определить напряжение отсечки $U_{ЗИ \text{ отс.}}$, при котором ток стока I_C станет менее 1 мкА;

в) изменяя напряжение $U_{ЗИ}$ от $U_{ЗИ \text{ отс.}}$ до 0 В ($8 \dots 10$ значений), измерять соответствующие значения тока стока

I_C ; результаты измерений свести в таблицу;

г) при трёх фиксированных значениях $U_{ЗИ} \approx (0; 0,3; 0,6) \times U_{ЗИ \text{ отс.}}$ (согласовать с преподавателем) снять зависимость $I_C(U_{СИ})|_{U_{ЗИ} = \text{const}}$, последовательно устанавливая значения напряжения $U_{СИ} = (0; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2; 5; 15)$ В и измеряя соответствующие значения I_C ; результаты свести в таблицу;

д) построить стоко-затворную $I_C(U_{ЗИ})|_{U_{СИ} = \text{const}}$ и выходные $I_C(U_{СИ})|_{U_{ЗИ} = \text{const}}$ ВАХ ПТ, с помощью которых в произвольно выбранной рабочей точке (см. рис. 2.9) определить крутизну S (2.13), дифференциальное сопротивление $r_{СИ}$ (2.17) и коэффициент усиления μ (2.12) полевого транзистора; рассчитать также крутизну S , используя формулы (2.14), (2.16), и сравнить с полученным ранее значением; сделать выводы.

2.3 Контрольные вопросы

1. Что называют биполярным транзистором?
2. Каков принцип действия биполярных транзисторов?
3. Чем различаются режимы работы биполярного транзистора?
4. Перечислите схемы включения биполярных транзисторов, укажите особенности использования этих схем?
5. Что собой представляют статические характеристики биполярных транзисторов?
6. Какой физический смысл имеют h -параметры биполярных транзисторов?

7. Как по вольт-амперным характеристикам определяются h -параметры БТ?
8. Что такое полевой транзистор?
9. В чём отличие полевых транзисторов от биполярных?
10. Каков принцип действия полевых транзисторов разных типов?
11. Перечислите схемы включения полевых транзисторов, укажите особенности использования этих схем?
12. Что собой представляют статические характеристики полевых транзисторов?
13. Как по вольт-амперным характеристикам определяются параметры ПТ?
14. Какие эквивалентные схемы биполярных и полевых транзисторов используют в режиме малого сигнала?

Лабораторная работа №3

Исследование нестабилизированных источников напряжения

Цель работы: изучение принципа работы и исследование вентильных блоков и сглаживающих фильтров в нерегулируемых нестабилизированных выпрямителях.

3.1 Краткие теоретические сведения

Все источники электропитания можно разделить на первичные (ПИЭП) и вторичные (ВИЭП). Первичные источники преобразуют неэлектрическую энергию в электрическую, обеспечивая на выходе напряжение постоянного или переменного тока. К ним относятся электромеханические генераторы, электрохимические источники (аккумуляторы или гальванические элементы), фотозлектрические элементы и др. Выходное напряжение первичных источников в большинстве случаев не может быть непосредственно использовано для питания электронных устройств.

Обычно для питания электронной аппаратуры требуется постоянное стабилизированное напряжение с низким уровнем пульсаций. Поэтому практически любое электронное устройство содержит источник вторичного электропитания.

Основной задачей ВИЭП является преобразование энергии первичного источника в выходное напряжение с заданными параметрами. Чаще всего в качестве ПИЭП используется напряжение сети переменного тока. В этом случае ВИЭП имеет структуру, показанную на рисунке 3.1, где Tr — силовой трансформатор, преобразующий напряжение сети U_c в выходное переменное напряжение необходимой величины и обеспечивающий гальваническую развязку от сети; $ВБ$ — вентильный блок, обеспечивающий однонаправленное протекание тока в последующей цепи; $СФ$ — сглаживающий фильтр, который уменьшает пульсации напряжения до требуемого уровня; $Ст$ — стабилизатор, поддерживающий неизменным напряжение на нагрузке R_n при изменениях напряжения сети или сопротивления нагрузки. Кроме основных узлов, в состав ВИЭП могут входить различные вспомогательные элементы, выполняющие функции контроля, защиты и др.

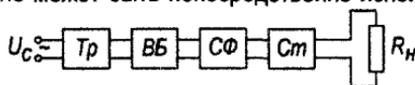


Рисунок 3.1 - Структурная схема вторичного источника электропитания.

В зависимости от условий работы и требований, предъявляемых к ВИЭП, отдельные узлы их могут отсутствовать. В частности, в некоторых случаях применяются ВИЭП, не содержащие стабилизатор. Именно такие источники рассматриваются в данной работе.

Вторичные источники питания могут быть классифицированы по ряду признаков:

- По виду используемых первичных источников:

- *инверторные* ВИЭП используются для преобразования напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока (*выпрямители*) и наоборот, т. е. они изменяют не только значение, но и род (форму) выходного напряжения;

- *конверторные* ВИЭП используются для преобразования как постоянного, так и переменного напряжения одного уровня в напряжение другого уровня. Например, к первым можно отнести электронные стабилизаторы постоянного напряжения, ко вторым — трансформаторы.

- По принципу действия:

- с *трансформаторным входом*, в которых напряжение переменного тока вначале изменяется по значению при помощи трансформатора, а затем выпрямляется и стабилизируется;

- с *бестрансформаторным входом*, в которых переменное напряжение сети вначале выпрямляется, а затем преобразуется в переменное напряжение более высокой частоты. Преобразователи в таких источниках обычно работают в импульсном режиме, то и ВИЭП такого типа часто называют *импульсными*.

- По выходной мощности:

- *микромощные* — до 1 Вт;

- *маломощные* — от 1 до 100 Вт;

- *средней мощности* — от 100 Вт до 1 кВт;

- *мощные* — свыше 1 кВт.

- По числу фаз силовой сети:

- *однофазные*;

- *двухфазные*;

- *трехфазные*;

- *шестифазные*.

При этом под числом фаз питающего напряжения *понимают* число питающих напряжений с отличными друг от друга начальными фазами. Так, например, если для работы выпрямителя требуется одно-единственное питающее напряжение, то такой выпрямитель будет однофазным. Если же для работы выпрямителя требуются два питающих напряжения, сдвинутых друг относительно друга на какой-либо угол (чаще всего на 180°), то такой выпрямитель называют двухфазным. Аналогично, если для работы выпрямителя требуются три питающих напряжения, сдвинутые друг относительно друга на угол, равный 120° , то такой выпрямитель называют трехфазным. Шестифазные выпрямители состоят из двух групп трехфазных выпрямителей, питаемых противофазными напряжениями трехфазной сети.

- По количеству выпрямленных полуволн (полупериодов) напряжения:

- *однополупериодные*;

- *двухполупериодные*.

- По схеме вентильного блока с:

- *параллельным*,

- *последовательным*,

- *мостовым* включением однофазных выпрямителей.

ВИЭП могут классифицироваться и по другим признакам.

К основным параметрам выпрямителей относят:

– *Номинальное напряжение постоянного тока*, $U_{H.ср.} = (1/T) \int_0^T u_{\text{вых}}(t) dt$ — среднее значение выпрямленного напряжения, заданное техническими требованиями. Определяется значением напряжения, необходимым для питаемых выпрямителем устройств.

– *Номинальный выпрямленный ток*, $I_{H.ср.} = U_{H.ср.}/R_H$ — среднее значение выпрямленного тока, т. е. его постоянная составляющая, заданная техническими требованиями. Определяется результирующим током всех цепей питаемых выпрямителем.

– *Напряжение сети* $U_{\text{сети}}$ — напряжение сети переменного тока, питающей выпрямитель. Стандартное значение этого напряжения для бытовой сети – 220 В с допустимыми отклонениями не более 10 %.

– *Частота пульсаций*, f_{Π} — количество импульсов тока, проходящих по нагрузке за один период выпрямленного напряжения. Для однополупериодной схемы выпрямителя частота пульсаций равна частоте питающей сети. Двухполупериодные, мостовые схемы и схемы удвоения напряжения дают пульсации, частота которых равна удвоенной частоте питающей сети. Многофазные схемы выпрямления имеют частоту пульсаций, зависящую от схемы выпрямителя и числа фаз.

– *Коэффициент пульсаций*, $K_{\Pi} = U_{\text{осн. м}}/U_{H.ср.}$ — отношение амплитуды первой (основной) гармоники ($U_{\text{осн. м}}$) при разложении в ряд Фурье напряжения u_H на выходе выпрямителя к среднему значению напряжения. Различают коэффициент пульсаций на входе фильтра и коэффициент пульсаций на выходе фильтра.

– *Коэффициент фильтрации (коэффициент сглаживания)*, $q = K_{\Pi \text{ вх.}}/K_{\Pi \text{ вых.}}$ — отношение коэффициента пульсаций на входе ($K_{\Pi \text{ вх.}}$) фильтра к коэффициенту пульсаций на выходе ($K_{\Pi \text{ вых.}}$) фильтра. Для многосвязных фильтров коэффициент фильтрации равен произведению коэффициентов фильтрации отдельных звеньев.

На рисунке 3.2, а приведена схема однополупериодного выпрямителя. Дiode $VD1$ включен последовательно с нагрузочным устройством (резистором R_H) и вторичной обмоткой трансформатора Tr . На рис. 3.2, б изображены временные диаграммы напряжений и токов однополупериодного выпрямителя.

В течение первого полупериода напряжения u_2 вторичной обмотки трансформатора, когда потенциал точки a положителен по отношению к потенциалу точки b , диод открыт, и через нагрузочный резистор протекает ток $i_H = i_a$. Если пренебречь падением напряжения на диоде в прямом направлении (обычно оно не превышает 1 В), то можно считать $u_H = u_2$. Во втором полупериоде напряжение u_2 прикладывается к диоду в обратном направлении (потенциал точки a становится отрицательным по отношению к потенциалу

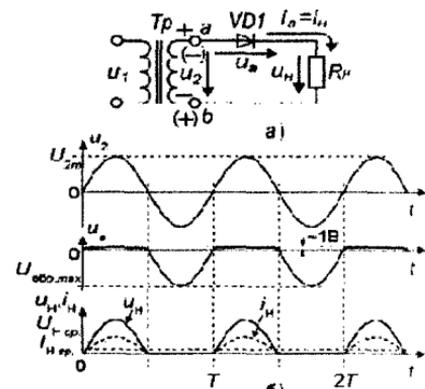


Рисунок 3.2 - Схема однополупериодного выпрямителя (а) и временные диаграммы (б) его работы

точки *b*). Пренебрегая обратным током диода, который, как правило, незначителен, можно считать, что ток в нагрузке отсутствует и $u_H = 0$. При этом всё напряжение вторичной обмотки трансформатора приложено к закрытому диоду, т. е. $u_a = u_2$.

Из временных диаграмм видно, что ток в нагрузке i_H и напряжение u_H имеют пульсирующий характер. Для однофазного однополупериодного выпрямителя среднее значение выпрямленного напряжения $U_{H\text{cp}}$, коэффициент пульсаций K_{Π} , частота пульсаций f_{Π} и максимальное значение обратного напряжения на диоде $U_{\text{обр. max}}$:

$$U_{H\text{cp}} = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} u_2 \approx 0,45u_2; \quad (3.1)$$

$$K_{\Pi} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57; \quad f_{\Pi} = f_{\text{сети}}; \quad U_{\text{обр. max}} = U_{2m} = \sqrt{2} u_2 = \pi U_{H\text{cp}}.$$

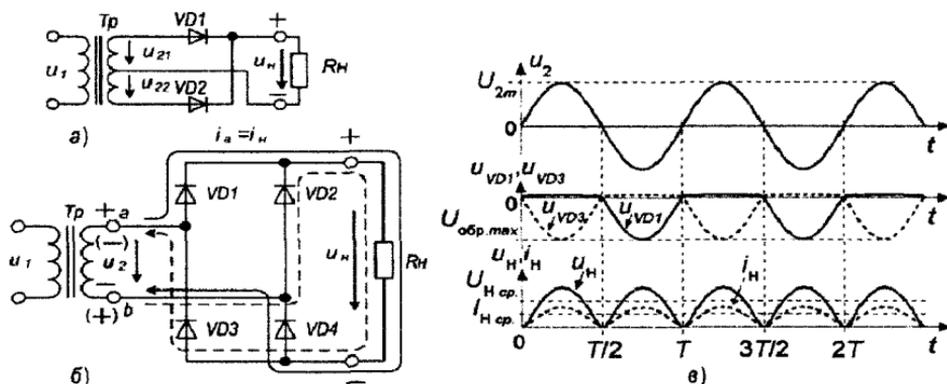


Рисунок 3.3 - Схемы двухполупериодных выпрямителей — с отводом от средней точки (а), мостового (б) и временные диаграммы (в) работы мостового выпрямителя

К двухполупериодным относятся выпрямитель с отводом от средней точки и мостовой выпрямитель, схемы которых приведены на рисунке 3.3.

В выпрямителе с отводом от средней точки (рис.3.3, а) схема соединения вторичных обмоток трансформатора такова, что одинаковые по величине напряжения (u_{21} и u_{22}) на выводах вторичных обмоток относительно средней (нулевой) точки сдвинуты по фазе на 180° , поэтому эту схему иногда называют *двухфазным* выпрямителем. Вторичные обмотки трансформатора подключены к анодам диодов *VD1* и *VD2*. Выходное напряжение u_H снимается между средней точкой трансформатора и общей точкой соединения катодов обоих диодов. Одним из основных недостатков выпрямителя с отводом от средней точки является то, что во время протекания тока через один из диодов обратное напряжение на другом (закрытом) диоде в пике достигает удвоенного максимального напряжения на вторичной полуобмотке. Параметры:

$$U_{H\text{ ср.}} = \frac{2}{\pi} U_{21m} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} u_{21} \approx 0,9 u_{21} = 0,45 u_2; \quad (3.2)$$

$$K_{\Pi} = 0,67; \quad f_{\Pi} = 2f_{\text{сети}}; \quad U_{\text{обр. max}} = 2U_{21m} = 2\sqrt{2} u_{21} = \pi U_{H\text{ ср.}}$$

В выпрямителе, показанном на рисунке 3.3, б, диоды $VD1-V D4$ включены по мостовой схеме. Временные диаграммы его работы приведены на рисунке 3.3, в. В одном из полупериодов напряжение u_2 вторичной обмотки трансформатора прикладывается в прямом направлении к последовательно соединённым диодам $VD1, VD4$, а в другом – к диодам $VD2, VD3$. Таким образом, две пары диодов пропускают ток поочередно, и через нагрузку он протекает в одном направлении во все полупериоды (направления протекания тока в обоих полупериодах показаны соответственно сплошной и штриховой линиями). Среднее напряжение на нагрузке для данного выпрямителя вдвое выше, чем в однополупериодном, а обратное напряжение на диодах в два раза меньше:

$$U_{H\text{ ср.}} = \frac{2}{\pi} U_{2m} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} u_2 \approx 0,9 u_2; \quad (3.3)$$

$$K_{\Pi} = 0,67; \quad f_{\Pi} = 2f_{\text{сети}}; \quad U_{\text{обр. max}} = 2U_{2m} = \sqrt{2} u_2 = \frac{\pi}{2} U_{H\text{ ср.}}$$

Недостатками мостового выпрямителя являются применение четырех диодов, удвоенное прямое падение напряжения на вентильном блоке.

