

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Микро- и нанотехника»

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-41 01 01
«Технология материалов и компонентов электронной техники»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области информатики и радиоэлектроники*

Минск
БНТУ
2020

УДК 621.382 (076.5)
ББК 32.185я7
Т26

Составитель
В. А. Сычик

Рецензенты:
д-р техн. наук, профессор кафедры ЭЭТ БГУИР *В. Л. Ланин*;
зав. каф., д-р физ.-мат. наук, профессор *В. Е. Борисенко*

Т26 **Твердотельная** электроника: лабораторный практикум для студентов специальности 1-41 01 01 «Технология материалов и компонентов электронной техники» / сост. В. А. Сычик. – Минск : БНТУ, 2020. – 154 с.
ISBN 978-985-550-832-9.

Лабораторный практикум содержит 3 раздела: «Твердотельные электронные приборы», «Твердотельные электронные приборы в аналоговых и импульсных устройствах» и «Устройства контроля параметров твердотельных электронных приборов». Практикум будет использован для проведения лабораторных работ у студентов специальности 1-41 01 01 «Технология материалов и компонентов электронной техники».

УДК 621.382 (076.5)
ББК 32.185я7

ISBN 978-985-550-832-9

© Белорусский национальный
технический университет, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ по курсу «Твердотельная электроника» посвящено изучению характеристик и параметров полупроводниковых приборов, принципов работы, основных характеристик и параметров аналоговых, импульсных и цифровых устройств, изучению основных методов и средств измерений параметров электрических сигналов.

Цель, которую преследует каждая из выполненных работ, заключается не только в ознакомлении с принципом действия полупроводникового прибора или электронного устройства, режимами их работы, методикой измерений основных параметров, но и в изучении связей между параметрами и структурой прибора, электрическими характеристиками и режимом работы электронных устройств.

Методическое пособие позволит улучшить подготовку студентов по указанному курсу в прикладном аспекте.

Общие вопросы выполнения лабораторных работ

Для эффективного использования рабочего времени выполнению лабораторной работы должна предшествовать подготовительная работа дома. Во время этой подготовки студент обязан:

- изучить соответствующие разделы теоретического курса, чтобы иметь четкое представление об исследуемых процессах;
- изучить методические указания к лабораторной работе и правила техники безопасности;
- изучить схему лабораторной установки, органы управления и ее устройство, порядок работы на установке;
- изучить описание контрольно-измерительной аппаратуры, используемой в работе, и правила пользования ею;
- четко уяснить лабораторное задание и порядок его выполнения, продумать методику выполнения работы;
- выполнить расчеты, предусмотренные заданием, а также подготовить необходимые таблицы и координатные сетки.

Предварительная работа включает в себя также оформление отчета по предыдущей работе и подготовку к ее защите. Отчет составляется каждым студентом индивидуально и должен отражать

пункты, указанные в содержании отчета. Отчет должен быть датирован и подписан исполнителем.

Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ

Не приступать к выполнению работы, не ознакомившись со следующими правилами техники безопасности:

1. Не включать лабораторную установку (дисплей) без разрешения руководителя.

2. Перед включением установки необходимо убедиться в наличии заземления на клеммах заземления.

3. После включения установки не прикасаться к незаземленным и незаземленным элементам схемы, которые находятся или могут находиться под напряжением.

4. Не прикасаться к корпусам двух различных установок или приборов одновременно.

5. В случае неисправности лабораторного стенда или приборов, отсутствия напряжения в сети необходимо сообщить об этом руководителю.

6. После окончания работы, по разрешению руководителя, выключить лабораторный стенд (установку), измерительные приборы, установить ручки регулирующих органов в исходное положение, привести в порядок рабочее место.

1. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ ПО РАДИО- И ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Цель работы: изучение назначения, принципов действия, правил эксплуатации электронных осциллографов, измерительных генераторов, цифровых и аналоговых вольтметров, комбинированных приборов. Освоение методики работы с этими приборами.

Краткие теоретические сведения

Приборы для измерения напряжений и токов. Наиболее распространенными измерениями в радиоэлектронике являются измерения тока и напряжения. Простейшим прибором для измерений тока является элекромеханический амперметр, в котором измеряемая величина непосредственно преобразуется в соответствующее отклонение стрелки. Если последовательно с амперметром соединить резистор, имеющий большое сопротивление, то такой прибор можно использовать для измерения напряжения постоянного тока. Приборы, показания которых пропорциональны напряжению, называются вольтметрами. Полное отклонение стрелки вольтметра соответствует максимальной величине напряжения, которое может быть измерено прибором.

В соответствии со стандартом на шкале каждого электроизмерительного прибора обозначены единицы измерения величины, класса точности прибора, условное обозначение рода измеряемого тока и другие сведения. Наиболее важным требованием, предъявляемым к приборам, измеряющим ток и напряжение, является требование, чтобы их подключение не вызывало существенных изменений режима цепи.

Для проведения измерений напряжения в радиоэлектронных приборах применяются электронные вольтметры. Они имеют большое входное сопротивление, обладают высокой чувствительностью. С их помощью измеряются напряжения низкой и высокой частоты,

а также напряжения постоянного тока малой величины. Электронные вольтметры обладают рядом положительных свойств:

- измеряют напряжения в широком диапазоне частот (вплоть до 1 ГГц);
- имеют высокую чувствительность и большой диапазон намерений;
- способны выдерживать большие перегрузки.

Электронные вольтметры по виду отсчетного устройства подразделяются на аналоговые (стрелочные) и цифровые.

По назначению они подразделяются на следующие группы:

- постоянного тока (В2);
- переменного тона (В3);
- импульсного тока (В4);
- фазочувствительные (В5);
- селективные (В6);
- универсальные (В7),

Шкалы вольтметров переменного тока (В3), как правило, градуируются в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения.

Универсальные вольтметры позволяют измерять постоянное и переменное напряжение, величину постоянного и переменного тока, сопротивление постоянному току.

В последние годы все большее распространение получают самые разнообразные комбинированные цифровые приборы (мультиметры), созданные на базе микроэлектроники. Примерами таких приборов являются цифровые комбинированные приборы ВР–II, 43302, 4323А.

Электронный осциллограф. Электронный осциллограф является основным и широко распространенным прибором для наблюдения электрических сигналов и измерения их параметров. Осциллограф позволяет «видеть» исследуемый сигнал в виде функции времени. Упрощенная структурная схема осциллографа приведена на рис. 1.1. Она содержит электронно-лучевую трубку (ЭЛТ), канал вертикального отклонения, канал горизонтального отклонения, калибратор.

Принцип получения изображения исследуемого напряжения на экране осциллографа заключается в следующем. Исследуемое напряжение, которое является функцией времени, отображается в прямоугольных координатах X , Y графиком $U = f(t)$.

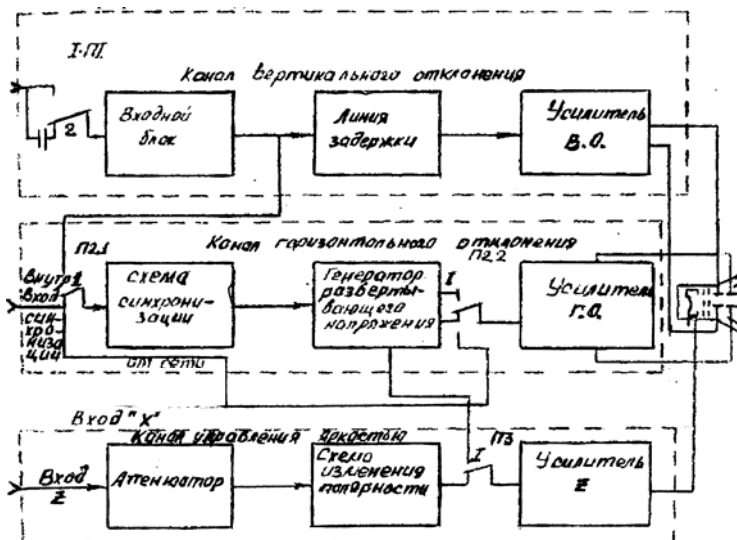


Рис. 1.1. Упрощенная структурная схема осциллографа

Две пары пластин ЭЛТ, расположенные по отношению друг к другу под углом 90° , отклоняют электронный луч в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для наблюдения на экране исследуемого напряжения необходимо отклонять луч по горизонтальной оси пропорционально времени, а по вертикальной – пропорционально величине исследуемого напряжения. С этой целью к горизонтально отклоняющим пластинам подается линейно изменяющееся напряжение, под действием которого электронный луч перемещается по горизонтали с постоянной скоростью слева направо. В исходное положение луч возвращается с гораздо большей скоростью.

Напряжение горизонтальной развертки, имеющее пилообразную форму, создается внутренним генератором развертывающего напряжения.