На рисунке 4 приведены схемы трёхфазных выпрямителей.

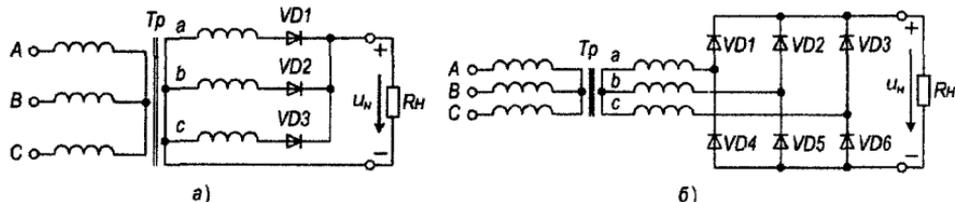


Рисунок 3.4 - Схемы трёхфазных выпрямителей — с отводом от нулевой точки (а); мостовая (б)

Трёхфазная нулевая (с отводом от нулевой точки) схема выпрямителя (рис. 3.4, а) является однополупериодной. Каждая фаза выпрямителя работает аналогично схеме (рис. 3.2), а входные напряжения фаз частично перекрываются, т. к. смещены друг относительно друга на 120° , поэтому каждый из трёх диодов $VD1-V D3$ выпрямителя открываются по очереди в течение одной трети периода колебаний входного напряжения. В результате частота пульсаций выходного напряжения увеличивается, а коэффициент пульсаций уменьшается:

$$U_{H\text{ ср.}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_{2m\phi} = \frac{3}{2\pi} U_{2m\text{ л}} \approx 0,83 U_{2m\phi} \approx 0,48 U_{2m\text{ л}}; \quad (3.4)$$

$$K_{\Pi} = 0,25; \quad f_{\Pi} = 3f_{\text{сети}}; \quad U_{\text{обр. max}} = U_{2m\text{ л}} = \frac{2\pi}{3} U_{H\text{ ср.}} = 2,1U_{H\text{ ср.}}$$

где $U_{2m\phi}$ — амплитуда фазного напряжения вторичной обмотки; $U_{2m\text{ л}} = \sqrt{3}U_{2m\phi}$ — амплитуда линейного напряжения вторичной обмотки.

Трёхфазная мостовая схема (т. н. схема Ларионова) (рис. 3.4, б), являясь двухполупериодной, обеспечивает на выходе практически постоянное напряжение при повышенной частоте пульсаций и существенно меньшем коэффициенте пульсаций. Максимальное обратное напряжение на каждом диоде в этой схеме в 2 раза меньше, чем в трёхфазной нулевой схеме. Это позволяет применять схему в широком диапазоне выпрямленных напряжений и мощностей и часто даже без использования фильтра:

$$U_{H\text{ ср.}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{2m\Phi} = \frac{3}{\pi} U_{2m\Lambda} = 1,654 U_{2m\Phi} = 0,955 U_{2m\Lambda}; \quad (3.5)$$

$$K_{\Pi} = 0,057; \quad f_{\Pi} = 6f_{\text{сети}}; \quad U_{\text{обр. max}} = U_{2m\Lambda} = \frac{\pi}{3} U_{H\text{ ср.}} = 1,05 U_{H\text{ ср.}}$$

В целом можно отметить, что недостатками однополупериодных схем являются подмагничивание трансформатора постоянной составляющей тока и, как следствие, низкий коэффициент использования мощности. Поэтому данные схемы обычно используют в маломощных источниках.

Двухполупериодные схемы обеспечивают более низкий уровень пульсаций, но для их реализации требуется большее число диодов. В мостовых схемах падение напряжения на открытых диодах в два раза выше, что необходимо учитывать при расчёте ВИЭП с низким выходным напряжением.

Для работы выпрямителя принципиальное значение имеет характер нагрузки. Поэтому его расчёт следует выполнять с учётом типа и параметров сглаживающего фильтра.

Сглаживающие фильтры могут быть выполнены на пассивных элементах (резисторах, конденсаторах, катушках индуктивности) либо с применением активных компонентов (транзисторов, операционных усилителей и т. д.). Основным параметром фильтра является коэффициент сглаживания q , равный отношению коэффициентов пульсации K_{Π} на входе и выходе фильтра

$$q = \frac{K_{\Pi\text{ вх.}}}{K_{\Pi\text{ вых.}}} \quad (3.6)$$

Основные схемы фильтров на пассивных элементах приведены на рисунке 3.5.

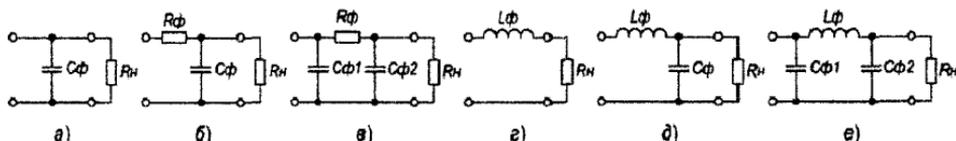


Рисунок 3.5 - Схемы пассивных сглаживающих фильтров: ёмкостного (а); резистивно-ёмкостного (б); П-образного резистивно-ёмкостного (в); индуктивного (г); Г-образного индуктивно-ёмкостного (д); П-образного индуктивно-ёмкостного (е)

Ёмкостный фильтр (рис. 3.5, а) представляет собой конденсатор, подключённый к выходу выпрямителя параллельно нагрузке. Данный тип фильтра используется очень широко. Кроме того, во многих более сложных фильтрах первым элементом является конденсатор. Поэтому понимание принципа работы данного фильтра совместно с выпрямителем является достаточно важным.

Принцип работы выпрямителей на ёмкостную нагрузку поясняется рисунком 3.6. На интервале времени $t_2 - t_3$ напряжение $u_2 > u_C$, конденсатор C_Φ заряжается через выпрямитель, и напряжение на нём возрастает. На интервале

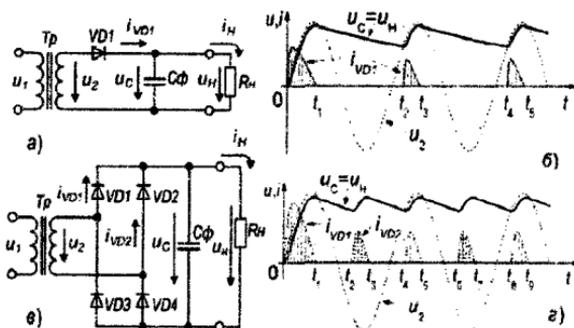


Рисунок 3.6 - Схемы и временные диаграммы токов и напряжений однополупериодного (а, б) и мостового выпрямителей с ёмкостным фильтром (в, г)

разряда, тем больше уменьшается выходное напряжение. Поэтому уровень пульсаций снижается при уменьшении тока нагрузки и увеличении ёмкости C_Φ , а для однополупериодной схемы он будет выше, чем для двухполупериодной. Соответственно, при заданной схеме выпрямителя и сопротивлении нагрузки коэффициент сглаживания можно повысить за счёт увеличения ёмкости C_Φ .

Как следует из диаграмм (см. рис. 3.6, б, г), через выпрямитель ток протекает только в периоды заряда конденсатора, т. е. является пульсирующим. С увеличением ёмкости C_Φ длительность импульсов сокращается, а амплитуда возрастает. Аналогичный характер имеет изменение тока и в обмотках трансформатора, что снижает коэффициент использования по мощности. В конечном счёте, увеличивается требуемая мощность трансформатора, и может потребоваться выбор диодов с большим допустимым током. По указанным причинам не следует выбирать ёмкость C_Φ чрезмерно большой, а в случае необходимости использовать другие типы фильтров. Выбор C_Φ можно выполнять, исходя из условия $\tau_{\text{разр.}} = C_\Phi R_H > 5T$, где $T = 1/f_{\text{п}}$ — период основной гармоники.

При ёмкостной нагрузке в однополупериодном выпрямителе возрастает обратное напряжение на диоде. Оно может достигать удвоенной амплитуды напряжения вторичной обмотки U_{2m} . Среднее выходное напряжение можно рассчитать по формуле

$$U_{H \text{ ср.}} = U_{2m} \left(1 + \frac{1}{2f_{\text{п}} C_\Phi R_H} \right)^{-1}, \quad (3.7)$$

а коэффициент пульсаций на выходе ёмкостного фильтра:

$$K_{\text{П вых.}} = (2\sqrt{3} f_{\text{п}} C_\Phi R_H)^{-1}. \quad (3.8)$$

Ёмкостные фильтры используются в широком диапазоне выпрямленных напряжений и мощностей (до нескольких десятков ватт) при малых токах нагрузки (до 10 мА), т. к. с ростом тока необходимо значительно увеличивать ёмкость конденсатора.

Индуктивные фильтры (рис. 3.5, з) применяются в широком диапазоне выпрямленных напряжений при мощностях от десятков ватт до нескольких киловатт и при токах свыше 1 А. Принцип их работы основан на том, что индуктивное сопротивление переменному току $X_{L\phi} = \omega L_{\phi}$ катушки индуктивности намного больше активного сопротивления, поэтому падение постоянной составляющей напряжения незначительно по сравнению с падением переменной составляющей. В результате напряжение на нагрузке имеет незначительные пульсации и равно среднему значению выпрямленного напряжения. При этом ток, как в нагрузке, так и на остальных участках цепи, поддерживается близким к постоянному, что благоприятно сказывается на работе диодов и трансформатора. Следствием является меньшее внутреннее сопротивление ВИЭП по сравнению с ВИЭП, у которых выпрямитель работает на ёмкостную нагрузку, что уменьшает зависимость выпрямленного напряжения от тока нагрузки.

Недостатки ВИЭП с индуктивным фильтром:

– перенапряжения, возникающие вследствие переходных процессов при включении и скачкообразных изменениях тока нагрузки, что представляет опасность для элементов ВИЭП и его нагрузки;

- сравнительно большие размеры и вес (при низкой частоте первичного источника);
- создание помех магнитным полем рассеяния катушки индуктивности;
- возможность возникновения сложных переходных процессов, создающих помехи работе устройств (усилителя, передатчика и т. п.);
- фильтр не устраняет медленных изменений питающих напряжений.

Г-образный и Л-образный индуктивно-ёмкостные фильтры образуются путем последовательного соединения индуктивного и ёмкостного фильтров (рис. 3.5, д, е). Они применяются, когда требуемый коэффициент сглаживания нельзя обеспечить более простыми фильтрами. В свою очередь указанные фильтры также можно соединять последовательно. Если произведение $L_{\phi} C_{\phi}$ больше 200...250 Гн · мкФ, то фильтр следует делать двухзвенным. Общий коэффициент сглаживания многозвенного фильтра равен произведению коэффициентов сглаживания фильтров, из которых он состоит.

В маломощных выпрямительных устройствах (ток менее 15...20 мА), когда не требуется большой коэффициент сглаживания, но необходимо значительно уменьшить массу, габариты и стоимость фильтра, вместо индуктивной катушки обычно включают резистор R_{ϕ} (рис. 3.5, б, в). При $X_{C\phi} \ll R_{\phi}$ падение переменной составляющей выпрямленного напряжения осуществляется преимущественно на R_{ϕ} , а постоянной – на $X_{C\phi}$.

3.2 Порядок выполнения

① Тип диодов для всех схем выпрямителей тот же, что и в Лабораторной работе №1.

① Для измерения действующего значения переменной составляющей, U_{\sim} , напряжения на нагрузке в свойствах вольтметра **U_AC** установить режим (Mode:) **AC**; для измерения постоянной составляющей, $U_{H\text{ ср.}}$, использовать вольтметр **U_DC** в режиме **DC** (установлен по умолчанию).

① Для исследования однофазных выпрямителей использовать источник переменного напряжения $U_C = 50$ В, $f_{\text{сети}} = 50$ Гц и трансформатор с коэффициентом трансформации $n = 2$ (библиотека – **default**, модель – **ideal**).

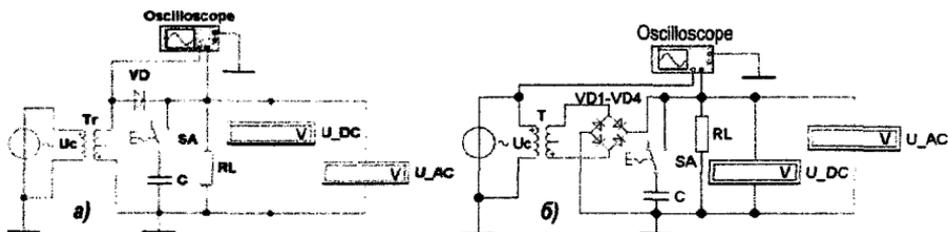


Рисунок 3.7 - Схемы для исследования однофазных выпрямителей: однополупериодного (а); мостового (б)

Задание 1: Исследование однополупериодного выпрямителя:

а) собрать принципиальную схему выпрямителя согласно рисунку 3.7, а и установить заданное преподавателем значение сопротивления нагрузки RL ;

б) по заданному преподавателем коэффициенту пульсаций на выходе фильтра $K_{П\text{ вых.}}$, рассчитать ёмкость конденсатора, используя выражение (3.8) (задан стандартное значение ёмкости конденсатора);

в) при отключённом и включённом конденсаторе получить с помощью осциллографа (Oscilloscope) осциллограммы входного и выходного напряжений и записать показания вольтметров U_{DC} и U_{AC} — соответственно значения постоянной и переменной составляющих выходного напряжения $U_{H\text{ ср.}}$ и U_{\sim} ;

Задание 2: Исследование однофазного мостового выпрямителя:

а) собрать принципиальную схему выпрямителя (рис. 3.7, б).

б) выполнить исследование аналогично пп. б) — в) Задания 1.

Задание 3: Исследование трёхфазного мостового выпрямителя:

а) собрать принципиальную схему выпрямителя в соответствии с рис. 3.8, задавая значения напряжений источников $U_C = 25\text{ В}$ и частотой $f_{\text{сети}} = 50\text{ Гц}$, при этом необходимо учесть, что фазы (Phase) источников напряжения должны отличаться на 120° ;

б) выполнить исследование аналогично пп. б) — в) Задания 1.

Задание 4: Обработка результатов измерений:

а) по формуле $K_{П} = \sqrt{2} U_{\sim} / U_{H\text{ ср.}}$, рассчитать коэффициенты пульсаций для каждой схемы и сравнить полученные результаты с теоретическими значениями, рассчитанными соответственно по формулам в (3.1), (3.3) и (3.5); сделать выводы;

б) используя формулу $K_{П\text{ вых.}} = U_{\sim} / U_{H\text{ ср.}}$, рассчитать для каждой схемы коэффициенты пульсаций на выходе фильтра и сравнить полученное значение с заданным;

в) по формуле (3.7) рассчитать $U_{H\text{ ср.}}$ и сравнить с измеренным значением.