С помощью измерительных генераторов можно снимать амплитудные, амплитудно-частотные и переходные характеристики четырехполюсников (например, усилителей), определять их коэффициенты передачи, настраивать радиоприемники, телевизоры, радиопередатчики и т. п.

Задающий генератор (рис. 1.2) является основным узлом измерительного генератора. Работой этого устройства определяется ряд

важных параметров выходного сигнала: погрешность установки частоты, стабильность частоты, диапазон рабочих частот, плавная расстройка частоты. Обычно задающий генератор представляет собой автогенератор синусоидальных колебаний.



Рис. 1.2. Структурная схема измерительного генератора

Промежуточное устройство служит для придания сигналу требуемой формы, а также для повышения его энергетического уровня. В генераторах синусоидальных колебаний в промежуточном устройстве ослабляются высшие гармонические составляющие, что позволяет снизить коэффициент нелинейных искажений выходного сигнала. Кроме того, в этих генераторах в промежуточном устройстве производится модуляция колебаний задающего генератора по установленному закону.

Выходное устройство предназначено для установки требуемого уровня выходного сигнала и согласования выхода генератора с нагрузкой.

Модулятор применяется для осуществления одного или нескольких токов модуляции. Они используются преимущественно в генераторах высокой или сверхвысокой частоты. Модулятор представляет собой автогенератор, работающий обычно на фиксированных частотах. В некоторых случаях колебания автогенератора усиливаются для обеспечения заданных модуляционных режимов.

Измерительные устройства обеспечивают измерение параметров исходных колебаний. Обычно измеряются уровень выходного сигнала (напряжение или мощность) и параметры модуляции.

Основной эксплуатационной характеристикой генератора является диапазон перекрываемых им частот $f_{\min}-f_{\max}$.

К основным эксплуатационным характеристикам генератора относится также значение его выходного сопротивления (импеданс).

Классификация измерительных генераторов. По виду входного сигнала различают следующие измерительные генераторы: синусоидальных колебаний, синусоидальных модулированных колебаний, импульсные, сигналов специальной формы, качающейся частоты, шумов.

По диапазону частот генераторы синусоидальных колебаний подразделяют на низкочастотные (20 Гц–200 кГц), высокочастотные (30 кГц–30 МГц), сверхвысокочастотные с коаксиальным выходом (30 МГц–10 ГГц) и сверхвысокочастотные с волноводным выходом (выше 10 ГГц). К низкочастотным генераторам относят и генераторы инфракрасных частот (0,01–100 Гц).

По виду модуляции различают генераторы с амплитудной синусоидальной модуляцией, частотной синусоидальной модуляцией, импульсной модуляцией (амплитудной манипуляцией), частотной манипуляцией, фазовой манипуляцией, несколькими видами манипуляции и комбинированной модуляцией (с одновременным наложением двух или более видов модуляции).

Импульсные измерительные генераторы принято классифицировать по числу каналов, характеру последовательности импульсов и основной погрешности установки значений параметров импульсов.

Основными параметрами импульсных генераторов являются амплитуда, длительность, частота следования (период следования) импульсов и их временной сдвиг.

Основные рекомендации по применению измерительных генераторов

Работа с измерительным генератором включает четыре основных этапа: подготовку к работе, соединение с объектом, согласование с объектом и установку заданных значений параметров выходных сигналов.

Подготовка к работе. Прежде чем включить генератор в сеть, надо проверить работу всех органов управления и откорректировать механически положение стрелок встроенных измерительных приборов, проверить исправность элементов присоединения, наличие штатных кабелей и вспомогательных принадлежностей. Перед вклю-

чением надо убедиться, что условия применения прибора (климатические и другие) соответствуют требованиям инструкции по эксплуатации, генератор не подвергается тряске и вибрациям, воздействию сильных магнитных и электрических полей, а также в том, что он удобно расположен на рабочем месте.

После этого все органы управления приводятся в исходное положение, и генератор может быть включен в сеть. Надо обратить особое внимание на то, чтобы установленный уровень выходного сигнала был минимальным, а неиспользуемые выходы генератора были закрыты заглушками или отключены. Генератор должен быть прогрет в течение времени, указанного в инструкции по эксплуатации.

Соединение с объектом. Для присоединения генератора к объекту надо пользоваться штатными кабелями со стандартными элементами присоединения. Соединять генератор с объектом можно только тогда, когда во входных цепях объекта нет источников постоянного напряжения с малым внутренним сопротивлением. Соединительные кабели предварительно целесообразно проверить для выявления скрытых обрывов.

Согласование с объектом. Для обеспечения лучших условий согласования выхода измерительного генератора со входом объекта по мощности необходимо добиться равенства выходного и входного сопротивлений. В выходных устройствах измерительных генераторов обычно предусматривается возможность ступенчатого изменения выходного сопротивления, что позволяет осуществить согласование с нагрузкой.

Если выходные устройства генератора не позволяют выполнить согласование, необходимо применить внешние согласующие устройства. В тех случаях, когда генератор работает на малую нагрузку (велико входное сопротивление объекта), рекомендуется включить внутреннюю нагрузку, так как такое включение обеспечивает нормальный режим работы выходных устройств генератора.

При подключении измерительного генератора к резонансным цепям следует помнить, что небольшое, как правило, выходное сопротивление генератора может шунтировать контур и значительно снизить его добротность. В таких случаях соединение с объектом должно осуществляться через конденсатор небольшой емкости. Значение емкости выбирается в зависимости от установленной частоты и добротности резонансной системы.

При соединении генератора сверхвысоких частот с объектом рекомендуется между объектом и генератором включать развязывающий аттенюатор с ослаблением в 15–20 дБ. Он позволяет ослабить влияние нагрузки на измерительный генератор и улучшить стабильность частоты и выходного уровня при случайных изменениях параметров нагрузки.

Установка заданных значений параметров выходных сигналов

Установка значений параметров выходных сигналов начинается с установки частоты генератора. При этом следует обязательно пользоваться нониусными устройствами, шкалами «Расстройка» и т. п.

После установки частоты производится контроль или установка уровня выходного сигнала. В этом случае все органы управления должны быть поставлены в положения, указанные в инструкции по эксплуатации. Затем с помощью аттенюаторов и выносных штатных делителей устанавливается заданное напряжение или мощность на выходе.

В генераторах модулированных колебаний при необходимости могут быть установлены соответствующие параметры модуляции.

В процессе работы рекомендуется периодически контролировать уровень колебаний.

Аппаратура, используемая при выполнении работы:

- осциллограф С9-1;
- импульсный генератор Г5-63;
- генератор сигналов высокой частоты Г4-158;
- генератор звуковой частоты ГЗ-109;
- прибор комбинированный цифровой 4323А;
- вольтметр В7-27;
- милливольтметр ВЗ-48А.

Порядок выполнения работы

1. Установите частоту 100 Гц на генераторе звуковых сигналов.
2. Используя внутренний вольтметр и аттенюатор генератора, последовательно устанавливайте напряжение выходного сигнала, равное 100 мВ, 500 мВ, 1 В, 2 В, 5 В. Намеряйте его с помощью имеющихся на рабочем месте вольтметров и комбинированных приборов.

Результаты измерений сведите в таблицу.

Одновременно измеряйте амплитуду сигнала и его частоту с помощью осциллографа. Результаты сведите в таблицу.

3. Устанавливая частоты 1000 Гц, 5000 Гц, 10 кГц, 100 кГц, 200 кГц, повторите измерения по п. 2.

Внимание! Учитывайте при измерениях, что вольтметры и комбинированные приборы, имеющиеся в вашем распоряжении, имеют разный ограниченный частотный диапазон.

4. Установите генератор высокой частоты в режим внутренней модуляции и с помощью встроенных приборов и шкал получите на выходе модулированный сигнал с параметрами: несущая частота – 465 кГц, частота модуляции – 1000 Гц, глубина модуляции $m = 80\%$, напряжение на выходе – 300 мВ, что соответствует 10 дБ на индикаторе трехразрядного цифрового табло.

Подайте этот сигнал на вход осциллографа, получите на экране его огибающую и зарисуйте осциллограмму.

5. Осуществите режим внешней модуляции генератора высокой частоты, используя генератор звуковой частоты, и получите сигнал со следующими параметрами: несущая частота – 1 МГц, частота модуляции – 10кГц, глубина модуляции – 50 %.

Подайте этот сигнал на вход осциллографа, получите его огибающую и зарисуйте осциллограмму.

6. Установите на выходе импульсного генератора амплитуду импульсов 3 В, длительность 10 мкс, частоту следований 10 кГц. Подайте импульсы на вход осциллографа и попытайтесь получить их устойчивое изображение при установке ручки синхронизации в положение «внутр.».

Если это не удастся, используйте режим ждущей развертки. Для этого переключите ручку синхронизации в положение «внешн.», подайте с генератора импульсы синхронизации на вход схемы синхронизации осциллографа и с помощью ручки «стабильность» добейтесь получения неподвижного изображения на экране осциллографа.

Зарисуйте полученную осциллограмму и определите с помощью масштабной сетки на экране осциллографа длительность, амплитуду, период и частоту следования импульсов.

7. Установите на выходе импульсного генератора амплитуду импульсов 1,5 В, длительность 5 мкс, частоту следования 5 кГц и повторите измерения по п. 6.

Контрольные вопросы

1. Типы вольтметров для измерения напряжений постоянного и переменного тока. Градуировка шкал вольтметров.
2. Приборы для измерения постоянного и переменного тока. Основные параметры амперметров.
3. Разновидности электронных осциллографов.
4. Структурная схема электронного осциллографа.
5. Разновидности электронных сигналов и их параметры, определяемые с помощью осциллографа.
6. Какие функции выполняет канал Z и калибратор в электронном осциллографе.
7. Измерительные генераторы: их назначение, классификация.
8. Низкочастотные и высокочастотные измерительные генераторы.
9. Импульсные измерительные генераторы.
10. Методы измерения напряжений, токов, мощности в электрических цепях.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Результаты измерений в виде таблиц.
4. Осциллограммы.
5. Выводы.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ДИОДОВ И СТАБИЛИТРОНОВ

Цель работы: исследование вольт-амперных характеристик стабилитрона и диода.

Краткие теоретические сведения

Выпрямительный диод – это прибор, базовым элементом которого является p - n -переход [2–5]. Структура p - n -перехода изображена на рис. 2.1, *а*, а распределение потенциала по его длине – на рис. 2.1, *б*.

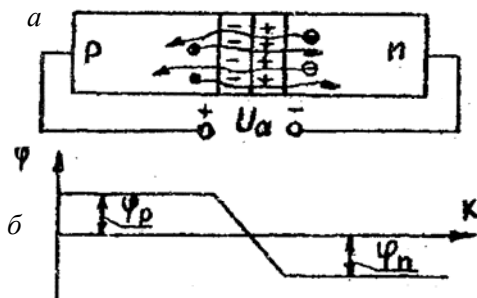


Рис. 2.1. Структура p - n перехода (а) и распределение потенциала по его длине (б)

Между объемными зарядами, образовавшимися в процессе диффузии основных носителей, возникает контактная разность потенциалов $U_{k2} = \varphi_n - \varphi_p$ и электрическое поле напряженностью E_k . В p - n -переходе возникает потенциальный барьер шириной d_0 , препятствующий протеканию диффузионных составляющих тока $I_{n\text{диф}}$, $I_{p\text{диф}}$. Результирующий ток $I_a = I_{\text{диф}} + I_{\text{др}} = 0$, где $I_{\text{др}} = I_{n\text{др}} + I_{p\text{др}}$ образован дрейфом неосновных носителей в области p - n -перехода. При $U_a > 0$ (электрод «+» приложен к p -области) внешний источник компенсирует двойной объемный заряд p - n -перехода, его потенциальный барьер снижается до $U_{k1} = U_{k0} - U_a$ и ток $I_a = I_{\text{диф}}$. Если к p - n -переходу приложено U_a обратной полярности, то контактная разность потенциалов $U_{k2} = U_{k0} + U_a$, обр и диффузионный ток $I_{\text{диф}} = 0$, а $I_a = I_{\text{др}}$.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) p - n -перехода, к которому приложено U_a , имеет вид $I_a = I_s \{ \exp(eU/kT) - 1 \}$, где $I_s = I_{\text{др}}$ – ток насыщения.

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока низкой частоты в постоянный ток. ВАХ выпрямительного диода и его условное обозначение приведены на рис. 2.2, а.

Стабилитрон представляет собой кремниевый полупроводниковый диод, работающий на участке электрического пробоя обратной ветви ВАХ. На этом участке изменения тока незначительно влияют на величину напряжения стабилизации. Основные параметры стабилитрона: минимальный и максимальный рабочие токи $I_{\text{ст. min}}$, $I_{\text{ст. max}}$, дифференциальное сопротивление $U = dI_{\text{ст}}/dU_{\text{ст}}$, $TU_{\text{ст}}$. ВАХ

стабилитрона и его условное графическое обозначение приведены на рис. 2.2, б.

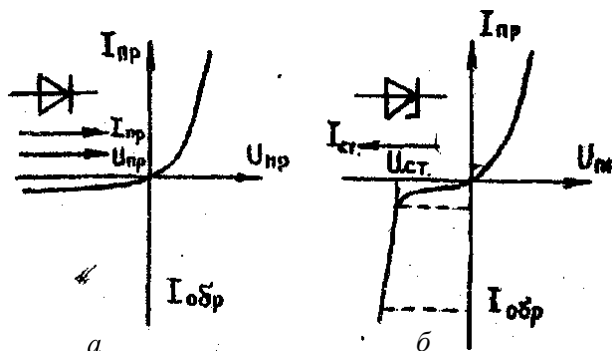


Рис. 2.2. ВАХ выпрямительного диода (а) и стабилитрона (б)

Аппаратура, используемая при выполнении работы. Блок-схема лабораторного макета приведена на рис. 2.3.

Для снятия ВАХ стабилитрона подается напряжение питания 15 В, которое плавно регулируется резисторами «ГРУБО» и «ТОЧНО».

Переключатель S_1 предназначен для включения стабилитрона в прямом или обратном направлении.

Переключатель S_2 предназначен для отключения генератора тока (ГТ) при снятии обратной ВАХ диода.

Переключатель S_3 предназначен для подключения выпрямительного диода или стабилитрона к исследуемой схеме.

Гнезда ГН (генератор напряжения) предназначены для подключения источника питания, используемого при исследовании обратной ВАХ диода.

В работе используются:

- источник питания постоянного тока Б5-48;
- прибор комбинированный цифровой Щ 4300;
- вольтметр В7-27.

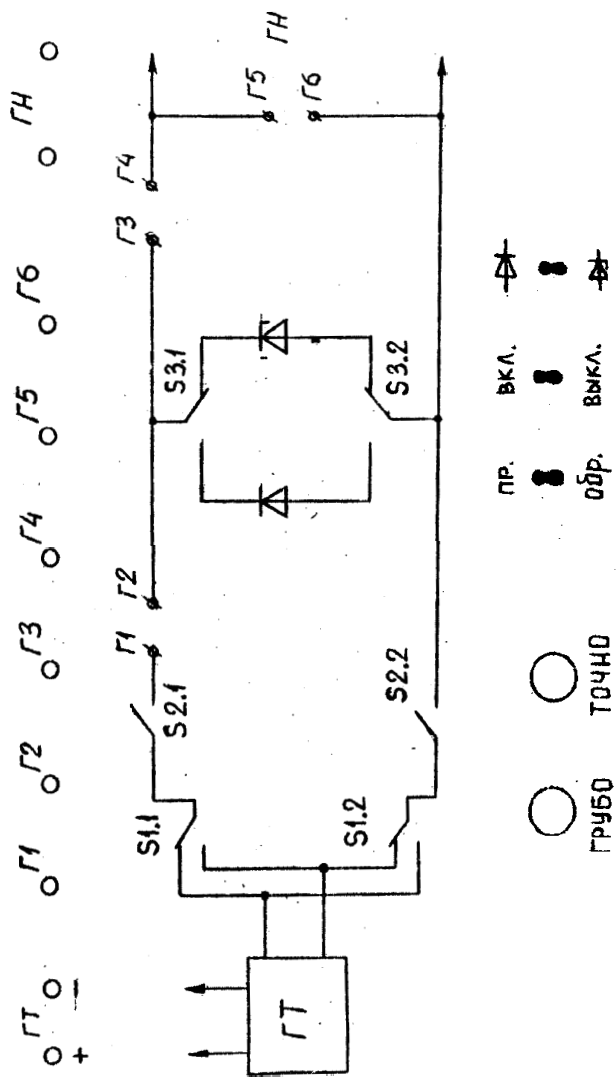


Рис. 2.3. Блок-схема лабораторного макета.

ПР – прямое; ОБР – обратное; ГТ – генератор тока; ГН – генератор напряжения;

ГТИ – генератор текстовых импульсов

Порядок выполнения работы

1. Измерение ВАХ стабилитрона.

Согласно рис. 2.4 собрать схему для измерения прямой ветви ВАХ стабилитрона.

На источнике питания выставить напряжение 15 В и подать его, соблюдая полярность, к гнездам макета «+», «-».