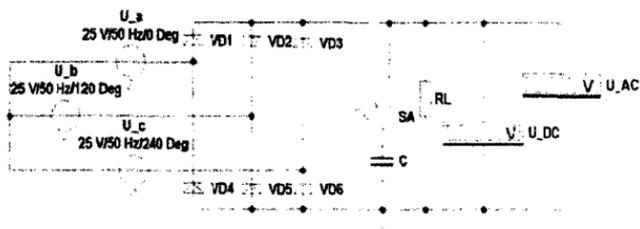


Рисунок 3.8 - Схема для исследования трёхфазного мостового выпрямителя

Указание: в формуле (3.7) для однофазных выпрямителей принять $U_{2m} = \sqrt{2} \cdot 25\text{ В}$, а для схемы трёхфазного мостового выпрямителя принять $U_{2m} = \sqrt{3} \cdot (\sqrt{2} \cdot 25)\text{ В}$.

3.3 Контрольные вопросы

1. Принцип действия рассмотренных выпрямителей, их достоинства и недостатки.
2. Почему выходное напряжение двухполупериодного выпрямителя больше чем однопериодного при одинаковом входном напряжении?
3. Каков принцип действия различных типов фильтров, их достоинства и недостатки?
4. Почему напряжение холостого хода выпрямителя с ёмкостным фильтром превышает среднее значение входного напряжения?

Лабораторная работа №4

Исследование стабилизаторов напряжения

Цель работы: изучение принципа работы, освоение методики расчёта, исследование характеристик стабилизаторов напряжения.

4.1 Краткие теоретические сведения

Стабилизатор напряжения — это устройство, поддерживающее в заданных пределах значение выходного напряжения при изменении входного напряжения и выходного тока (сопротивления нагрузки). Он является выходным звеном в стабилизированных источниках вторичного электропитания (ВИЭП).

Стабилизаторы классифицируют по ряду признаков:

- По принципу действия:
 - *параметрические* (ПСН): осуществляют стабилизацию напряжения на нагрузке за счёт изменения параметров (например, проводимости) нелинейных элементов: стабилизаторов, стабилитронов, транзисторов. Подразделяются на:
 - *однокаскадные;*
 - *многокаскадные;*
 - *мостовые;*
 - *компенсационные* (КСН): замкнутые системы автоматического регулирования напряжения на нагрузке. Выходное напряжение, равное или пропорциональное стабильному *опорному напряжению*, стабилизируется за счёт изменения параметров управляемого прибора (нелинейного элемента), называемого *регулирующим элементом*, при воздействии на него сигнала, поступающего от *устройства сравнения*, в котором сравнивается выходное напряжение с опорным.
 - По способу управления нелинейным регулирующим элементом:
 - *непрерывные;*
 - *ключевые (импульсные).*
 - По месту включения нелинейного регулирующего элемента и нагрузки:
 - *последовательные;*
 - *параллельные.*
 - По точности поддержания выходного напряжения на нагрузке:
 - *низкой точности* (изменение напряжения от 1 до 0,1%);
 - *средней точности* (изменение напряжения от 0,1 до 0,01%);
 - *точные* (изменение напряжения от 0,01 до 0,005%);
 - *прецизионные* (изменение напряжения не более 0,005%).

• **По выходной мощности:**

- *маломощные* (до 1 Вт): используют в измерительной технике, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователях;
- *средней мощности* (до 250 Вт): используют для питания малых ЭВМ и маломощных электронных устройств;
- *большой мощности* (свыше 250 кВт): используют для питания лазерных установок, электронных микроскопов и др.

Основные параметры стабилизаторов напряжения:

- *номинальное напряжение стабилизации, $U_{ВЫХ\text{ ном.}}$* — выходное напряжение стабилизатора при нормальных условиях его эксплуатации;
- *диапазон изменения входного напряжения, $U_{ВХ\text{ мин.}} \dots U_{ВХ\text{ макс.}}$* — устанавливает пределы изменения напряжения на входе стабилизатора, при которых сохраняются точностные свойства стабилизатора;
- *диапазон изменения тока нагрузки, $I_{ВЫХ\text{ мин.}} \dots I_{ВЫХ\text{ макс.}}$* — устанавливает пределы изменения тока нагрузки, при котором сохраняются точностные свойства стабилизатора;
- *коэффициент стабилизации напряжения, $K_{СТУ}$* — определяется как отношение относительного изменения входного напряжения к относительному изменению выходного напряжения:

$$K_{СТУ} = \frac{\Delta U_{ВХ} / U_{ВХ\text{ ср.}}}{\Delta U_{ВЫХ} / U_{ВЫХ\text{ ном.}}} = \frac{U_{ВЫХ\text{ ном.}}}{U_{ВХ\text{ ср.}}} \cdot \frac{\Delta U_{ВХ}}{\Delta U_{ВЫХ}}; \quad (4.1)$$

- *выходное сопротивление, $r_{ВЫХ}$* — характеризует изменение выходного напряжения $\Delta U_{ВЫХ}$ при изменении тока нагрузки $\Delta I_{ВЫХ}$:

$$r_{ВЫХ} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta I_{ВЫХ}}, \quad (4.2)$$

для стабилизатора напряжения должно выполняться условие $r_{ВЫХ} \ll R_{Н}$;

- *коэффициент полезного действия (КПД):*

$$\eta = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}}, \quad (4.3)$$

где $P_{ВХ} = U_{ВХ\text{ ср.}} \cdot I_{ВХ\text{ ср.}}$; $P_{ВЫХ} = U_{ВЫХ\text{ ном.}} \cdot I_{ВЫХ\text{ ном.}}$; $U_{ВХ\text{ ср.}}$, $I_{ВХ\text{ ср.}}$, $U_{ВЫХ\text{ ном.}}$, $I_{ВЫХ\text{ ном.}}$ — соответственно средние значения входных и номинальные значения выходных напряжений и токов стабилизатора.

Параметрические стабилизаторы напряжения (ПСН) используются в маломощных ВИЭП с выходным током до 15...20 мА, а также в качестве источников опорного напряжения в компенсационных стабилизаторах и контрольно-измерительной аппаратуре. Для стабилизации постоянного напряжения в них применяются элементы с нелинейной вольт-амперной характеристикой, на рабочем участке которой напряжение мало зависит от протекающего через эти элементы тока.

Схема однокаскадного ПСН параллельного типа приведена на рисунке 4.1. Изменение входного напряжения $U_{ВХ}$ приводит к изменению тока через резистор $R1$ и стабилитрон $VD1$, напряжение на стабилитроне U_{VD1} при этом изменяется незначительно,

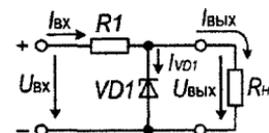


Рисунок 4.1 - Однокаскадный ПСН параллельного типа

поскольку изменение падения напряжения на резисторе R_1 почти полностью компенсирует изменение входного напряжения. Так как стабилитрон включён параллельно нагрузке, то и выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = U_{VD1}$ также остаётся неизменным.

Коэффициент стабилизации такого ПСН определяется по приближённой формуле

$$K_{\text{СТУ}} \approx \frac{U_{\text{ВЫХ ном.}}}{U_{\text{ВХ ср.}}} \cdot \frac{R_1}{r_{VD1} \parallel R_1 \parallel R_H} \approx \frac{U_{\text{ВЫХ ном.}}}{U_{\text{ВХ ср.}}} \cdot \frac{R_1}{r_{VD1}} \quad (\text{если } r_{VD1} \ll R_1, R_H), \quad (4.4)$$

где r_{VD1} — дифференциального сопротивления стабилитрона $VD1$.

Выходное сопротивление стабилизатора, определяемое в основном дифференциальным сопротивлением стабилитрона, можно приближённо рассчитать по формуле

$$r_{\text{ВЫХ}} \approx r_{VD1} \parallel R_1 \approx r_{VD1} \quad (\text{при } r_{VD1} \ll R_1). \quad (4.5)$$

Если требуется повышенная стабильность выходного напряжения, то применяются многокаскадные либо мостовые схемы стабилизаторов напряжения, приведённые на рисунке 4.2.

В двухкаскадном ПСН (рис. 4.2, а) общий коэффициент стабилизации равен произведению коэффициентов стабилизации отдельных каскадов:

$$K_{\text{СТУ}} = K_{\text{СТ1}} \cdot K_{\text{СТ2}} \approx \frac{U_{\text{ВЫХ ном.}}}{U_{\text{ВХ ср.}}} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{r_{VD1} \cdot r_{VD2}},$$

где r_{VD1} и r_{VD2} — дифференциальные сопротивления стабилитронов $VD1$, $VD2$ соответственно. Очевидно, что в данном случае должно выполняться условие $U_{VD1} > U_{VD2}$, где U_{VD1} и U_{VD2} — напряжения стабилизации соответствующих стабилитронов. Однако дальнейшее увеличение числа каскадов приводит к существенному снижению КПД.

В мостовом параметрическом стабилизаторе напряжения (рис. 4.2, б) стабилизация при изменениях входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ достигается за счёт изменения напряжения на резисторе R_2 , которое компенсирует изменение напряжения на резисторе R_3 .

Коэффициент стабилизации при $R_H \gg R_1, R_2, R_3, r_{VD1}$:

$$K_{\text{СТУ}} \approx \frac{U_{\text{ВЫХ ном.}}}{U_{\text{ВХ ср.}}} \cdot \frac{1}{\frac{r_{VD1}}{r_{VD1} + R_3} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}},$$

а выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ ном.}} = U_{VD1} - U_{R2},$$

где U_{R2} — падение напряжения на резисторе R_2 .

В данном стабилизаторе напряжения можно обеспечить стабилизацию малых напряжений (менее 1 В), а также получить довольно высокий коэффициент стабилизации. Однако это достигается за счёт значительного ухудшения КПД по сравнению со схемой на рис. 4.1.

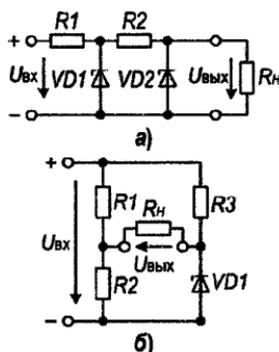


Рисунок 4.2 — Двухкаскадный (а) и мостовой (б) ПСН

и мостовой (б) ПСН

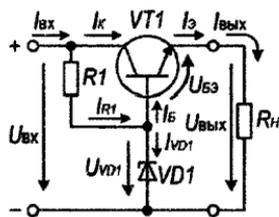


Рисунок 4.3 — ПСН последовательного типа

Максимальная мощность рассмотренных стабилизаторов напряжения ограничивается предельными значениями тока стабилизации и рассеиваемой мощностью стабилитрона, которая сопоставима с мощностью нагрузки. Увеличить отдаваемую в нагрузку мощность без ухудшения КПД можно, если к выходу однокаскадного ПСН параллельного типа (рис. 4.1) подключить эмиттерный повторитель на транзисторе $VT1$ (см. рисунок 4.3). В этом случае ток в нагрузке (соответственно и мощность) может многократно превышать ток стабилитрона. Такая схема называется *параметрическим стабилизатором напряжения последовательного типа*. Напряжение на выходе данного стабилизатора

$$U_{\text{ВЫХ ном.}} = U_{VD1} - U_{БЭ}, \quad (4.6)$$

где U_{VD1} — напряжение стабилизации стабилитрона $VD1$; $U_{БЭ}$ — напряжение между базой и эмиттером транзистора $VT1$ (см. рисунок 4.3).

При изменении входного напряжения стабилитрон $VD1$, благодаря резистору $R1$ (ПСН параллельного типа), поддерживает неизменным потенциал базы транзистора $VT1$. А так как резистор $R1$ включён между базой и коллектором транзистора $VT1$, то и напряжение $U_{КЭ}$ между коллектором и эмиттером изменяется практически на ту же величину, что и входное напряжение, т. е. $U_{\text{ВЫХ ном.}} = U_{\text{ВХ}} - U_{КЭ} \approx \text{const}$.

Коэффициент стабилизации данной схемы при выполнении условия $R_H, R_1 \gg r_{VD1}$

$$K_{\text{СТУ}} \approx \frac{U_{\text{ВЫХ ном.}}}{U_{\text{ВХ ср.}}} \cdot \frac{R_1}{r_{VD1}}, \quad (4.7)$$

а выходное сопротивление

$$r_{\text{ВЫХ}} \approx \frac{h_{11e} + r_{VD1}}{1 + h_{21э}}, \quad (4.8)$$

где $h_{11э}, h_{21э}$ — h -параметры транзистора $VT1$, соответствующие схеме с ОЭ.

Следует отметить, что при использовании ПСН последовательного типа (рис. 4.3) нельзя допускать короткого замыкания на выходе, так как в этом случае ток, протекающий через транзистор, значительно возрастает, что может вывести транзистор из строя.

К недостаткам параметрических стабилизаторов напряжения относят низкий КПД и сравнительно невысокий коэффициент стабилизации, а также невозможность плавной регулировки и точной установки номинального значения выходного напряжения.

Достоинство таких схем — простота исполнения и малое количество элементов.

Линейные компенсационные стабилизаторы напряжения (КСН) содержат регулирующий элемент (обычно это транзистор) и обладают более высокими качественными параметрами, чем ПСН. Управление регулирующим элементом осуществляется сигналом с выхода устройства, сравнивающего выходное напряжение стабилизатора с опорным напряжением. По отношению к нагрузке регулирующий элемент может подключаться последовательно или параллельно.

На рисунке 4.4 приведена схема *компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа с непрерывным регулированием*. В качестве источника опорного напряжения используется параметрический стабилизатор на элементах $VD1, R2$.

Транзистор $VT2$ выполняет функцию устройства сравнения опорного напряжения U_{VD1} с напряжением на резисторе $R4$ — плече делителя напряжения $R3 - R4$. Изменение U_{BX} приводит к изменению $U_{ВЫХ}$, что вызывает изменение потенциала базы $VT2$, а поскольку стабилитрон $VD1$ поддерживает потенциал эмиттера $VT2$ постоянным, то изменяется напряжение $U_{БЭ2}$ и ток коллектора I_{K2} транзистора $VT2$. Изменение тока I_{K2} вызывает изменение напряжения на резисторе $R1$, включённого между коллектором и базой транзистора $VT1$, который выполняет функцию регулирующего элемента. Это, в свою очередь, изменяет напряжение $U_{КЭ1}$ между коллектором и эмиттером транзистора $VT1$. Таким образом, при увеличении U_{BX} транзистор $VT1$ подзакрывается, а при уменьшении U_{BX} открывается ещё больше, что обеспечивает стабилизацию выходного напряжения, т. е. $U_{ВЫХ} = U_{BX} - U_{КЭ1}$.

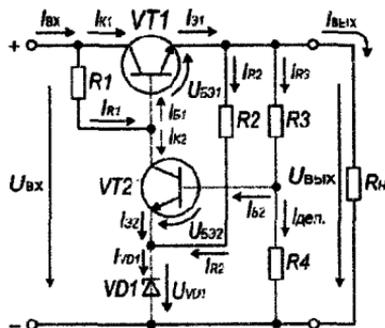


Рисунок 4.4 - КСН последовательного типа

Для данной схемы коэффициент стабилизации и выходное сопротивление

$$K_{ст\ U} \approx \frac{U_{ВЫХ\ ном.}}{U_{BX\ ср.}} K_{ДЕЛ} K_{УС}; \quad (4.9)$$

$$r_{ВЫХ} \approx \frac{h_{113}^{VT1} + R_1}{h_{213}^{VT1} K_{ДЕЛ} K_{УС}}, \quad (4.10)$$

где $K_{ДЕЛ} = R_4 / (R_3 + R_4)$ — коэффициент передачи делителя напряжения $R_3 - R_4$ (см. рис. 4.4); $K_{УС} \approx h_{213}^{VT2} R_1 / (h_{113}^{VT2} + h_{213}^{VT2} r_{VD1} + (R_3 || R_4))$ — коэффициент усиления усилителя на транзисторе $VT2$; h_{113}^{VT1} , h_{213}^{VT1} , h_{113}^{VT2} и h_{213}^{VT2} — h -параметры транзисторов $VT1$ и $VT2$ соответственно.

4.2 Порядок выполнения

① Значения сопротивлений всех резисторов задавать в соответствии с рядом Е24.

Задание 1: Исследование ПСН параллельного типа:

а) собрать схему ПСН (рис. 4.1) в соответствии со структурной схемой на рис. 4.5;

б) задать примерное значение среднего входного напряжения $U_{BX\ ср.} = (1,3 \dots 1,5) U_{ВЫХ\ ном.}$, где $U_{ВЫХ\ ном.} = U_{VD1}$; U_{VD1} — напряжение стабилизации стабилитрона $VD1$;

в) приняв токи $I_{ВЫХ\ ном.} = (10 \dots 20)$ мА и $I_{VD1} \approx I_{ВЫХ\ ном.}$, рассчитать сопротивления нагрузки $R_{Н\ ном.} = U_{ВЫХ\ ном.} / I_{ВЫХ\ ном.}$ и резистора

$$R_1 = (U_{BX\ ср.} - U_{ВЫХ\ ном.}) / (I_{VD1} + I_{ВЫХ\ ном.});$$

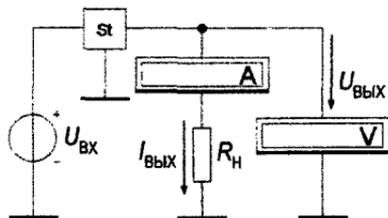


Рисунок 4.5 - Структурная схема для измерения параметров стабилизаторов (St) напряжения

е) установив рассчитанные значения сопротивлений R_1 и $R_H = R_{H \text{ ном.}}$, записать значения выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ ном.}}$ и тока $I_{\text{ВЫХ ном.}}$ и рассчитать КПД по формуле (4.3);

д) последовательно устанавливая значения входного напряжения $U_{\text{ВХ1}} \approx 0,9U_{\text{ВХ ср.}}$ и $U_{\text{ВХ2}} \approx 1,1U_{\text{ВХ ср.}}$, записать значения выходных напряжений $U_{\text{ВЫХ1}}$ и $U_{\text{ВЫХ2}}$;

е) рассчитать коэффициент стабилизации по напряжению $K_{\text{ст}U}$ по формуле (4.1), где $\Delta U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}}$, $\Delta U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ2}} - U_{\text{ВЫХ1}}$; сравнить полученное значение с теоретическим, определённым по формуле (4.4);

ж) установить значение $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ ном.}}$; последовательно устанавливая значения сопротивлений нагрузки $R_{\text{Н1}} \approx 0,9R_{\text{Н ном.}}$ и $R_{\text{Н2}} \approx 1,1R_{\text{Н ном.}}$, записать соответствующие значения выходных напряжений $U_{\text{ВЫХ1}}$ и $U_{\text{ВЫХ2}}$ и токов $I_{\text{ВЫХ1}}$ и $I_{\text{ВЫХ2}}$;

з) найти величину выходного сопротивления $r_{\text{ВЫХ}}$ стабилизатора по формуле (4.2), где $\Delta U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ2}} - U_{\text{ВЫХ1}}$, $\Delta I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВЫХ1}} - I_{\text{ВЫХ2}}$, и сравнить с рассчитанным значением по формуле (4.5).

Задание 2: Исследование ПСН последовательного типа:

а) собрать схему ПСН (рис. 4.3) в соответствии со структурной схемой на рис. 4.5;

б) задавая в соответствии с (4.6) значением выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ ном.}}$ установить номинальное значение входного напряжения $U_{\text{ВХ ср.}} = U_{\text{ВЫХ ном.}} + (3 \dots 5) \text{ В}$;

в) задав токи $I_{\text{ВЫХ ном.}} = (50 \dots 100) \text{ мА}$ и $I_{\text{VD1}} = (10 \dots 15) \text{ мА}$, рассчитать номинальное значение сопротивления нагрузки $R_{\text{Н ном.}} = U_{\text{ВЫХ ном.}} / I_{\text{ВЫХ ном.}}$ и сопротивление резистора $R_1 = (U_{\text{ВХ ср.}} - U_{\text{ВЫХ ном.}}) / (I_{\text{VD1}} + I_{\text{Б}})$, где $I_{\text{Б}} = I_{\text{ВЫХ ном.}} / (h_{21Э} + 1)$;

г) выполнить пункты г) – з) Задания 1, при этом для теоретических расчётов $K_{\text{ст}U}$ и $R_{\text{ВЫХ}}$ использовать соответственно формулы (4.7) и (4.8).

Задание 3: Исследование КСН последовательного типа:

а) собрать схему ПСН (рис. 4.4) в соответствии со структурной схемой на рис. 4.5;

б) приняв значение выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ ном.}} = U_{\text{VD1}} + (3 \dots 5) \text{ В}$, задать номинальное значение входного напряжения $U_{\text{ВХ ср.}} = U_{\text{ВЫХ ном.}} + (5 \dots 8) \text{ В}$;

в) задавая значениями токов $I_{\text{ВЫХ ном.}} = (50 \dots 100) \text{ мА}$, $I_{\text{R1}} = (3 \dots 5) \text{ мА}$, $I_{\text{VD1 min}} = (4 \dots 6) \text{ мА}$, $I_{\text{ДЕЛ}} = (0,02 \dots 0,1) I_{\text{ВЫХ ном.}}$, рассчитать значения сопротивлений нагрузки $R_{\text{Н ном.}} = U_{\text{ВЫХ ном.}} / I_{\text{ВЫХ ном.}}$, резисторов $R_1 = (U_{\text{ВХ ср.}} - U_{\text{ВЫХ ном.}}) / I_{\text{R1}}$ и $R_2 = (U_{\text{ВЫХ ном.}} - U_{\text{VD1}}) / I_{\text{VD1 min}}$, а также сопротивлений делителя напряжения: $R_3 = (U_{\text{ВЫХ ном.}} - (U_{\text{VD1}} + U_{\text{БЭ}}^{VT2})) / I_{\text{ДЕЛ}}$ и $R_4 = (U_{\text{VD1}} + U_{\text{БЭ}}^{VT2}) / I_{\text{ДЕЛ}}$;

г) задав сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 и $R_H = R_{\text{Н ном.}}$, измерить выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ ном.}}$, ток в нагрузке $I_{\text{ВЫХ ном.}}$ и рассчитать КПД по формуле (4.3);

д) выполнить пункты д) – з) Задания 1, при этом для теоретических расчётов $K_{\text{ст}U}$ и $R_{\text{ВЫХ}}$ использовать соответственно формулы (4.9) и (4.10).

4.3 Контрольные вопросы

1. Каково назначение стабилизаторов напряжения?
2. По каким признакам классифицируются стабилизаторы напряжения?
3. Что относят к основным параметрам стабилизаторов напряжения?
4. Каков принцип действия стабилизаторов напряжения различных типов?
5. Какое влияние оказывает сопротивление нагрузки на коэффициент стабилизации?
6. Какие достоинства и недостатки имеют рассмотренные стабилизаторы напряжения?

Исследование схем на операционных усилителях

Цель работы: изучение принципа работы, основных параметров и характеристик операционного усилителя, исследование типовых схем на его основе.

5.1 Краткие теоретические сведения

Операционный усилитель (ОУ) — многокаскадный усилитель постоянного тока (УПТ) с дифференциальным усилительным каскадом на входе, обладающий большим коэффициентом усиления, высоким входным и малым выходным сопротивлениями.

Операционный усилитель выполняется в виде интегральной микросхемы и является одним из основных элементов аналоговой схемотехники.

Условное графическое обозначение ОУ на схемах электрических принципиальных приведено на рис. 5.2, а. Его выполняют в виде прямоугольника с дополнительными полями, в которых указывают назначение выводов. Операционные усилители имеют два входа: *инвертирующий* и *неинвертирующий*, и один выход. В большинстве случаев сигнал подается на один из входов, а второй вход соединяется с нулевым проводом. При этом, если сигнал подается на инвертирующий вход, то помимо усиления осуществляется его *инвертирование* (изменение знака или сдвиг по фазе на 180°). Инвертирующий вход обозначается кружочком (\ominus) или знаком минус ($-$). Питание ОУ обычно обеспечивается *двухполярным (биполярным) напряжением*, которое подводится к соответствующим выводам ($+U_{\Pi}$ и $-U_{\Pi}$). Кроме того, ОУ может иметь выводы *FC* для подключения цепей частотной коррекции и выводы *NC* для подключения элементов начальной балансировки (установки нуля на выходе при нулевом входном сигнале).

При построении конкретного электронного устройства различаются только способы подключения входов и выхода ОУ. Поэтому на функциональных схемах используется упрощенное обозначение (рис. 5.2, б, в), содержащее только три вывода: два входа и выход. Подключение остальных выводов, как правило, соответствует типовой схеме включения, т. е. цепи коррекции и балансировки для конкретного ОУ являются типовыми и приводятся в справочниках. В качестве примера на рисунке 5.1 приведена одна из схем включения операционного усилителя К140УД6. Некоторые типы ОУ не требуют внешних цепей коррекции и балансировки.

Внутренняя структура ОУ обычно представлена тремя составными частями, имеющими определенное функциональное назначение. *Входным каскадом* является дифференциальный усилитель. Он обладает высоким входным сопротивлением, имеет большой коэффициент усиления по отношению к разности входных сигналов и низкий коэффициент усиления по отношению к одинаковым (синфазным) сигналам на входах. Он также в значительной степени ослабляет влияние изменений температуры и напряжения питания на выходной сигнал. *Промежуточные каскады* (один или несколько) бес-

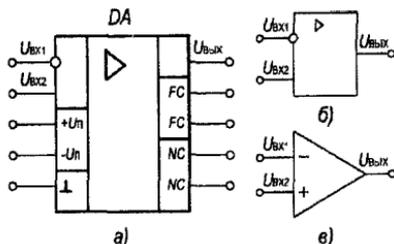


Рисунок 5.2 - Условные графические обозначения ОУ на различных схемах

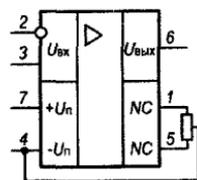


Рисунок 5.1 - Схема включения ОУ К140УД6

печивают необходимое усиление сигнала по току и напряжению, а также согласование выходного и входного сопротивлений предыдущего и последующего каскадов. *Выходной каскад*, который, как правило, выполняется по двухтактной схеме, обеспечивает требуемое усиление сигнала по мощности.

В зависимости от типа ОУ схемы построения каскадов могут иметь свои особенности, а число промежуточных каскадов может быть различным (может и отсутствовать). Однако внутренняя структура ОУ и функциональное назначение отдельных каскадов при этом не изменяются. На рисунке 5.3 приведен один из типовых вариантов схемы ОУ.

На транзисторах $VT1, VT2$ выполнен дифференциальный усилитель. Для задания эмиттерного тока транзисторов $VT1, VT2$ используется источник стабильного тока на транзисторах $VT3$ и $VT4$, выполненный по схеме «токавого зеркала». Резисторы $R_{\Sigma 1}$ и $R_{\Sigma 2}$ компенсируют отличия входных характеристик транзисторов $VT1, VT2$ и увеличивают входное сопротивление усилителя за счет местной последовательной ООС по току нагрузки каждого из транзисторов.

В качестве промежуточных каскадов используются дифференциальный усилитель на транзисторах $VT5$ и $VT6$ и усилитель, выполненный по схеме ОЗ на транзисторе $VT7$. Они обеспечивают дальнейшее усиление сигнала по току, а также усиление по напряжению до требуемого уровня. Температурная стабилизация тока $VT7$ обеспечивается введением ООС по току нагрузки с помощью резистора $R_{\Sigma 4}$.

В выходном каскаде ОУ используется двухтактный усилитель мощности на транзисторах $VT8$ и $VT9$, работающий в режиме класса усиления АВ.

Начальный ток транзисторов задается напряжением смещения диодов $VD1$ и $VD2$. Эти же диоды обеспечивают и температурную стабилизацию тока покоя выходного усилителя. Резисторы $R_{\Sigma 5}$ и $R_{\Sigma 6}$ компенсируют влияние не идентичности параметров комплементарной пары транзисторов $VT8, VT9$. Вывод $U_{КОР}$ используется для подключения элементов частотной коррекции.

Свойства операционного усилителя определяются его статическими и динамическими характеристиками.

Статические передаточные характеристики ОУ представлены на рисунке 5.4. Они получены при подаче сигнала на один из входов и нулевом сигнале на другом входе. Характеристики имеют горизонтальный и наклонный участки.

Наклонный участок каждой кривой соответствует области линейного усиления сигнала. На этом участке выходное напряжение $U_{\text{вых}} = K_{\text{ОУ}} \cdot U_{\text{вх}}$, где $K_{\text{ОУ}}$ — коэффициент усиления ОУ без обратной связи; $U_{\text{вх}}$ — входное напряжение.

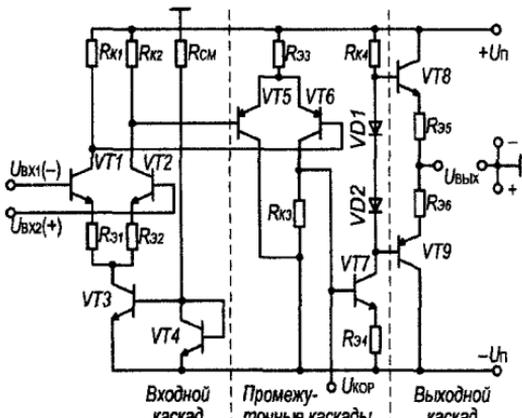


Рисунок 5.3 - Упрощенная схема трехкаскадного ОУ

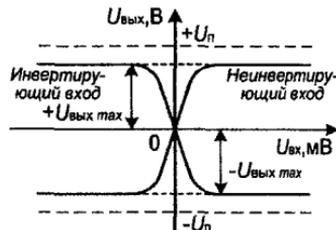


Рисунок 5.4 - Передаточные характеристики ОУ

Горизонтальные участки кривых соответствуют области насыщения, в которой $U_{\text{вых}}$ принимает одно из предельных значений $+U_{\text{вых.мах}}$ либо $-U_{\text{вых.мах}}$. Этими значениями ограничивается амплитуда выходного сигнала. Режим насыщения достигается при $K_{\text{ОУ}} \cdot U_{\text{вх}} > U_{\text{вых.мах}}$. По абсолютному значению $U_{\text{вых.мах}}$ обычно на 2 ... 3 В меньше напряжений питания $U_{\text{П}}$. Например, при $U_{\text{П}} = \pm 15$ В диапазон изменения $U_{\text{вых}}$ близок к ± 12 В. При расчётах обычно принимают $U_{\text{вых.мах}} = (2/3)U_{\text{П}}$ для того, чтобы ОУ гарантированно работал в линейной области.