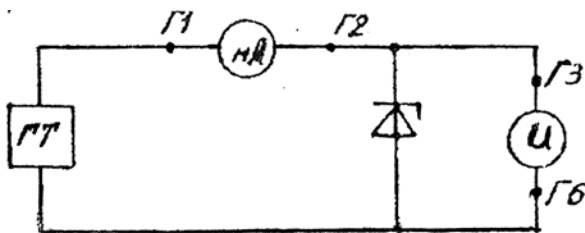


Рис. 2.4. Схема измерения прямой ветви ВАХ стабилитрона:
МА – миллиамперметр; U – вольтметр

Измерить прямую ветвь ВАХ стабилитрона, придерживаясь следующей последовательности:

- установить ток стабилитрона, вращая ручки «ГРУБО» и «ТОЧНО», равный первому значению, которое приведено в табл. 2.1;
- измерить напряжение на стабилитроне с точностью 0,01 В; результат измерения зафиксировать в табл. 2.1;
- повторить указанные измерения согласно табл. 2.1.

Таблица 2.1

I (мА)	0,1	0,5	1	2	4	6	8	10	15	20	25	30
U, В прямое												
U, В обратное												

Измерить обратную ветвь ВАХ стабилитрона, придерживаясь следующей последовательности:

- перевести переключатель S_1 в положение «ОБР»;
- произвести действия согласно пунктам а, б, в;
- результаты свести в табл. 2.1.

По результатам измерений построить график согласно табл. 2.1.

2. Измерение ВАХ выпрямительного диода.

Измерение прямой ветви ВАХ диода проводить аналогично измерению прямой ветви ВАХ стабилитрона. Результаты измерений свести в табл. 2.1.

Измерить обратную ветвь ВАХ диода, для чего собрать схему измерения согласно рис. 2.5.

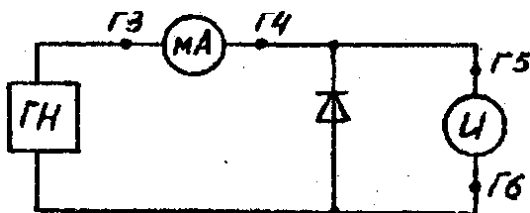


Рис. 2.5. Схема измерения обратной ветви ВАХ стабилитрона

Выставить напряжение на источнике питания, равное 5 В; измерить ток диода, результаты свести в табл. 2.1.

Повторить измерения, меняя напряжение от источника питания от 5 до 50 В с током 5 В.

Контрольные вопросы

1. Проводимость собственных и примесных полупроводников.
2. $p-n$ -переход. Структура, принцип работы $p-n$ -перехода.
3. Зонная диаграмма $p-n$ -перехода. Перенос носителей заряда через $p-n$ -переход.
4. Потенциальный барьер, емкости $p-n$ -перехода.
5. Выпрямительный диод: назначение, принцип работы, эквивалентная схема, область применения.
6. Характеристики и параметры выпрямительного диода.
7. Стабилитрон: принцип работы, эквивалентная схема, область использования прибора.
8. Характеристики и параметры стабилитрона.
9. Туннельный диод: зонная диаграмма диода, принцип работы диода.
10. Эквивалентная схема туннельного диода, ВАХ, параметры туннельного диода.

Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Результаты измерений в форме таблиц. Графики.
5. Выводы.

Лабораторная работа № 3

СНЯТИЕ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Цель работы: исследование характеристик полевого транзистора с управляющим переходом и каналом p -типа.

Краткие теоретические сведения

Работа униполярных транзисторов основана на использовании только одного типа носителей – основных (или электронов, или дырок) [2–7]. Процессы инжекции и диффузии в таких транзисторах практически отсутствуют. Основным способом движения носителей является дрейф в электрическом поле.

Униполярные транзисторы обычно называют полевыми транзисторами. Проводящий слой, по которому проходит рабочий ток, называют каналом. Отсюда еще одно их название – каналные транзисторы.

Транзисторы с приповерхностным каналом имеют классическую структуру металл–диэлектрик–полупроводник (МДП). Их называют МДП-транзисторами. В частном случае, если диэлектриком является окисел (двуокись кремния SiO_2), используется название МОП-транзисторы.

МДП-транзисторы. Реальная структура МДП-транзистора с n -каналом, выполненного на основе полупроводника p -типа, показана на рис. 3.1. Металлический электрод, создающий эффект поля, называют затвором Z . Два других электрода называют истоком I и стоком C . Эти электроды, в принципе, обратимы. Стоком является тот из них, на который (при соответствующей полярности напряжения) поступают рабочие носители канала. Если канал n -типа, то рабочие

носители – электроны и полярность стока положительная. Исток обычно соединяют с основной пластиной полупроводника, которую называют подложкой P .

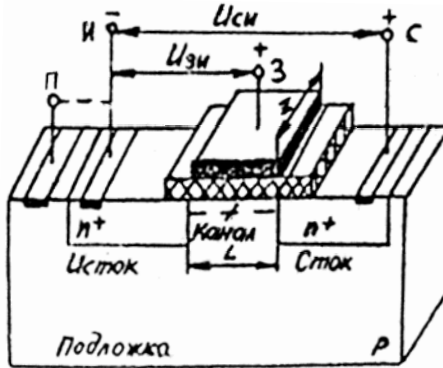


Рис. 3.1. Структура МДП-транзистора с индуцированным n -каналом

Одним из основных параметров МДП-транзисторов является пороговое напряжение U_0 , которое можно разделить на две составляющие:

$$U_0 = U_{0F} + U_{0B}. \quad (3.1)$$

Составляющая U_{0F} – это напряжение спрямления зон. Составляющая U_{0B} – это напряжение изгиба зон.

Напряжение U_{0F} выражается следующим образом:

$$U_{0F} = \varphi_{ms} + Q_{os} / C_0 \quad (3.2)$$

где Q_{os} – равновесный удельный заряд поверхности, включающий в себя заряд поверхностных состояний и заряд, обусловленный ионами примесей в диэлектрике;

φ_{ms} – контактная разность потенциалов между металлом и диэлектриком;

C_0 – удельная емкость структуры затвор-канал.

Величина Q_{os} получается экспериментально и составляет обычно $5 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-8}$ Кл/см².

Напряжение U_{0B} выражается следующим образом:

$$U_{0B} = \varphi_{ms} + a / C_0, \quad (3.3)$$

где $a = (2e\epsilon_0\epsilon_n N)^{1/2}$;

N – концентрация примеси.

Рассмотрим влияние тока на структуру канала. Если напряжение $U_{cn} = 0$, то поверхность полупроводника эквипотенциальная, поле в диэлектрике однородное и толщина образовавшегося канала одинакова на всем протяжении (см. рис. 3.1). Если же $U_{cn} > 0$, то протекает ток и потенциал поверхностью возрастает от истока к стоку. Значит, разность потенциалов между затвором и поверхностью в направлении стока уменьшается.

Униполярные транзисторы определяются выходной $I_c = f(U_{cn}) / U_{зи} = \text{const}$ и переходной (сток-затворной) $I_c = f(U_{зи}) / U_{си} = \text{const}$ характеристиками.

Семейство выходных характеристик представлено на рис. 3.2, *a*. На практике пользуются аппроксимациями ВАХ, из которых наиболее простой и распространенной является следующая:

$$I_c = b [(U_{зи} - U_{си}) C - 1/2 U_{си}^2]. \quad (3.4)$$

где b – удельная крутизна МДП-транзистора (один из его основных параметров), определяемая по формуле

$$b = \mu C_0, \quad (3.5)$$

где μ – приповерхностная подвижность носителей (она обычно в 2–3 раза меньше объемной);

Z – ширина канала (см. рис. 3.1).

При значениях $\mu = 550 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $Z/l = 10$ и $C_0 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$ получаем типичное значение $8 \sim 0,1 \text{ мА/В}^2$.

Выражение (3.4) действительно только при условии $U_{си} < U_{сн}$, где $U_{си}$ – напряжение насыщения, то есть напряжение на начальных (крутых) участках ВАХ (см. рис. 3.2, *a*).

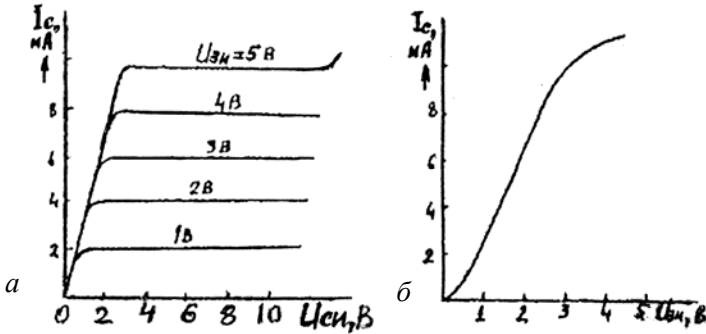


Рис. 3.2. Статические характеристики МДП-транзистора:
a – выходные; *б* – передаточные

Если же $U_{си} > U_{сн}$, то ток не меняется и остается равным тому значению, которое он имеет при $U_{си} = U_{сн}$. Для пологих участков ВАХ

$$I_c = \frac{1}{2} b(U_{зи} - U_0)^2. \quad (3.6)$$

Обычно номинальным током МДП-транзистора считается ток при напряжении $U_{зи} = 2U_0$, то есть

$$I_{c \text{ ном}} = 1/2 b U_0^2. \quad (3.7)$$

Семейство выходных характеристик, приближенно описываемых выражением (3.4), изображено на рис. 3.2.