К динамическим относятся переходные и частотные характеристики ОУ.

На практике при выборе ОУ и расчёте построенных на их основе схем руководствуются основными параметрами, которые приводятся в справочниках. К ним относятся:

- коэффициент усиления по напряжению, $K_{\text{ОУ}}$, характеризует способность ОУ усиливать подаваемый на его входы дифференциальный сигнал (обычно $10^3 \dots 10^6$);
- входное сопротивление, $R_{\text{вх.ОУ}}$ — сопротивление ОУ по отношению к входному сигналу. Различают дифференциальное входное сопротивление $R_{\text{вх.ОУ}}^{\text{диф}}$, т. е. сопротивление между двумя входными выводами, и синфазное входное сопротивление $R_{\text{вх.ОУ}}^{\text{синф}}$, т. е. сопротивление между объединёнными входными выводами и «землёй». Обычно в справочниках приводится значение только $R_{\text{вх.ОУ}}^{\text{диф}}$, сопротивление которого в 10 ... 100 раз меньше синфазного и составляет $10^4 \dots 10^{10}$ Ом;

- выходное сопротивление, $R_{\text{вых.ОУ}}$ — внутреннее сопротивление ОУ (~100 Ом), рассматриваемого по отношению к нагрузке как эквивалентный источник ЭДС;

- входное напряжение смещения, $U_{\text{см}}$. — напряжение между входами операционного усилителя. Оно характеризует разбаланс и несимметрию входного дифференциального каскада ОУ и численно равно постоянному напряжению, которое необходимо приложить к входу ОУ, чтобы его выходное напряжение стало равным нулю (типичные значения: 1 ... 100 мВ);

- входной ток, $I_{\text{вх.ОУ}}$ (входной ток смещения), — ток на входах ОУ, необходимый для работы входного каскада ($10^{-4} \dots 10$ мкА);

- разность входных токов, $\Delta I_{\text{вх}}$ (ток сдвига), — разность входных токов смещения, которая появляется вследствие неравенства коэффициентов передачи тока $h_{21Э}$ транзисторов входного каскада ОУ ($10^{-5} \dots 1$ мкА);

- коэффициент ослабления синфазного сигнала, $K_{\text{ОС.СФ}}$, характеризует способность ослаблять синфазные (приложенные к двум входам одновременно) сигналы (обычно 50 ... 120 дБ).

Динамические свойства ОУ обычно характеризуются двумя параметрами:

- частотой единичного усиления, F_1 (предельной частотой, $F_{\text{мах}}$), на которой модуль коэффициента усиления равен 1 ($10^5 \dots 10^7$ Гц);

- максимальной скоростью нарастания выходного напряжения, V_U $_{\text{вых}}$, которая измеряется при подаче на вход ОУ напряжения ступенчатой формы амплитудой более 0,1 В (обычно 0,1 ... 10 В/мкс).

Для расчетов схем и устройств на основе ОУ очень часто используют понятие идеального ОУ. Под идеальным понимают ОУ со следующими параметрами:

$$K_{\text{ОУ}} \rightarrow \infty; R_{\text{вх.ОУ}}^{\text{диф}} \rightarrow \infty; R_{\text{вых.ОУ}} \rightarrow 0; U_{\text{см}} \rightarrow 0; I_{\text{вх.}} \rightarrow 0. \quad (5.1)$$

В зависимости от технических параметров и характеристик интегральные ОУ делятся на следующие группы:

- быстродействующие широкополосные ОУ, имеющие большую скорость нарастания выходного напряжения и высокую частоту единичного усиления, используют для построения импульсных усилителей и устройств сравнения;
- прецизионные (высокоточные, измерительные) ОУ, характеризующиеся низкой суммарной погрешностью, предназначены для точного выполнения операций над аналоговыми сигналами;
- ОУ общего применения, имеющие средние значения параметров по сравнению с параметрами быстродействующих и прецизионных ОУ, применяются наиболее часто ввиду их дешевизны;
- микромощные ОУ, отличающиеся низкой мощностью, потребляемой от источников питания при отсутствии входного сигнала, применяются в автономных устройствах с малым энергопотреблением;
- мощные ОУ, способные развивать на нагрузке большую выходную мощность до десятков ватт;
- программируемые ОУ, имеющие добавочный вход, подавая напряжение на который, можно управлять параметрами ОУ.

Применение ОУ весьма широко, на его основе можно создавать самые разнообразные электронные устройства: усилители, генераторы, сумматоры, интеграторы, дифференциаторы, активные фильтры и др. Однако следует отметить, что во всех случаях в линейных схемах ОУ используется с цепями отрицательной обратной связи (ООС), снижающими его коэффициент усиления. Без этого нормальная работа устройства невозможна. Цепи ООС могут быть построены на резисторах, либо с использованием реактивных элементов. В последнем случае ООС является частотной зависимой. Таким образом, использование соответствующих цепей ООС позволяет обеспечить требуемую функциональную зависимость между входным и выходным сигналами.

Инвертирующий усилитель обеспечивает усиление сигнала по мощности с изменением знака (инвертированием). Его схема приведена на рисунке 5.5. В этой схеме входной сигнал подаётся на инвертирующий вход ОУ, а его неинвертирующий вход соединен с нулевым проводом. При выполнении условий (5.1) с достаточной точностью можно считать, что коэффициент усиления по напряжению

$$K_U^{\text{инв.}} = -\frac{R_{\text{OC}}}{R_1}, \quad (5.2)$$

а выходное напряжение $U_{\text{вых.}} = K_U^{\text{инв.}} \cdot U_{\text{вх.}}$.

Включение корректирующего резистора $R_{\text{кор}}$, имеющего сопротивление

$$R_{\text{кор}} = \frac{R_1 R_{\text{OC}}}{R_1 + R_{\text{OC}}}, \quad (5.3)$$

повышает точность работы схемы за счет компенсации влияния входных токов $I_{\text{вх.ОУ}}$.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя $R_{\text{вх.}} = R_1$.

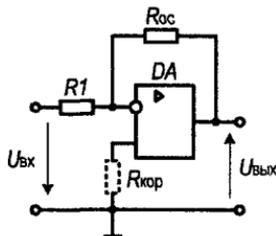


Рисунок 5.5 - Инвертирующая схема включения ОУ

Если $R_{OC} = R_1$, то $K_U = -1$, — получаем инвертирующий повторитель напряжения (инвертор), у которого $U_{\text{вых.}} = -U_{\text{вх.}}$.

Неинвертирующий усилитель обеспечивает усиление сигнала без изменения знака. В этой схеме (рис. 5.6, а) входной сигнал подаётся на неинвертирующий вход ОУ, а на его инвертирующий вход с помощью делителя выходного напряжения, выполненного на резисторах R_1 и R_{OC} , подаётся напряжение ООС. Если считать ОУ идеальным (см. условия (5.1)), то коэффициент усиления неинвертирующего усилителя по напряжению

$$K_U^{\text{неинв.}} = 1 + \frac{R_{OC}}{R_1} = 1 + |K_U^{\text{инв.}}|. \quad (5.4)$$

Если $R_{OC} = 0$ и $R_1 \rightarrow \infty$, получаем схему неинвертирующего повторителя напряжения (рис. 5.6, б) с $K_U = 1$, т.е. $U_{\text{вых.}} = U_{\text{вх.}}$. Входное сопротивление повторителя напряжения на реальном ОУ может составлять $10^7 \dots 10^{12}$ Ом, а выходное — доли ом.

Для повышения точности работы ОУ включают резистор $R_{кор}$, сопротивление которого определяется по формуле (5.3), однако включение этого резистора приводит к уменьшению входного сопротивления усилителя, т. к. в этом случае $R_{\text{вх.}} = R_{кор.}$.

Вычитатель, или дифференциальный усилитель, представляет собой сочетание инвертирующего и неинвертирующего включения ОУ (рис. 5.7, а). Входные напряжения $U_{\text{вх1}}$ и $U_{\text{вх2}}$ подаются соответственно на инвертирующий и неинвертирующий входы.

Выходное напряжение данной схемы

$$U_{\text{вых.}}^{\text{диф.}} = -\frac{R_{OC}}{R_1} U_{\text{вх1}} + \left(1 + \frac{R_{OC}}{R_1}\right) U_{\text{вх2}} \frac{R_3}{R_2 + R_3}, \quad (5.5)$$

если $R_3 = R_{OC}$; $R_2 = R_1$, то $U_{\text{вых.}}^{\text{диф.}} = K_U^{\text{диф.}} (-U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}})$, т. е. выходное напряжение такого устройства прямо пропорционально разности входных напряжений, а коэффициент усиления разностного (дифференциального) сигнала

$$K_U^{\text{диф.}} = \frac{R_{OC}}{R_1}. \quad (5.6)$$

Инвертирующий сумматор (рис. 5.7, б) может быть построен на основе инвертирующего усилителя путем добавления соответствующего числа входов. При этом

$$U_{\text{вых.}}^{\text{сумм.}} = -K_{U1} U_{\text{вх1}} - K_{U2} U_{\text{вх2}} - K_{U3} U_{\text{вх3}}, \quad (5.7)$$

$$\text{где } K_{U1} = \frac{R_{OC}}{R_1}; K_{U2} = \frac{R_{OC}}{R_2}; K_{U3} = \frac{R_{OC}}{R_3}. \quad (5.8)$$

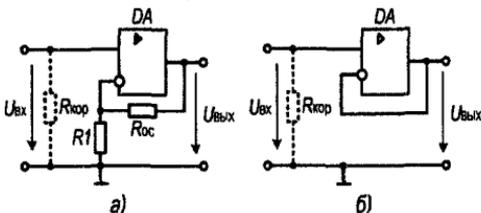


Рисунок 5.6 - Неинвертирующие схемы включения ОУ

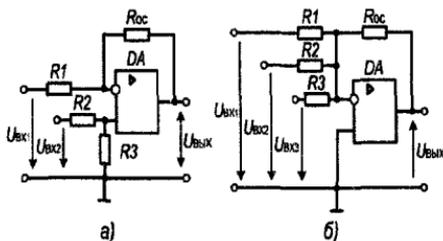


Рисунок 5.7 - Вычитатель (а) и инвертирующий сумматор (б)

Если $R_1 = R_2 = R_3 = R_{OC}$, то $U_{\text{вых}} = -(U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}} + U_{\text{вх3}})$.

Все вышеприведённые соотношения справедливы только тогда, когда операционный усилитель работает в линейном режиме.

5.2 Порядок выполнения

ⓐ Тип операционного усилителя задаётся преподавателем.

ⓑ Для всех исследуемых схем напряжение питания ОУ: $U_{\text{П}} = \pm 15 \text{ В}$.

ⓒ для измерения действующего значения напряжения в свойствах вольтметра установить режим (**Mode**): **AC**.

ⓓ Значения сопротивлений всех резисторов задавать в соответствии с рядом E24.

Задание 1: Исследование инвертирующего усилителя (рис. 5.5):

а) собрать схему (рис. 5.8); установить сопротивление $R_1 = 1 \text{ кОм}$ и сопротивление нагрузки $R_{\text{H}} = 10 \text{ кОм}$; подать на вход усилителя синусоидальный сигнал с действующим значением напряжения $U_{\text{вх}} = 5 \text{ мВ}$ и частотой $f = 10 \text{ кГц}$;

б) задавая значения сопротивления $R_{OC} = (1; 10; 100; 1000) \text{ кОм}$, измерить с помощью вольтметра и записать в таблицу действующие значения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$;

в) используя полученные экспериментальные значения, вычислить коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ и занести результаты в таблицу;

г) занести в таблицу рассчитанные по формуле (5.2) теоретические значения K_U ;

д) построить на одном графике расчётную и экспериментальную кривые $K_U = f(R_{OC})$ и объяснить возможные расхождения;

е) используя **Bode Plotter**, получить ЛАЧХ и ФЧХ исследуемой схемы в диапазоне частот $f = 1 \text{ Гц} \dots 100 \text{ МГц}$ при $R_{OC} = 1 \text{ МОм}$ и определить частоту единичного усиления F_1 (частота, на которой модуль коэффициента усиления K_U , дБ = 0, что соответствует $K_U = 1$).

Задание 2: Исследование неинвертирующего усилителя (рис. 5.6, а):

а) внести в соответствии с рис. 5.6, а необходимые изменения в схему (рис. 5.8) и выполнить пункты а) – в) **Задания 1**;

б) занести в таблицу рассчитанные по формуле (5.4) теоретические значения K_U ;

в) выполнить пункты д) – е) **Задания 1**.

Задание 3: Исследование вычитателя (дифференциального усилителя) (рис. 5.7, а):

а) собрать схему вычитателя, подключить к входам источники постоянного напряжения с заданными значениями $U_{\text{вх1}}$ и $U_{\text{вх2}}$, а к выходу – вольтметр;

б) принимая $R_{OC} = R_3 = 30 \text{ кОм}$, по заданному преподавателем значению $K_U^{\text{диф}}$ рассчитать по формуле (5.6) значение сопротивления резистора R_1 ; принять $R_2 = R_1$;

в) с помощью вольтметра измерить выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ и сравнить с рас-

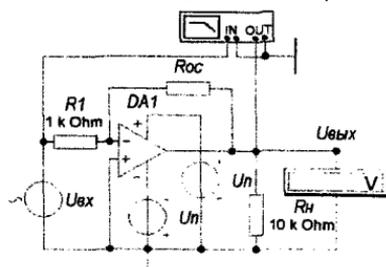


Рисунок 5.8 - Схема исследования инвертирующего усилителя

считанным по формуле (5.5) теоретическим значением $U_{\text{вых.}}^{\text{диф.}}$.

Задание 4: Исследование инвертирующего сумматора (рис.5.7, б):

- собрать схему сумматора, подключить к входам источники постоянного напряжения с заданными значениями $U_{\text{вх.1}} \dots U_{\text{вх.N}}$, а к выходу – вольтметр;
- принимая $R_{\text{OC}} = 100 \text{ кОм}$, по заданным преподавателем значениям $K_1 \dots K_N$ рассчитать по формуле (5.8) значения сопротивлений резисторов $R_1 \dots R_N$;
- с помощью вольтметра измерить значение выходного напряжения $U_{\text{вых.}}$ и сравнить с теоретическим значением $U_{\text{вых.}}^{\text{сумм.}}$, рассчитанным по формуле (5.7).

5.3 Контрольные вопросы

- Из каких каскадов состоит операционный усилитель?
- Какими основными параметрами характеризуется ОУ?
- Чем ограничивается выходное напряжение ОУ?
- Почему для работы ОУ необходимо наличие цепей ООС и в чем их назначение?
- Как рассчитывается коэффициент усиления для различных схем включения ОУ?
- Как можно реализовать схемы суммирования и вычитания входных сигналов?

Лабораторная работа №6

Исследование логических схем и функций

Цель работы: исследование логических схем; изучение методики синтеза комбинационных схем общего назначения на логических элементах; приобретение практических навыков синтеза логических функций в заданном базисе логических элементов.

6.1 Краткие теоретические сведения

Логический элемент (ЛЭ) в электронике — это электронная схема, работающая в ключевом режиме и выполняющая одну определённую логическую операцию над входными сигналами согласно правилам алгебры логики. В зависимости от полярности напряжения питания логического элемента различают *положительную* ($U_{\text{П}} > 0$) и *отрицательную* ($U_{\text{П}} < 0$) логику. В положительной логике *логической единице* (лог. "1") соответствует *высокий* (в отрицательной логике — *низкий*) уровень выходного напряжения (обозначается — U^1), а *логическому нулю* (лог. "0") соответствует *низкий* (в отрицательной логике — *высокий*) уровень выходного напряжения (обозначается — U^0).

Логические элементы, выпускаемые в настоящее время в виде интегральных микросхем, выполняют следующие логические операции:

- "НЕ"** (англ. NOT) — *инверсия (отрицание)*, обозначается чертой над переменной "—" или апострофом "'": $F = \bar{A} = A'$. Читается: F равно не A .
- "ИЛИ"** (англ. OR) — *дизъюнкция (логическое сложение)*, обозначается знаком "+ " либо "∨": $F = A + B = A \vee B$. Читается: F равно A или B .
- "И"** (англ. AND) — *конъюнкция (логическое умножение)*, обозначается знаком "· " либо "∧" (иногда и не обозначают): $F = A \cdot B = A \wedge B$. Читается: F равно A и B .
- "ИЛИ-НЕ"** (англ. NOR) — *стрелка Пирса "↓"* (логическое сложение с инверсией): $F = A \downarrow B = \overline{A + B} = \bar{A} \cdot \bar{B}$. Читается: F равно не A и не B .

5. "И-НЕ" (англ. **NAND**) — штрих Шеффера "!" (логическое умножение с инверсией): $F = A|B = \overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$. Читается: F равно не A или не B .

6. "Исключающее ИЛИ" (англ. **XOR**) — строгая дизъюнкция (неравнозначность): $F = A \lt \gt B = A \oplus B = A \cdot \overline{B} + \overline{A} \cdot B$. Читается: F равно или A или B .

7. "Исключающее ИЛИ-НЕ" (англ. **XNOR**) — эквивалентность (равнозначность): $F = A \sim B = A \odot B = \overline{A \oplus B} = A \cdot B + \overline{A} \cdot \overline{B}$. Читается: F равно A как B .

Таблица 6.1

| № пп | Название ЛЭ | Условные графические обозначения | | | Таблицы истинности | | |
|------|------------------------------|---|---|---|--------------------|---|---|
| | | ГОСТ | EWB (IEC) | EWB (ANSI) | A | B | F |
| 1 | НЕ (NOT) инвертор |  |  |  | 0 | — | 1 |
| | | | | | 1 | — | 0 |
| 2 | ИЛИ (OR) дизъюнктор |  |  |  | 0 | 0 | 0 |
| | | | | | 0 | 1 | 1 |
| | | | | | 1 | 0 | 1 |
| | | | | | 1 | 1 | 1 |
| 3 | И (AND) конъюнктор |  |  |  | 0 | 0 | 0 |
| | | | | | 0 | 1 | 0 |
| | | | | | 1 | 0 | 0 |
| | | | | | 1 | 1 | 1 |
| 4 | ИЛИ-НЕ (NOR) |  |  |  | 0 | 0 | 1 |
| | | | | | 0 | 1 | 0 |
| | | | | | 1 | 0 | 0 |
| | | | | | 1 | 1 | 0 |
| 5 | И-НЕ (NAND) |  |  |  | 0 | 0 | 1 |
| | | | | | 0 | 1 | 1 |
| | | | | | 1 | 0 | 1 |
| | | | | | 1 | 1 | 0 |
| 6 | Исключающее ИЛИ (XOR) |  |  |  | 0 | 0 | 0 |
| | | | | | 0 | 1 | 1 |
| | | | | | 1 | 0 | 1 |
| | | | | | 1 | 1 | 0 |
| 7 | Исключающее ИЛИ-НЕ (XNOR) |  |  |  | 0 | 0 | 1 |
| | | | | | 0 | 1 | 0 |
| | | | | | 1 | 0 | 0 |
| | | | | | 1 | 1 | 1 |

В таблице 6.1 приведены условные графические обозначения основных ЛЭ согласно ГОСТ и их обозначения в программе Electronics Workbench (EWB) в стандартах IEC (МЭК) и ANSI, а также таблицы истинности, соответствующие выполняемым логическим операциям.

Соединяя по определённым правилам логические элементы, получают логические схемы, которые можно разделить на два класса:

— **комбинационные**, в которых значения выходных сигналов однозначно определя-

ются комбинацией входных сигналов в данный момент времени и не зависят от предыдущего состояния устройства;

– *последовательностные (дискретные автоматы с памятью)*, в которых значения выходных сигналов зависят не только от комбинации входных сигналов в данный момент времени, но и от предыдущего состояния устройства.

Закон функционирования логических схем можно описать, используя алгебру логики (булеву алгебру), или с помощью таблиц, называемых *таблицами истинности*.

Логической функцией, или *функцией алгебры логики* (ФАЛ), называется функция нескольких переменных A, B, \dots, N , т.е. $F = f(A, B, \dots, N)$, когда сама функция и независимые переменные могут принимать только два значения: "0" и "1".

Логическую функцию любой сложности можно реализовать с помощью трёх простейших логических функций — инверсии, дизъюнкции и конъюнкции (строки 1...3 в таблице 6.1). Поэтому набор логических элементов И, ИЛИ и НЕ называют *функционально полной системой логических элементов*, или *полным базисом*. Функционально полные системы могут состоять из элементов только одного типа, например, И-НЕ либо ИЛИ-НЕ (строки 4, 5 в таблице 6.1). Такие системы называют *дуальными базисами*.

Способы задания логических функций

1. Словесный способ

Например, логическая функция F трёх аргументов A, B, C принимает значение "1", если два любых аргумента или все три равны "1". Во всех других случаях значение функции равно "0".

2. Табличный способ

При этом способе логическая функция представляется в виде *таблицы истинности*, в которой выписываются все возможные наборы аргументов в порядке возрастания их номеров и для каждого набора устанавливается значение функции "0" или "1". В таблице 6.2 представлена описанная выше функция F .

3. Алгебраический способ

В алгебраической форме представления функции удобно производить различные преобразования, например, с целью минимизации.

При переходе от таблицы истинности к алгебраическому способу задания ФАЛ получают две стандартные формы её представления:

- *совершенная дизъюнктивная нормальная форма* (СДНФ);
- *совершенная конъюнктивная нормальная форма* (СКНФ).

Для записи функции в виде СДНФ необходимо для каждого набора, на котором функция равна "1", записать произведения всех аргументов, причём, если аргумент в этом наборе принимает значение "0", то записывается его отрицание. Такие элементарные произведения называют *конституентами единицы* или *минтермами*. Затем производят логическое сложение (дизъюнкцию) полученных минтермов.

Для записи функции в виде СКНФ необходимо для каждого набора, на котором функция равна "0", составить алгебраическую сумму всех аргументов, причём, если аргумент в этом наборе принимает значение "1", то пишется его отрицание. Такие элементарные суммы называют *конституентами нуля* или *макстермами*. После этого произ-

Таблица 6.2

| Номер набора | Аргументы | | | Функция F |
|--------------|-----------|-----|-----|-------------|
| | A | B | C | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 1 |

водят логическое умножение (конъюнкцию) полученных макстермов.

В качестве примера представим функцию, заданную в таблице 6.2, в СДНФ:

$$F(A, B, C) = \bar{A} \cdot B \cdot C + A \cdot \bar{B} \cdot C + A \cdot B \cdot \bar{C} + A \cdot B \cdot C; \quad (6.1)$$

и СКНФ:

$$F(A, B, C) = (A + B + C) \cdot (A + B + \bar{C}) \cdot (A + \bar{B} + C) \cdot (\bar{A} + B + C). \quad (6.2)$$

После представления логической функции в какой-либо из форм (СДНФ или СКНФ) логическую схему можно реализовать (синтезировать) в заданном базисе логических элементов. Однако полученная при этом схема, как правило, не оптимальна с точки зрения её практической реализации.

Задача синтеза комбинационной схемы состоит в построении реальной схемы на основе заданных законов её функционирования с использованием минимального числа логических элементов. Поэтому полученные таким образом функции обычно *минимизируют* с целью уменьшения стоимости технической реализации, повышения быстродействия и надёжности работы схемы, используя для этого различные методы.

Минимизация с использованием аксиом и законов алгебры логики

Таблица 6.3

| № | Законы | конъюнкция (а) | дизъюнкция (б) |
|---------|--------------------------|---|---------------------------------------|
| 1. | Нулевого множества | $A \cdot 0 = 0$ | $A + 0 = A$ |
| 2. | Универсального множества | $A \cdot 1 = A$ | $A + 1 = 1$ |
| 3. | Повторения | $A \cdot A = A$ | $A + A = A$ |
| 4. | Дополнительности | $A \cdot \bar{A} = 0$ | $A + \bar{A} = 1$ |
| 5. | Двойной инверсии | $\bar{\bar{A}} = A$ | |
| 6. | Переместительный | $A \cdot B = B \cdot A$ | $A + B = B + A$ |
| 7. | Сочетательный | $A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$ | $A + (B + C) = (A + B) + C$ |
| 8. | Распределительный | $A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$ | $A + (BC) = (A + B)(A + C)$ |
| 9. | Поглощения | $A + A \cdot B = A$ | $A \cdot (A + B) = A$ |
| 10. | Склеивания | $(A + B) \cdot (A + \bar{B}) = A$ | $A \cdot B + A \cdot \bar{B} = A$ |
| 11. | Замещения | $A \cdot (\bar{A} + B) = A \cdot B$ | $A + \bar{A} \cdot B = A + B$ |
| 12. | Двойственности | $A \cdot \bar{B} = \bar{A} + \bar{B}$ | $\bar{A + B} = \bar{A} \cdot \bar{B}$ |
| Аксиомы | 1. | $0 \cdot 0 = 0$ | $1 + 1 = 1$ |
| | 2. | $1 \cdot 0 = 0 \cdot 1 = 0$ | $0 + 1 = 1 + 0 = 1$ |
| | 3. | $1 \cdot 1 = 1$ | $0 + 0 = 0$ |

В таблице 6.3 приведены аксиомы и законы алгебры логики, с помощью которых минимизируется ФАЛ. Каждая аксиома и закон (за исключением выражения 5) представлена в двух видах, что вытекает из принципа *дуальности* (двойственности) логических операций, согласно которому операции конъюнкции и дизъюнкции допускают взаимную замену, если одновременно поменять "1" на "0", "0" на "1", а знак "+" на "-". Соотношения 12 распространяются на любое число переменных и называются правилом (или теоремой) де Моргана. Из него следует, что логический элемент И-НЕ можно заменить логическим элементом ИЛИ с инвертированными входными величинами, а логический элемент ИЛИ-НЕ можно заменить элементом И, на входе которого значения переменных A и B заменены на \bar{A} и \bar{B} . Очевидно, что возможна и обратная замена. Из теоремы де Моргана также следует, что все три логические функции "И", "ИЛИ", "НЕ" можно

выполнить, используя элементы только одного типа ИЛИ-НЕ либо И-НЕ. Элемент НЕ получается из упомянутых элементов параллельным соединением всех входов.

Рассмотрим процесс минимизации на примере логической функции, представленной в виде СДНФ (6.1). Воспользуемся сначала законом повторения (выражение 3б в таблице 6.3) и добавим к заданной ФАЛ ещё два слагаемых ABC :

$$F(A, B, C) = \bar{A}BC + A\bar{B}C + AB\bar{C} + ABC + ABC + ABC.$$

После группирования подобных членов (распределительный закон) получим

$$F(A, B, C) = (\bar{A} + A)BC + (\bar{B} + B)AC + (\bar{C} + C)AB.$$

Теперь с учётом законов дополнителности и универсального множества (4б и 2а в таблице 6.3) последнее выражение примет окончательный вид

$$F(A, B, C) = B \cdot C + A \cdot C + A \cdot B, \quad (6.3)$$

если использовать распределительный закон (8а в таблице 6.3), то

$$F(A, B, C) = A \cdot (B + C) + B \cdot C. \quad (6.4)$$

Теперь можно сравнить количество логических элементов, которое требуется для реализации исходной ФАЛ (6.1), с количеством ЛЭ, необходимых для реализации минимизированных ФАЛ (6.3) и (6.4):

- ФАЛ (6.1): 4 ЛЭ И с тремя входами + 1 ЛЭ ИЛИ с четырьмя входами = 5 ЛЭ;
- ФАЛ (6.3): 3 ЛЭ И с двумя входами + 1 ЛЭ ИЛИ с тремя входами = 4 ЛЭ;
- ФАЛ (6.4): 2 ЛЭ И с двумя входами + 2 ЛЭ ИЛИ с двумя входами = 4 ЛЭ.

Очевидно, что в результате минимизации количество логических элементов, которое требуется для реализации заданной логической функции, уменьшилось.

Следует отметить, что скорость минимизации при использовании этого метода во многом зависит от квалификации и опыта специалиста, проводящего минимизацию.

Минимизация логических функций с помощью карт Карно

Для минимизации логических функций, число переменных в которых не более пяти, проще всего использовать карты Карно.

| | | | |
|-----------|------------------|------------|------------|
| | B | \bar{B} | B |
| A | $\bar{A}\bar{B}$ | $\bar{A}B$ | $A\bar{B}$ |
| \bar{A} | $\bar{A}\bar{B}$ | $\bar{A}B$ | $A\bar{B}$ |
| A | $A\bar{B}$ | AB | |

| | | | |
|------------------|-------------------------|-------------------|-------------|
| | C | \bar{C} | C |
| AB | $\bar{A}\bar{B}$ | $A\bar{B}\bar{C}$ | $A\bar{B}C$ |
| $\bar{A}\bar{B}$ | $\bar{A}\bar{B}\bar{C}$ | $\bar{A}\bar{B}C$ | $A\bar{B}C$ |
| $\bar{A}B$ | $A\bar{B}\bar{C}$ | $A\bar{B}C$ | |
| AB | $A\bar{B}\bar{C}$ | $A\bar{B}C$ | |
| $A\bar{B}$ | $A\bar{B}\bar{C}$ | $A\bar{B}C$ | |

| | | | |
|------|------|-----|-------|
| | C | 0 | 1 |
| AB | 00 | | |
| 01 | | | 1^b |
| 11 | a | 1 | 1 |
| 10 | | | c |

а)
б)
в)

Рисунок 6.1 - Упрощение логических выражений с помощью карты Карно

Карту Карно можно рассматривать как графическое представление всех минтермов заданного числа переменных. Она представляет собой прямоугольную таблицу, разделённую горизонтальными и вертикальными линиями на клетки, общее число которых равно 2^n . В каждую клетку карты заносится значение одного минтерма, причём, минтермы соседних клеток должны отличаться только значением одной переменной (соседними считаются также крайние клетки каждого столбца или строки).