Малосигнальные параметры

В усилительной технике используются пологие участки ВАХ области насыщения. Этой области свойственны наименьшие нелинейные искажения сигналов и оптимальные значения малосигнальных параметров, существенных для усиления.

Малосигнальными параметрами МДП-транзистора являются:

– крутизна

$$S = dI_c / dU_{зи} / U_{си} = \text{const};$$

– внутреннее сопротивление

$$r_c = dU_{си} / dI_c / U_{зи} = \text{const};$$

– коэффициент усиления

$$K_u = dU_{cu} / dU_{зи} / I_c = \text{const.}$$

Эти три параметра связаны соотношением

$$K_u = SZ_c. \quad (3.8)$$

Крутизна в области насыщения легко определяется из выражения

$$S = b (U_{зи} - U_0), \quad (3.9)$$

где b – удельная крутизна.

Связь крутизны с рабочим током:

$$S = (2bI_c)^{1/2}. \quad (3.10)$$

Например, при $b = 0,1$ мА/В² и $I_c = 1$ мА получаем $S = 0,45$ мА/В.

Внутреннее сопротивление на пологом участке ВАХ обусловлено зависимостью длины канала от стокового напряжения. Внутреннее сопротивление МДП-транзистора имеет ту же структуру, что и коллекторное сопротивление r_c :

$$r_c = (L) \sqrt{\frac{2eN}{\epsilon_0 \epsilon_n}} \sqrt{\frac{U_c}{I_c}}. \quad (3.11)$$

Примем следующие значения концентрации, напряжения и тока: $N = 10^{16}$ см⁻³, $U_c = 4$ В, $I_c = 1$ мА. Тогда при $L = 10$ мкм получаем $r_c = 100$ кОм – значение на порядок меньше, чем r_k .

Аппаратура, используемая при выполнении работы. Блок-схема передней панели макета приведена на рис. 3.3.

Генератор напряжения (ГШ) предназначен для подачи напряжения смещения на затвор относительно истока. Выходное напряжение генератора регулируется плавным вращением ручки ГШ, выведенной на переднюю панель шкета.

Генератор напряжения (ГН2) предназначен для подачи напряжения на сток.

Гнезда Г1 и Г2 служат для подключения миллиамперметра, предназначенного для регистрации тока стока (I_c).

Гнезда Г3 и Г4 служат для подключения вольтметра, предназначенного для регистрации напряжений $U_{зи}$ и $U_{си}$.

Двухполярное питание «-Е» и «+Е» в макете реализуется за счет преобразования однополярного напряжения 30 В от источника питания.

В работе используются: источник питания постоянного тока Б5-47; вольтметр В7-27; прибор комбинированный цифровой Ц4300.

Порядок выполнения работы

1. Измерение сток-затворных характеристик полевого транзистора.

1.1. Подключить измерительные приборы к гнездам согласно схеме на лицевой панели макета.

1.2. Соблюдая полярность, подключить источник питания.

1.3. Выставить $U_{си} = 2$ В.

1.4. Снять сток-затворную характеристику полевого транзистора $U_{зи}$ при $U_{си} = 2$ В, для чего:

а) выставить с помощью ГН1 напряжение $U_{зи} = 0$ В;

б) зафиксировать в таблице значение 1 с;

в) повторить пункты а и б, меняя с помощью ГН1 $U_{зи}$ с шагом 0,05 В до значения, при котором $I_c = 0$. Результаты зафиксировать в таблице;

г) построить полученные зависимости.

2. Измерить стоковые характеристики полевого транзистора.

2.1. Генератором ГН1 установить напряжение $U_{зи} = 0$ В.

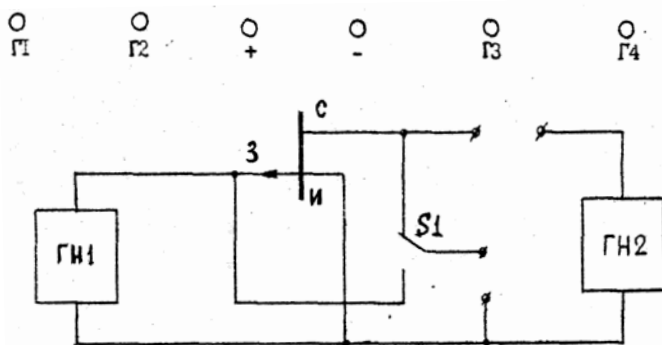


Рис. 3.3. Блок-схема передней панели лабораторного макета:
ЗИ – затвор-исток; СИ – сток-исток; ГН1 – генератор напряжения 1;
ГН2 – генератор напряжения 2; S1 – переключатель

2.2. Генератором ГН2 установить $U_{\text{си}} = 0\text{В}$.

2.3. Измерить зависимость $U_{\text{си}} = f(I_{\text{с}})$. Результаты зафиксировать в таблице.

2.4. Повторить пункты 2.2 и 2.3, меняя $U_{\text{си}}$ с шагом 0,1 В до полного поворота ручки ГН2. В области насыщения шаг измерений можно увеличить. Построить полученные зависимости.

2.5. Повторить пункты 2.2–2.4 при значениях $U_{\text{зи}}$, меняющихся с шагом 0,2 В от 0 до напряжения отсечки. Построить полученные зависимости.

Контрольные вопросы

1. Контакт металл–полупроводник: зонная диаграмма контакта, потенциальный барьер, емкость контакта.

2. Перенос носителей заряда на контакте металл–полупроводник, ВАХ контакта металл–полупроводник.

3. Зонная диаграмма структуры металл–диэлектрик–полупроводник, режимы функционирования структуры.

4. Униполярный транзистор с p - n -переходом. Эквивалентная схема транзистора, принцип работы прибора.

5. Характеристики и параметры униполярного транзистора с p - n -переходом.

6. МДП-транзистор со встроенным каналом. Принцип работы, эквивалентная схема транзистора.

7. Характеристики и параметры МДП-транзистора со встроенным каналом.

8. МДП-транзистор с индуцированным каналом, принцип работы транзистора.

9. Эквивалентная схема МДП-транзистора с индуцированным каналом. Емкости транзистора.

10. Характеристики и параметры МДП-транзистора с индуцированным каналом.

Содержание отчета

1. Наименование работы.

2. Цель работы.

3. Исследуемые схемы.

4. Результаты измерений и расчетов. Графики.

5. Выводы.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА, ВКЛЮЧЕННОГО ПО СХЕМАМ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ И ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Цель работы: исследование входных и выходных характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой (ОБ) или общим эмиттером (ОЭ).

Краткие теоретические сведения

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор с одним либо двумя $p-n$ -переходами, обеспечивающий усиление параметров электрических сигналов [2–5]. Его структура и схемное обозначение представлены на рис. 4.1, *а*, *б*.

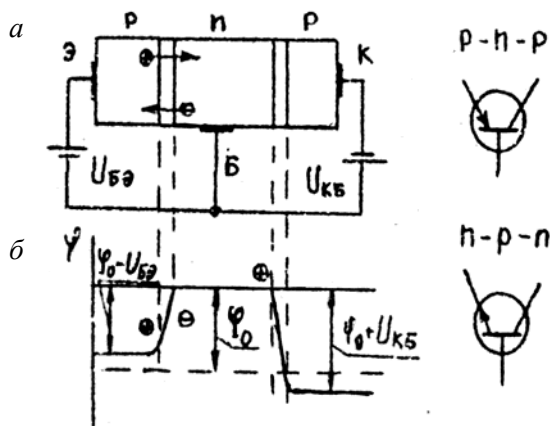


Рис. 4.1. Структура биполярного транзистора (*а*), его схемное обозначение (*б*) и распределение внутренней разности потенциалов при $U_{К,Б,Э} \neq 0$ (*в*)

В отсутствие внешних напряжений на границах раздела трех слоев образуются объемные заряды.

Внешние напряжения $U_{БЭ}$, $U_{КБ}$ подключают к транзистору так, чтобы обеспечивалось смещение эмиттерного перехода в прямом направлении, коллекторного перехода Π_2 – в обратном направлении.

Ток эмиттерного перехода в цепи эмиттера $I_3 = I_{3p} + I_{3n}$. Функция эмиттерного перехода и процессы в нем сводятся к инжекции носителя заряда в базу. Важнейший показатель эмиттера – коэффициент инжекции $\gamma = I_{3p} / I_3$. Для его повышения необходимо, чтобы $P_p \gg N_n$ [6].