Карты Карно для двух и трёх аргументов соответственно представлены на рисунке 6.1, а, б. Для случая трех переменных имеется восемь возможных комбинаций переменных A, B и C , которые представлены восемью квадратами на карте. В соответствующие квадраты заносятся единицы, отображающие каждый из минтермов логического выражения, записанного в СДНФ; нулевые значения минтермов можно не обозначать. Далее методом "склеивания" единиц на карте Карно производится минимизация логической функции.

Поясним технику "склеивания" единиц на примере функции алгебры логики (6.1).

Нанесём на карту в соответствующие квадраты четыре единицы, которые соответствуют четырём членам в заданном выражении (6.1). Обведём контуром соседние единицы, придерживаясь следующих правил:

- форма контуров квадратная или прямоугольная;
- в контуре может быть 2, 4, 8 и т. д. единиц (т. е. число единиц кратное 2^n);
- число контуров должно быть минимальным, а их размер – максимальным.

Полученная карта Карно изображена на рисунке 6.1, в. Каждая группа из двух соседних единиц обведена контурами соответственно a, b и c . Контур a , объединяющий две единицы, содержит \bar{C} и C (см. рис. 6.1, б и в), следовательно, \bar{C} и C можно опустить. Контур b , объединяющий две единицы, содержит \bar{A} и A , следовательно, \bar{A} и A можно опустить. Контур c , объединяющий две единицы, содержит \bar{B} и B , поэтому \bar{B} и B также можно опустить. В результате упрощённое с помощью карты Карно логическое выражение (6.1) будет иметь вид

$$F(A, B, C) = B \cdot C + A \cdot C + A \cdot B. \quad (6.5)$$

Как видно, данное выражение совпадает с ранее минимизированной функцией (6.3).

Таким образом, для минимизации логических функций с помощью карт Карно можно воспользоваться следующими рекомендациями:

1. Начните с логического выражения, записанного в СДНФ.
2. Нанесите единицы на карту Карно.
3. Объедините соседние единицы контурами, охватывающими 2, 4, 8 квадратов.
4. Проведите упрощения, исключая члены, дополняющие друг друга внутри контуров.
5. Объедините оставшиеся члены (по одному в каждом контуре) функцией "ИЛИ".
6. Запишите полученное упрощённое логическое выражение в СДНФ.

Переход к заданному базису логических элементов

Рассмотрим сначала переход к базису 2И-НЕ (т. е. к двухходовым ЛЭ И-НЕ). Для этого воспользуемся выражением (6.4) и, учитывая закон двойной инверсии, применим к нему правило де Моргана (соответственно 5 и 12б в таблице 6.3):

$$F(A, B, C) = \overline{A \cdot (\bar{B} + C)} + \overline{B \cdot C} = \overline{A \cdot (\bar{B} \cdot \bar{C})} \cdot \overline{B \cdot C}. \quad (6.6)$$

Аналогично, для перехода к базису 2ИЛИ-НЕ (ЛЭ ИЛИ-НЕ с двумя входами) к выражению (6.4) применим к нему правило де Моргана (12а в таблице 6.3):

$$F(A, B, C) = \overline{A \cdot (B + C)} + \overline{B \cdot C} = \overline{\bar{A} + (B + C)} + \overline{B + C}. \quad (6.7)$$

На рисунке 6.2 представлены комбинационные схемы минимизированной ФАЛ в базисах 2И-НЕ (рис.6.2, а) и 2ИЛИ-НЕ (рис.6.2, б) в соответствии с выражениями (6.6) и

(6.7). Следует обратить внимание, что в схеме (рис.6.2, б) для снятия инверсии, отсутствующей в выражении (6.7), к выходу ЛЭ DD4 добавлен инвертор DD5.

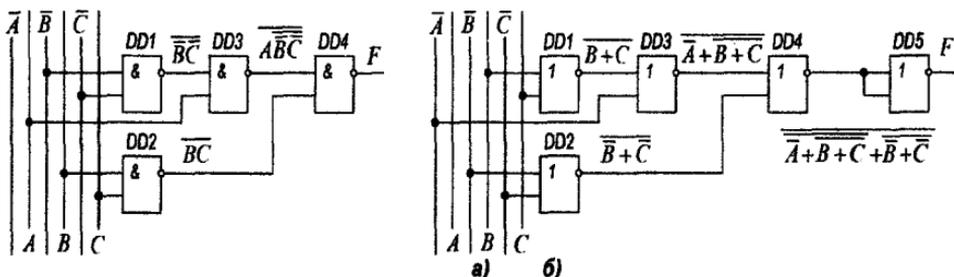


Рисунок 6.2 - Комбинационные схемы ФАЛ (6.1) в различных базисах: 2И-НЕ (а) и 2ИЛИ-НЕ (б)

Общие сведения о цифровых интегральных схемах.

Интегральная схема (ИС) – электронная схема произвольной сложности, изготовленная на полупроводниковом кристалле (или плёнке) и помещенная в неразборный корпус.

Серия — это группа микросхем, имеющих единое конструктивно-технологическое исполнение и предназначенных для совместного применения. Микросхемы одной серии, как правило, имеют одинаковые напряжения источников питания, согласованы по входным и выходным сопротивлениям, уровням сигналов.

Основой каждой серии цифровых микросхем является базовый логический элемент. По принципу построения их подразделяют на следующие основные типы интегральных микросхем с элементами:

- резистивно-транзисторной логики (РТЛ) (в настоящее время практически не используются),
- диодно-транзисторной логики (ДТЛ),
- транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ),
- эмиттерно-связанной транзисторной логики (ЭСТЛ),
- интегрально-инжекционной логики (ИИЛ, или И²Л),
- микросхемы на так называемых комплементарных МОП структурах (КМОПТЛ).

Наибольшим быстродействием обладают ЛЭ, выполненные по технологии ЭСТЛ и ТТЛШ (транзисторно-транзисторная логика с транзисторами Шоттки). Меньше потребляет мощности КМОПТЛ. Она же лучшая по помехоустойчивости и нагрузочной способности. ЭСТЛ и И²Л меньше других генерируют помехи.

6.2 Порядок выполнения

❶ При исследовании логических элементов и схем использовать ЛЭ (Logic Gates) типа ТТЛ. Для этого в свойствах ЛЭ (Component Properties...) перейти к вкладке Models, выбрать библиотеку (Library) ttl и задать модель (Model) LS.

❷ В качестве логической единицы использовать +Vcc Voltage Source (группа компонентов Sources).

❸ Для индикации логических состояний на входе и выходе логических элементов

или схем использовать логические пробники (Red Probe) из группы Indicators.

Задание 1: Исследование интегральных логических элементов:

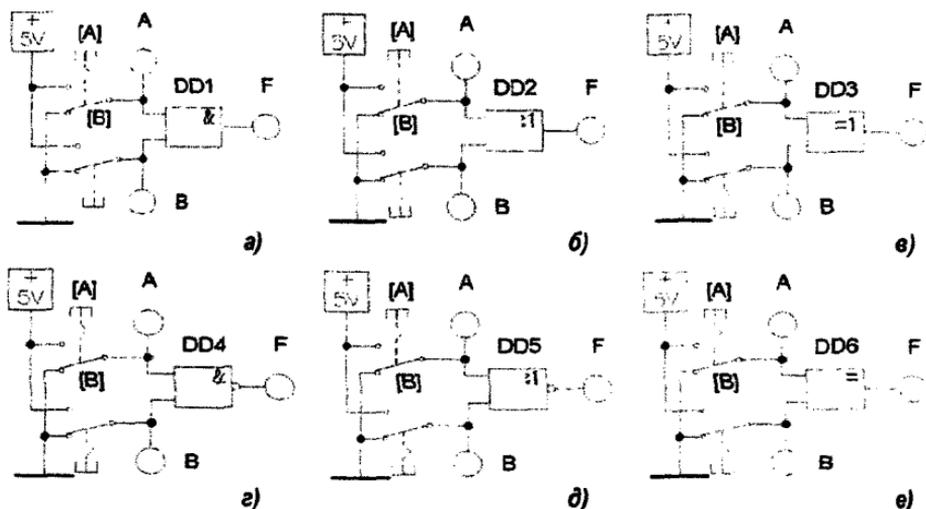


Рисунок 6.3 - Схемы для исследования логических элементов:
И (а); ИЛИ (б); исключающее ИЛИ (в); И-НЕ (г); ИЛИ-НЕ (д); исключающее ИЛИ-НЕ (е)

а) для указанных преподавателем логических элементов собрать схемы в соответствии с рисунком 6.3, заполнить таблицы истинности и сравнить их с таблицами истинности, представленными в таблице 6.1;

б) по указанию преподавателя собрать и исследовать схемы, реализующие функции "И", "ИЛИ", "НЕ", "исключающее ИЛИ", "исключающее ИЛИ-НЕ", на логических элементах И-НЕ, ИЛИ-НЕ. Результаты свести в таблицы истинности.

Задание 2: Изучение методики синтеза цифровых комбинационных схем:

а) в соответствии с заданием составить таблицу истинности и записать логическое выражение заданной функции в виде СДНФ;

б) минимизировать полученное выражение с помощью карты Карно;

в) составить принципиальную схему реализации заданной функции в указанном преподавателем базисе логических элементов (в качестве примера см. рисунок 6.2);

г) собрать полученную схему в программе *Electronics Workbench* и проверить соответствие её работы заданной таблице истинности. Работоспособность схемы продемонстрировать преподавателю.

6.3 Контрольные вопросы

1. Что называют цифровыми логическими элементами?
2. Перечислите основные логические функции и приведите их таблицы истинности.
3. Какие логические устройства называют комбинационными, последовательными?
4. Какой набор логических элементов называют функционально полным (базовым)?
5. Способы задания логических функций.
6. Получение СДНФ либо СКНФ по таблицам истинности.
7. Способы минимизации логических функций.

8. Что представляет собой серия цифровых (логических) ИС?
9. Как классифицируются базовые логические элементы по принципу построения?

Литература

1. Карлашук, В.И. Электронная лаборатория на IBM PC: программа Electronics Workbench и ее применение / В.И. Карлашук. – М.: Солон-Р, 1999. – 512 с.
2. Электроника и электротехника в экспериментах и упражнениях. Практикум на Electronics Workbench / Под ред. Д.И. Панфилова. – М.: ДОДЭКА, 2000. – Т.1,2.
3. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: Высш. шк., 2005. – 790 с.
4. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов / Ю.С. Забродин. – М.: ООО ИД «Альянс», 2008. – 496 с.
5. Горбачёв, Г.Н. Промышленная электроника: учебник для вузов / Г.Н. Горбачёв, Е.Е. Чаплыгин; под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
6. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники: учебное пособие / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – Минск: Высшая школа, 1992. – 380 с.
7. Прянишников, В.А. Электроника: Полный курс лекций / В.А. Прянишников. – 4-е изд.–СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 415 с.
8. Хоровиц, П. Искусство схемотехники. / П. Хоровиц, У. Хилл; пер. с англ.– Изд. шестое. – М.: Мир, 2001. – 704 с.

Приложение

Краткая инструкция по работе с программой Electronics Workbench

П.1. Графический интерфейс пользователя Electronics Workbench

Система схемотехнического моделирования *Electronics Workbench* представляет собой программное средство разработки и анализа методом имитационного моделирования электронных устройств.

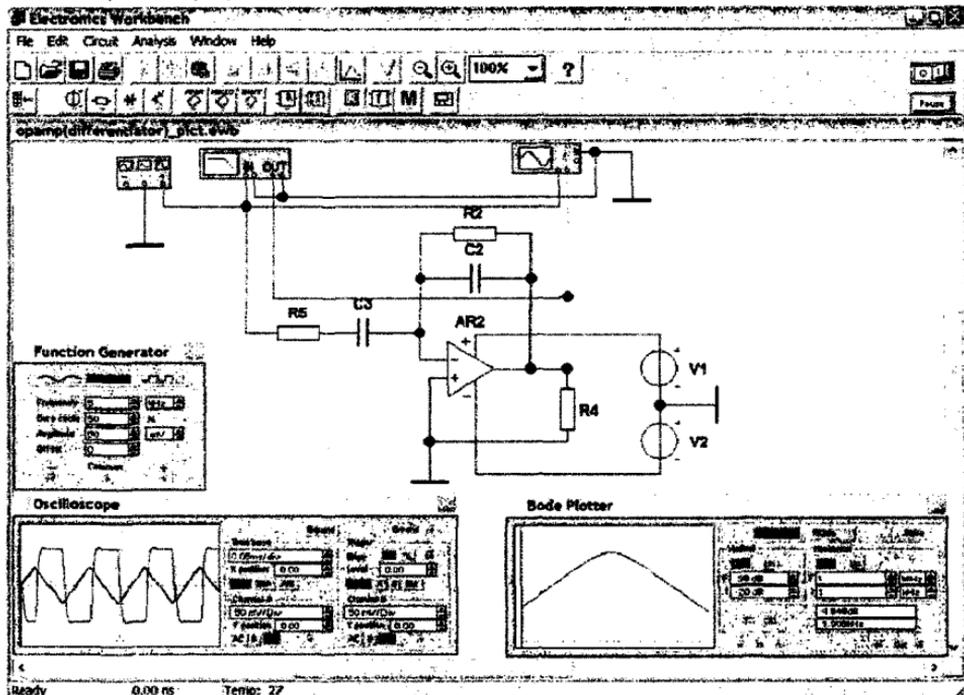


Рисунок П.1 - Внешний вид окна программы Electronics Workbench

Интерфейс пользователя состоит из полосы меню, панели инструментов и рабочей области (рис. П.1). Схема исследуемого устройства или цепи строится в рабочей области с использованием компонентов, выбираемых на панели инструментов, и может быть сохранена в отдельном файле. Открытие файла позволяет смоделировать работу данного устройства или цепи. При этом токи и напряжения могут отображаться на соответствующих индикаторах, а изменения сигналов — на виртуальном осциллографе. Таким образом, программа позволяет воспроизвести на экране компьютера натуральный эксперимент по исследованию соответствующего электронного устройства или цепи.

Полоса меню включает в себя подменю работы с файлами (**File**), редактирования (**Edit**), работы с цепями (**Circuit**), анализа схем (**Analysis**), работы с окнами (**Window**), работы с файлами справок (**Help**).

Панель инструментов состоит из “быстрых кнопок”, имеющих аналоги в меню, кнопок запуска и приостановки процесса моделирования, набора радиозлектронных аналоговых и цифровых компонентов, индикаторов, элементов управления и инструментов.

Меню **File** (Alt+F) позволяет осуществлять следующие операции работы с файлами:

| | | |
|--------------------------------|---|----------|
| File/New | закрытие текущей модели и создание безымянного окна, которое может использоваться для создания новой модели | (Ctrl+N) |
| File/Open... | открытие уже существующего файла | (Ctrl+O) |
| File/Save | сохранение текущего файла на диске | (Ctrl+S) |
| File/Save as... | сохранение текущей модели в новом файле (с новым именем) | |
| File/Revert to Saved... | возврат к исходной сохранённой схеме | |
| File/Print... | распечатка схемы и/или приборов | (Ctrl+P) |
| File/Print Setup... | настройка принтера | |
| File/Exit | завершение работы с программой Electronics Workbench | (Alt+F4) |

Меню **Edit** (Alt+E) позволяет осуществить стандартные операции редактирования:

| | | |
|-----------------------|--|----------|
| Cut | вырезание | (Ctrl+X) |
| Copy | копирование | (Ctrl+C) |
| Paste | вставка | (Ctrl+V) |
| Delete | удаление выделенных элементов | (Del) |
| Select All | выделение всех элементов в активном окне | (Ctrl+A) |
| Copy as Bitmap | копирование растрового изображения области окна в буфер обмена | |
| Show Clipboard | отображение содержимого буфера обмена | |

Меню **Circuit** (Alt+C) позволяет осуществить операции с выделенными компонентами:

| | | |
|-----------------------------|--|-----------------|
| Rotate | поворот на 90 градусов | (Ctrl+R) |
| Flip Horizontal | зеркальное отображение по горизонтали | |
| Flip Vertical | зеркальное отображение по вертикали | |
| Component Properties | изменение параметров компонентов | |
| Create Subcircuit | преобразование выделенных элементов в подсхему | (Ctrl+B) |
| Zoom In / Zoom Out | увеличение / уменьшение изображения схемы | (Ctrl+)/(Ctrl-) |
| Schematic Options | определение параметров отображения схемы | |

Меню **Analysis** (Alt+A) позволяет управлять процессом моделирования и выполнить анализ работы схемы в различных режимах:

| | | |
|---------------------------|--|----------|
| Activate | запуск процесс моделирования | (Ctrl+G) |
| Pause/Resume | приостановка/продолжение моделирования | (Ctrl+T) |
| Stop | прекращение моделирования | (F9) |
| Analysis Options | задание параметров моделирования | (Ctrl+Y) |
| DC Operating Point | расчёт режима работы схемы по постоянному току | |
| AC Frequency... | расчёт частотных характеристик | |
| Transient... | расчет переходных процессов | |
| Fourier... | проведение Фурье-анализа (спектрального анализа) | |
| Monte Carlo... | статистический анализ по методу Монте-Карло | |
| Display Graphs | вывод на экран результатов моделирования в виде графиков | |

Меню **Window** (Alt+W) позволяет осуществлять операции работы с окнами:

| | | |
|--------------------|-----------------------------------|----------|
| Arrange | упорядочение расположения окон | (Ctrl+W) |
| Circuit | вывод окна схемы на передний план | |
| Description | открытие окна описания схемы | (Ctrl+D) |

Меню **Help** (Alt+H или F1) вызывает файл справки.

❶ В скобках приведены комбинации клавиш вызова соответствующих команд.

П.2. Порядок формирования модели

1. Для сохранения создаваемой модели необходимо открыть новый файл и присвоить ему соответствующее наименование. При этом на экране появится чистая рабочая область.

2. Выбрать и перетащить мышью на рабочую область элементы, необходимые для построения схемы, из соответствующих разделов на панели инструментов:

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | Sources | источники сигналов | | | | | | | | | | |
| 2 | Basic | пассивные компоненты и коммутационные устройства | | | | | | | | | | |
| 3 | Diodes | диоды, стабилитроны (Zener Diode), тиристоры | | | | | | | | | | |
| 4 | Transistors | биполярные и полевые транзисторы | | | | | | | | | | |
| 5 | Analog ICs | аналоговые микросхемы | | | | | | | | | | |
| 6 | Mixed ICs | аналого-цифровые микросхемы, одновибраторы, таймер | | | | | | | | | | |
| 7 | Digital ICs | цифровые микросхемы | | | | | | | | | | |
| 8 | Logic Gates | логические элементы и микросхемы | | | | | | | | | | |
| 9 | Digital | комбинационные и последовательностные цифровые схемы | | | | | | | | | | |
| 10 | Indicators | индикаторные устройства (вольтметр, амперметр, пробник...) | | | | | | | | | | |
| 11 | Controls | аналоговые вычислительные устройства | | | | | | | | | | |
| 12 | Miscellaneous | компоненты смешанного типа | | | | | | | | | | |
| 13 | Instruments | контрольно-измерительные приборы | | | | | | | | | | |

3. Выбранные элементы располагаются в требуемой для построения схемы последовательности. Выделенный компонент схемы (отображается красным цветом) можно повернуть (с помощью сочетания клавиш **Ctrl+R**, контекстного меню, кнопок на панели

инструментов или пункта меню **Circuit > Rotate**) или зеркально отразить относительно вертикальной (горизонтальной) оси. При повороте измерительных приборов (амперметр, вольтметр и др.) меняются местами клеммы подключения.

4. Выполняются соединения между элементами схемы. Для этого необходимо щелкнуть по точке подключения одного элемента левой кнопкой мыши и, не отпуская её, довести курсор до точки подключения второго элемента. В случае необходимости можно добавить дополнительные узлы (разветвления).

5. В схеме обязательно должно использоваться соединение с общим (нулевым) проводом, потенциал которого условно принимается равным нулю. В противном случае при запуске процесса моделирования будет выдаваться сообщение об ошибке.

6. Задаются значения параметров и свойства каждого элемента. Для этого нужно дважды щелкнуть мышью на элементе и в появившемся окне ввести необходимые данные.

7. В зависимости от вида выполняемого анализа на панели инструментов выбираются необходимые приборы и подключаются к схеме.

На рисунке П.1 показано рабочее окно программы *Electronics Workbench* со схемой дифференциатора на операционном усилителе. К входу схемы подключен функциональный генератор (**Function Generator**), к выходу осциллограф (**Oscilloscope**) и построитель АЧХ и ФЧХ (**Bode Plotter**).

П.3. Анализ работы исследуемого устройства

После построения схемы исследуемого электронного устройства в программе *Electronics Workbench* можно приступить к его анализу. Для начала процесса моделирования необходимо выбрать в меню команду **Analysis > Activate** (Ctrl+G) или перевести в положение "I" выключатель питания, находящийся в правом верхнем углу панели инструментов (см. рисунок П.1). При выборе команды **Analysis > Stop** (Ctrl+T) или переводе выключателя питания в положение "O" процесс моделирования прекращается, а на приборах отображаются значения (на момент остановки) измеряемых переменных. Приостановить процесс моделирования можно с помощью кнопки **Pause** (F9). При повторном нажатии на кнопку процесс моделирования продолжается.

Основными инструментами анализа электронных устройств являются функциональный генератор и осциллограф. Во многих случаях данных устройств достаточно для решения поставленной задачи.

Используемый в *Electronics Workbench* функциональный генератор позволяет формировать три вида сигналов: синусоидальный, пилообразный и прямоугольный. Двойным щелчком мыши на его пиктограмме открывается панель генератора (рисунок П.2). Выбор формы сигнала осуществляется кнопками в верхней части панели. С помощью кнопок также задаются значения частоты и амплитуды сигнала. Сигналы, снимаемые с выходов «+» и «-», относительно общего вывода **Common** изменяются в противофазе. Перед изменением каких-либо параметров следует отключать источники питания схемы, иначе возможно получение неверных результатов.

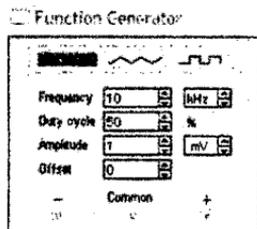


Рисунок П.2 - Панель функционального генератора

Работа с виртуальным осциллографом в целом аналогична работе с реальным осциллографом. Панель осциллографа (рисунок П.3) раскрывается двойным щелчком на его пиктограмме. Осциллограф имеет два канала (**Channel A** и **B**) с раздельной регулировкой чувствительности от 10 мкВ/дел до 5 кВ/дел и регулировкой смещения по вертикали (**Y position**). Режим по входу выбирается кнопками **AC** (наблюдается только переменный сигнал) и **DC** (наблюдается переменная и постоянная составляющие сигнала). С правой стороны от кнопок **DC** расположены входные зажимы. Обычный режим развертки (по вертикали – напряжение сигнала, по горизонтали – время) выбирается кнопкой **Y/T**. В режиме **V/A** по вертикали откладывается напряжение канала **B**, по горизонтали –

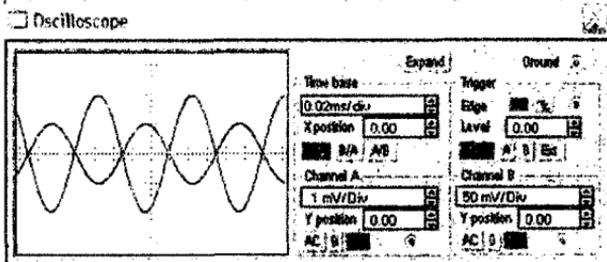


Рисунок П.3 - Вид панели осциллографа

канала **A**. В режиме **Y/T** длительность развертки (**Time base**) может быть задана в пределах от 0,1 нс/дел до 1 с/дел. Развертка может иметь ждущий режим (**Trigger**) с запуском (**Edge**) по переднему или заднему фронту запускающего сигнала при регулируемом уровне (**Level**) запуска. Режимы запуска развертки выбираются либо **Auto** (от канала **A** или **B**), от канала **A**, от канала **B** или от внешнего источника (**Ext**).

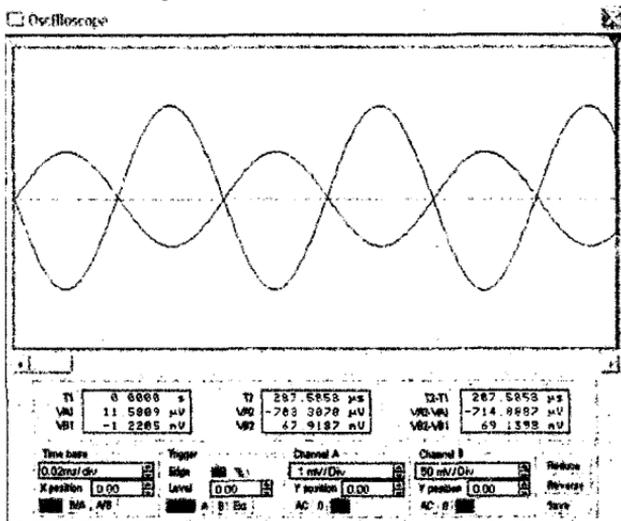


Рисунок П.4 - Расширенная панель осциллографа

Подключение осциллографа к общему проводу осуществляется с помощью клеммы **Ground** в правом верхнем углу прибора.

При нажатии на кнопку **Expand** экран осциллографа увеличивается (рис. П.4). Появляются две визирные линии (слева и справа), с помощью которых можно измерять напряжение, временные интервалы и их приращения. Возврат к исходному состоянию осциллографа осуществляется нажатием на кнопку **Reduce**. Результаты измерения можно записать в текстовый файл. Для этого необходимо нажать кнопку **Save** и в диалоговом окне указать имя файла (по умолчанию предлагается имя схемного файла). В полученном таким образом текстовом файле (с расширением ***.scp**) осциллограммы представляются в виде таблицы. По этим данным затем можно построить соответствующие графики, например, в программе **Excel**.

По этим данным затем можно построить соответствующие графики, например, в программе **Excel**.

Представленный на рисунке П.5 построитель АЧХ и ФЧХ предназначен для построения амплитудно-частотных (при нажатой кнопке **Magnitude**) и фазо-частотных (при нажатой кнопке **Phase**) характеристик. С помощью кнопок **Log** и **Lin** задаётся соответственно логарифмический или линейный масштаб по вертикальной (**Vertical**) и горизонтальной (**Horizontal**) осям.

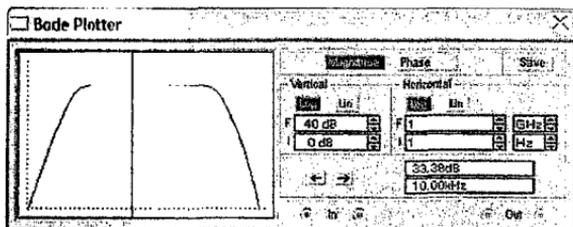


Рисунок П.5 - Панель построителя АЧХ и ФЧХ

Настройка построителя заключается в выборе пределов измерения коэффициента передачи и изменения частоты с помощью кнопок в окошках **F** — максимальное и **I** — минимальное значения. Результаты измерения можно записать в текстовый файл. Для этого необходимо нажать кнопку **Save** и в диалоговом окне указать имя файла. В полученном таким образом текстовом файле (с расширением ***.bod**) АЧХ и ФЧХ представляются в табличном виде.

Подключение прибора к исследуемой схеме осуществляется с помощью зажимов **In** (вход) и **Out** (выход). Левые клеммы зажимов подключаются соответственно к входу и выходу исследуемого устройства, а правые — к общему проводу. К входу устройства необходимо подключить функциональный генератор или другой источник переменного напряжения, при этом каких-либо настроек в этих устройствах не требуется.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Общие требования к выполнению работ и оформлению отчёта | 3 |
| Лабораторная работа №1 | 4 |
| Исследование полупроводниковых диодов и стабилитронов | 4 |
| Лабораторная работа №2 | 7 |
| Исследование биполярного и полевого транзисторов | 7 |
| Лабораторная работа №3 | 17 |
| Исследование нестабилизированных источников напряжения | 17 |
| Лабораторная работа №4 | 26 |
| Исследование стабилизаторов напряжения | 26 |
| Лабораторная работа №5 | 32 |
| Исследование схем на операционных усилителях | 32 |
| Лабораторная работа №6 | 38 |
| Исследование логических схем и функций | 38 |
| Литература | 46 |
| Приложение | 46 |
| Краткая инструкция по работе с программой <i>Electronics Workbench</i> | 46 |

Учебное издание

Составители:

Смаль Александр Сергеевич

Тромза Тамара Васильевна

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам

по дисциплине «Электроника и электротехника»

для студентов специальностей

1 – 37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей»

1 – 37 01 07 – «Автосервис»

Ответственный за выпуск: Тромза Т.В.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.

Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано в печать 27.03.2018 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Arial Narrow». Усл. печ. л. 3,02. Уч. изд. л. 3,25. Заказ №1201. Тираж 21 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.