Процессы в базовом слое определяются поведением дырок, перешедших в базу через эмиттерный переход. Концентрация дырок в базе на границе с переходом $P_n(0) = P_{n0}U_{бэ} / \varphi_T$, где P_0 – равновесная концентрация в базе, $\varphi_T = kT/e$. Наличие электронов и дырок в базе приводит к тому, что в процессе диффузии дырок к коллекторному переходу Π_2 некоторая часть базы рекомбинирует с электронами. Разность между дырочными составляющими эмиттерного и коллекторного токов представляет ток базы, обусловленный рекомбинацией дырок: $I_{3p} = I_{kp} + I_{bp}$. Эффективность базы характеризует коэффициент переноса $\delta = I_{kp} / I_{3p}$. Коллекторный ток транзистора I_k , обусловленный дырочной составляющей I_{kp} , связан с током эмиттера I_3 коэффициентом передачи тока $\alpha = I_{kp} / I_3 = \gamma\delta$.

Наличие коллекторного перехода, включенного в обратном направлении, приводит к появлению исполнительной неуправляемой составляющей тока коллектора $I_{кбо}$. Ток коллектора $I_k = I_{kp} + I_{кбо}$, а ток базы $I_б = I_{3n} + I_{bp} - I_{кбо}$. Управляющее свойство биполярного транзистора, характеризующее изменение выходного тока I_k под действием подводимого входного тока (или напряжения $U_{бэ}$), обуславливается изменением дырочной составляющей коллекторного тока I_{kp} за счет изменения дырочной составляющей эмиттерного тока I_{3p} .

Существует три способа включения биполярного транзистора: с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК). При использовании транзисторов в электронных схемах практический интерес представляют статические характеристики, отражающие взаимосвязь между входными и выходными напряжениями и токами, которые определяются экспериментально для каждой из схем включения. Используются следующие виды статических характеристик: входные $I_{вх} = f(U_{вх}) / U_{вых} = \text{const}$; выходные $I_{вых} = f(U_{вых}) / I_{вх} = \text{const}$; характеристики прямой передачи по току $I_{вых} = f(I_{вх}) / U_{вых} = \text{const}$ и характеристики обратной связи по напряжению $U_{вх} = f(U_{вых}) / I_{вх} = \text{const}$.

На семействе выходных характеристик транзистора, включенного по схеме ОЭ (рис. 4.2, а), можно выделить три области: I – начальная

область, II – относительно слабая зависимость I_k от $U_{кэ}$, III – пробой коллекторного перехода.

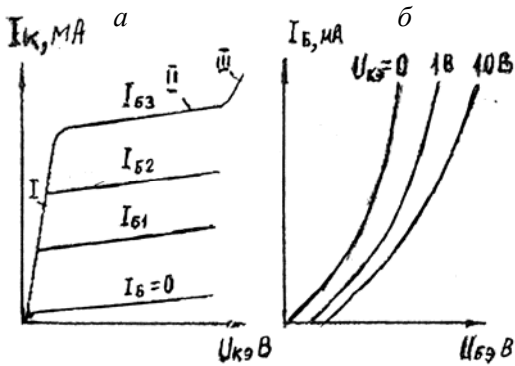


Рис. 4.2. Выходные (а) и входные (б) характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ

Входные (базовые) характеристики транзистора ОЭ (рис. 4.2, б) отражают зависимость тока базы от напряжения база-эмиттер при фиксированном напряжении $U_{кэ}$; $I_б = f(U_{бэ}) / U_{кэ} = \text{const}$. При $U_{кэ} = 0$ входная характеристика соответствует прямой ветви ВАХ двух $p-n$ -переходов (П1 и П2), включенных параллельно.

Аппаратура, используемая при выполнении работы. Блок-схема передней панели макета приведена на рис. 4.3. Переключатели $S1, S2$ предназначены для включения схемы с общей базой (верхнее положение) или схемы, с общим эмиттером (ниже положение).

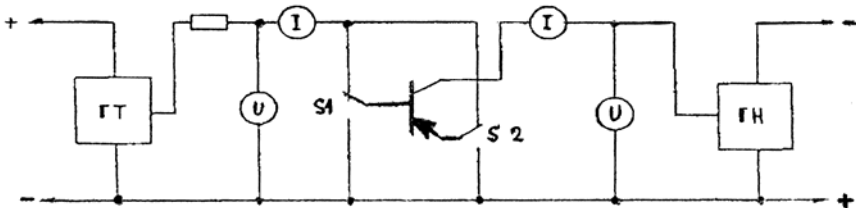


Рис. 4.3. Блок-схема передней панели лабораторного макета:
 $S1, S2$ – переключатели; ГТ – генератор тока; ГН – генератор напряжения;
 $P1, P4$ – регуляторы; pA, pV – гнезда для подключения амперметра и вольтметра

Гнезда «+» и «-» ГТ (генератора тока) предназначены для подачи напряжения + 20 В.

Гнезда «+» и «-» ГН (генератора напряжения) предназначены для подачи напряжения +8 В.

Гнезда «РА» предназначены для подключения миллиамперметра для регистрации тока базы I_b , тока эмиттера I_e или тока коллектора I_k при соответствующем положении переключателей $S1, S2$.

Гнезда «pV» предназначены для подключения вольтметра для регистрации $U_{бэ}$, $U_{кэ}$ или $U_{кб}$ при соответствующем положении переключателей $S1$ и $S2$.

Резисторы $R1$ «Грубо» и $R2$ «Точно» генератора тока (ГТ) предназначены для плавной регулировки тока, подаваемого на вход схемы.

Резисторы $R3$ «Грубо» и $R4$ «Точно» генератора напряжения (ГН) предназначены для плавной регулировки напряжения, подаваемого на коллектор транзистора. В работе используются: источник питания постоянного тока Б5-47; источник питания постоянного тока АГАТ; вольтметр В7-27; прибор комбинированный цифровой Ц 4300.

Порядок выполнения работы

1. Измерение входных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОБ.

1.1. Выставить на источнике питания В5-47 напряжение 20 В, а на источника АГАТ – 8 В.

1.2. Соблюдая полярность, подать выставленные напряжения на макет: 20 В на гнезда ГТ; гнезда ГН закоротить, вставив тем самым $U_{кб} = 0$ В.

1.3. Выставить $R1, R2$ ГТ в крайнее левое положение, а $R3, R4$ ГН – в крайнее правое положение.

1.4. Подключить к гнездам «РА» миллиамперметр, а к гнездам «pV» – вольтметр.

1.5. Вставить $I_e = 0,1$ мА.

1.6. Снять входную характеристику транзистора $U_{бэ} = f(I_e)$ при $U_{кб} = 0$ В. Результаты зафиксировать в таблице.

1.7. Повторить пункты 1.6–1.7, меняя I_e с шагом от 1 мА до 10 мА.

1.8. Выставить $U_{кб} = 8$ В, подав с источника питания АГАТ напряжение 6 В на клеммы ГН.

1.9. Выставить $I_e = 0,1$ мА.

1.10. Снять входную характеристику транзистора $U_{\text{бэ}} = f(I_3)$ при $U_{\text{кб}} = 8 \text{ В}$, меняя I_3 с шагом от 1 мА до 10 мА. Результаты зафиксировать в таблице.

2. Измерение выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОБ.

2.1. Выставить $I_3 = 5 \text{ мА}$.

2.2. Выставить $U_{\text{кб}} = 0 \text{ В}$.

2.3. Снять выходную характеристику транзистора $U_{\text{бэ}} = f(I_{\text{к}})$ при $I_3 = 5 \text{ мА}$, изменяя $U_{\text{кб}}$ от 0 до 8 В с шагом 1 В. Результаты зафиксировать в таблице.

2.4. Выставить $I_3 = 10 \text{ мА}$.

2.5. Выставить $U_{\text{кб}} = 0 \text{ В}$.

2.6. Снять выходную характеристику транзистора при $I_3 = 10 \text{ мА}$, изменяя $U_{\text{кб}}$ от 0 до 8 В с шагом 1 В.

3. Измерение входных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ.

3.1. Переключатели $S1$ и $S2$ перевести в положение ОЭ.

3.2. Выставить $U_{\text{кэ}} = 0 \text{ В}$.

3.3. Выставить $I_6 = 0 \text{ мА}$.

3.4. Снять входную характеристику $U_{\text{бэ}} = f(I_6)$ при $U_{\text{кэ}} = 0$, изменяя I_6 от 0 до 600 мкА.

3.5. Выставить $U_{\text{кэ}} = 8 \text{ В}$.

3.6. Выставить $I_6 = 0 \text{ мА}$.

3.7. Снять входную характеристику $U_{\text{бэ}} = f(I_6)$ при $U_{\text{кэ}} = 8 \text{ В}$, изменяя I_6 от 0 до 600 мкА.

4. Измерение выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ.

4.1. Выставить $I_6 = 100 \text{ мкА}$.

4.2. Снять выходную характеристику $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}})$, изменяя $I_{\text{кэ}}$ от 0 до 8 В с шагом 1 В.

4.3. Выставить $I_6 = 200 \text{ мкА}$.

4.4. Снять выходную характеристику $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}})$, изменяя $I_{\text{кэ}}$ от 0 до 8 В с шагом 1 В.

4.5. Выставить $I_6 = 300 \text{ мкА}$.

4.6. Снять выходную характеристику $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}})$, изменяя $I_{\text{кэ}}$ от 0 до 8 В с шагом 1 В.

Контрольные вопросы

1. Типы и обозначения биполярных транзисторов.
2. Структура и основные процессы в биполярном транзисторе.
3. Зонная диаграмма биполярного транзистора с приложением питающих напряжений и без него.
4. Характеристики и параметры биполярных транзисторов.
5. Схемы включения биполярных транзисторов.
6. Системы параметров биполярных транзисторов.
7. Эквивалентные схемы биполярных транзисторов.
8. Модель Эберса–Молла.
9. Влияние режима работы на параметры транзистора.
10. Влияние температуры на параметры биполярных транзисторов.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Результаты измерений и расчетов. Графики.
5. Выводы.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ И ТИРИСТОРОВ

Цель работы: выяснение механизма образования n - p -перехода; снятие вольт-амперных характеристик выпрямительного диода и тиристора; ознакомление с принципом действия тиристора и снятие его основных характеристик.

Общие сведения

К полупроводниковым относятся материалы, которые при комнатной температуре имеют удельное сопротивление $\rho = 10 \sim 10^8$ Ом·см, зависящее от температуры, освещенности, ионизирующего излучения, электрического поля и др.

Область на границе контакта двух полупроводников с противоположным типом электропроводности называется электронно-дырочным или n - p -переходом. Переход обладает несимметричной проводимостью, т. е. имеет нелинейное сопротивление. Работа большинства полупроводниковых приборов (диодов, тиристоров и др.) основана на использовании свойств n - p -переходов.

Рассмотрим процессы в n - p -переходе при отсутствии внешнего источника напряжения (рис. 5.1). Так как носители заряда совершают беспорядочное тепловое движение, то происходит их диффузия из одного полупроводника в другой. Концентрация электронов в n -слое больше, чем в p -слое, и часть электронов перейдет из n -слоя в p -слой. Одновременно наблюдается диффузионный переход дырок из p -слоя в n -слой. В результате в n -слое остается нескомпенсированный объемный заряд положительных ионов (в основном донорной примеси), а в p -слое – нескомпенсированный объемный заряд отрицательных ионов акцепторной примеси. Между образовавшимися объемными зарядами возникают контактная разность потенциалов $U_k = \varphi_n - \varphi_p$ и электрическое поле напряженностью E_k .

На потенциальной диаграмме n - p -перехода (рис. 5.1, б) за нулевой потенциал принят потенциал граничного слоя. В n - p -переходе возникает потенциальный барьер, препятствующий диффузионному перемещению носителей заряда. Высота барьера равна контактной разности потенциалов и обычно составляет десятые доли вольта. На рис. 5.1, б изображен барьер для дырок, стремящихся за счет диффузии перемещаться из области p и n .

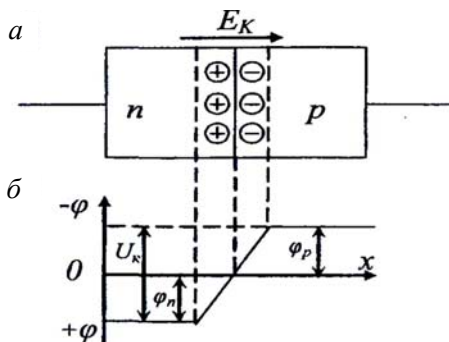


Рис. 5.1. Структура (а), потенциальный барьер (б) p - n -перехода

В n - p -переходе вследствие ухода электронов и дырок вглубь p - и n -областей образуется обедненный зарядами слой, называемый запирающим и обладающий большим сопротивлением в сравнении с сопротивлением остальных объемов n - и p -областей.

Если источник внешнего напряжения положительным полюсом подключить к полупроводнику p -типа и отрицательным к n -типа (прямое включение), то электрическое поле, создаваемое в n - p -переходе прямым напряжением U_k , действует навстречу контактной разности потенциалов U_k . Потенциальный барьер понижается до величины $U_k - U_{\text{пр}}$, электронно-дырочный переход обладает выпрямляющими свойствами, толщина запирающего слоя и его сопротивление $R_{\text{пр}}$ снижаются. Если полярность внешнего источника изменить на обратную, то потенциальный барьер возрастает до величины $U_k + U_{\text{обр}}$. В этом случае через переход могут пройти только неосновные носители: электроны из p - в n -область и дырки во встречном направлении. Так как концентрация основных носителей заряда на несколько порядков выше концентрации неосновных, то прямые токи на несколько порядков больше обратных. Этими свойствами пользуются для создания диодов.

Диодом называют полупроводниковый прибор с одним n - p -переходом и двумя внешними выводами. По назначению диоды делят на выпрямительные, высокочастотные, импульсные, стабилитроны и т. д. Их изготавливают на основе германия или кремния. Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока низкой частоты в постоянный. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) выпрямительного диода, его условное графическое изображение и буквенное обозначение даны на рис. 5.2. Основные параметры выпрямительного диода: предельно допустимый постоянный ток $I_{\text{пр. max}}$ и $U_{\text{пр. max}}$.

Тиристором называют полупроводниковый прибор с тремя или более n - p -переходами и двумя (динистор) или тремя (тринистор) выводами. Он может находиться в одном из двух устойчивых состояний: низкой проводимости (закрыт) или высокой проводимости (открыт). Структура, условное графическое и буквенное обозначения тиристора, его вольт-амперная характеристика даны на рис. 5.3, а, б, в.

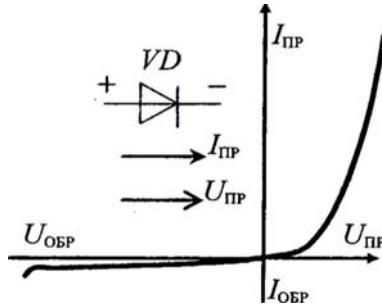


Рис. 5.2. Вольт-амперная характеристика диода

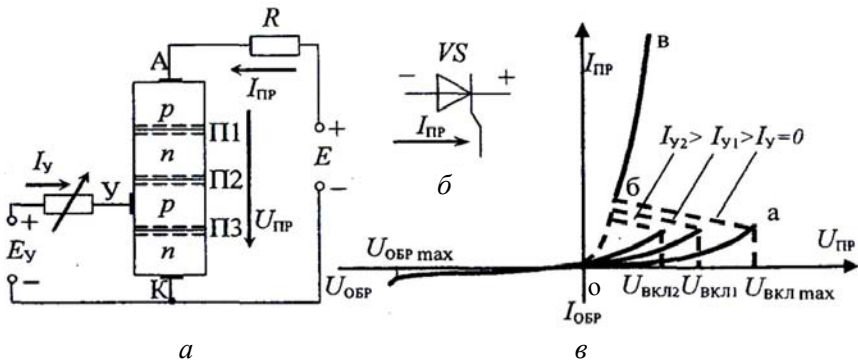


Рис. 5.3. Структура (а), условное обозначение (б) и ВАХ (в) тиристора

Основу прибора составляет кристалл кремния, в котором созданы четыре слоя с разными типами электропроводности. Внешний p -слой называют анодом (А), внешний n -слой – катодом (К), а два внутренних слоя – базами. Одна из баз имеет вывод – управляющий электрод (У). При прямом включении (анод положителен по отношению к катоду) переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении, а переход П2 – в обратном. До тех пор пока П2 закрыт, прямой ток практически равен нулю (участок *оа* характеристики (см. рис. 5.3, в). При некотором значении прямого напряжения, равном $U_{\text{вкл. макс}}$, за счет перераспределения зарядов в области баз переход П2 открывается точка *а*. Сопротивление его быстро уменьшается (участок *аб*), и тиристор работает на участке *бв* характеристики, которая подобна

ВАХ диода. Напряжение включения $U_{\text{вкл. max}}$ можно уменьшить, введением добавочных носителей заряда в любой из слоев, прилегающих к переходу П2. Добавочные носители заряда на рис. 5.3, *a* вводятся в слой *p* от вспомогательной управляющей цепи с независимым источником E_y . При увеличении тока управления I_y , характеристика (см. рис. 5.3, *в*) смещается влево (к естественной прямой ветви ВАХ диода). Тиристор остается во включенном состоянии пока протекающий через него ток больше критического, называемого током удержания $I_{\text{уд}}$. Как только $I_{\text{пр}}$ станет меньше $I_{\text{уд}}$ тиристор закрывается. Следует отметить, что после включения тиристора, объемные заряды в области перехода П2 будут компенсированы основным током, если он больше тока $I_{\text{уд}}$, и тогда ток управления I_y не нужен. Поэтому для снижения потерь в тиристоре он управляется короткими импульсами I_y . При обратном включении тиристора (анод отрицателен по отношению к катоду) закрыты два перехода П1 и П3 и тиристор тока не проводит. Во избежание пробоя необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше $U_{\text{обр. max}}$. Основные параметры, используемые при выборе тиристора: предельно допустимый анодный ток в открытом состоянии тиристора $I_{\text{пр. max}}$, предельно допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр. max}}$, предельно допустимое прямое напряжение в закрытом состоянии тиристора $I_{\text{пр. max}}$ ток: удержания $I_{\text{уд}}$. Маломощные тиристоры применяют в релейных схемах и маломощных коммутирующих устройствах. Мощные тиристоры используют в управляемых выпрямителях, инверторах и различных преобразователях.

Предварительное задание к эксперименту

Изучить устройство и принцип работы выпрямительного диода, тиристора. Письменно дать обоснованный ответ на вопрос соответствующего варианта (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Вариант	Вопросы
1	Можно ли с помощью тока управления закрыть тиристор?
2	Рассчитайте прямое сопротивление выпрямительного диода, если $I_{пр} = 0,05\text{А}$, $U_{пр} = 0,67\text{В}$. Как изменится $R_{пр}$ при увеличении тока диода?
3	Можно ли с помощью тока управления включить тиристор при анодном напряжении, практически равном нулю?
4	Рассчитайте статическое сопротивление динистора, если $U_{ст} = 4\text{В}$, $I_{ст} = 0,05\text{А}$. Как изменится $R_{ст}$ при увеличении тока динистора?
5	Нужно ли поддерживать ток управления после включения тиристора для дальнейшей его работы в открытом состоянии?
6	Рассчитайте сопротивление открытого тиристора, при $U_{пр} = 1\text{В}$, $I_{пр} = 0,19\text{А}$. Как изменится $R_{пр}$ при увеличении тока тиристора?
7	Как следует изменять ток управления тиристора для уменьшения напряжения его включения?
8	Что такое ток удержания тиристора? Закроется ли тиристор при уменьшении прямого тока, если $I_{пр} > I_{уд}$?

Порядок выполнения эксперимента

1. Изучить лабораторный стенд по схеме рис. 5.4. Установить регулятор потенциометра $R2$ в крайнее левое положение, переключателем П2.1, подключить выпрямительный диод.

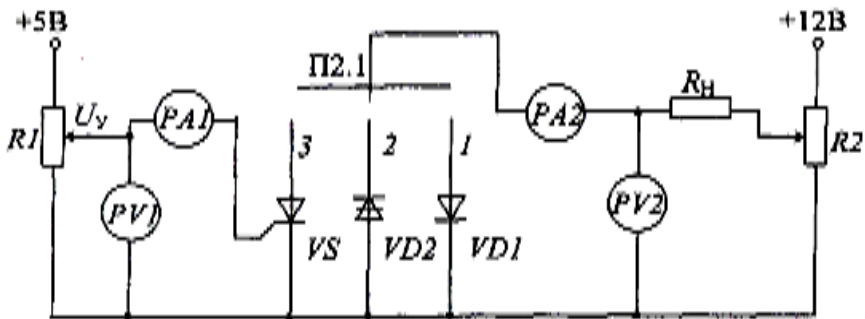


Рис. 5.4. Структурная схема лабораторного стенда

2. Включить цепь под напряжением с помощью шнура питания стенда и, регулируя напряжение потенциометром $R2$, снять ВАХ диода в прямом направлении $I_{пр}(U_{пр})$.

Результаты измерений записать в табл. 5.2.

Таблица 5.2

$I_{пр}$, мА		1	1		
$U_{пр}$, В		1	1		

3. Проверить экспериментом ответ на вопрос предварительного задания (вариант 2).

4. Установить потенциометр $R2$ в исходное положение (п. 1), затем подключить динистор и снять прямую ветвь ВАХ динистора $I_a(U_a)$.

Измерения записать в табл. 5.3.

Таблица 5.3

I_a , мА						
U_a , В						

5. Проверить экспериментом ответ на вопрос предварительного задания (вариант 4).

6. Снять характеристику включения тиристора $U_{вкл}(I_\gamma)$.

Для этого переключателем подключить тиристор, регуляторы $R1, R2$ установить в крайние левые положения. Регулируя анодное напряжение от 0 до 12 В ступенями через 2 В и медленно увеличивая ток управления I_y до момента включения тиристора, зафиксировать и записать в табл. 5.4 значения тока управления. Построить характеристику включения тиристора $U_{\text{вкл}}(I_y)$.

Таблица 5.4

$U_{\text{вкл}}, \text{ В}$	0	2	4	6	8	10	12
$I_y, \text{ мА}$							

7. Снять характеристику прямой передачи тока тиристора $I_{\text{пр}}(I_y)$: потенциометром $R1$ установить ток $I_y = 0$, а потенциометром $R2$ – напряжение $U_{\text{пр}} = 8 \text{ В}$, затем увеличивать ток управления до момента включения тиристора, записать значения $I_y, I_{\text{пр}}$. Увеличивая далее I_y до 10 мА, убедиться в постоянстве анодного тока. Построить график $I_{\text{пр}}(I_y)$.

8. Снять прямую ветвь тиристора $I_{\text{пр}}(U_{\text{пр}})$, установив ток управления, при котором открывается тиристор (см. п. 6). Результаты измерений представить таблицей, подобно табл. 5.2. Построить график ВАХ.

9. Проверить экспериментом ответы на вопросы предварительного задания (варианты 1, 3, 5...8).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Ответ на вопрос предварительного задания.
3. Схема исследований (см. рис. 5.4).
4. Таблицы измерений.
5. ВАХ выпрямительного диода, тиристора.
6. Характеристики включения $U_{\text{вкл}}(I_y)$ прямой передачи $I_{\text{пр}}(I_y)$ тиристора.

7. Сравнение прямых падений напряжений на диоде и тиристоре.
8. Выводы о возможном практическом использовании выпрямительных диодов и тиристорov.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой собственная и примесная электропроводности?
2. Что такое $n-p$ -переход и как объяснить его вентильные свойства?
3. Чем обусловлена контактная разность потенциалов $n-p$ -перехода?
4. Охарактеризуйте состояния $n-p$ -перехода при прямом и обратном включении.
5. Поясните графики ВАХ диода и тиристора. Как влияет температура на ВАХ?
6. Каковы основные параметры диода-, динистора?
7. Поясните устройство и принцип работы тиристора, вид его ВАХ.
8. Каково влияние тока управления на работу тиристора?
9. Что такое динистор, тринистор, однооперационный и двухоперационный?
10. Каковы основные параметры и характеристики тиристора?
11. Приведите примеры использования диодов, тиристорov.

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В РЕЖИМЕ НАСЫЩЕНИЯ

Цель работы: практическое изучение работы биполярного транзистора измерение его параметров, исследование переходных процессов транзистора в импульсном режиме.

Краткие теоретические сведения

Основой всех узлов и схем импульсной и цифровой техники является электронный ключ-каскад на транзисторе, работающем в ключевом режиме [3, 4, 9]. Ключевая схема на транзисторе $p-n-p$ -типа

показана на рис. 6.1. Транзистор $VT1$ выполняет функцию ключа в последовательной цепи с резистором R_K и источником питания.

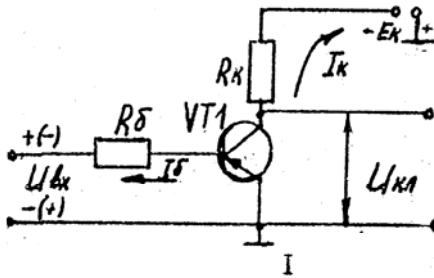


Рис. 6.1. Ключевая схема на транзисторе

Транзистор $VT1$ работает в двух режимах: насыщения и отсечки. Режим отсечки осуществляется подачей $U_{вх} > 0$, под действием которого переход транзистора запирается и ток $I_3 = 0$. В этом режиме $R_K \rightarrow \infty$, $U_{вых} = U_{кл} = E_K$, $I_{кл} = I_K \rightarrow 0$.

Величину запирающего входного напряжения $U_{вх}$ выбирают из расчета, чтобы при протекающем через резистор $R_б$ токе $I_{кб}$ было обеспечено выполнение условия $U_{бэ} = U_{вк.зап} - I_{кб} R_б$, $R_б > 0$.

Режим открытого состояния транзистора достигается изменением полярности входного напряжения ($U_{вх} < 0$) и заданием соответствующего тока базы. До некоторого граничного значения тока базы ($I_{б.гр}$) сохраняется пропорциональная зависимость между I_K и $I_б$ и рабочая точка транзистора находится на границе области насыщения, причем $I_K = E_K / \beta_{ст} \cdot I_б$, где $\beta_{ст}$ – статический коэффициент передачи тока транзистора в схеме ОЭ. Граничное значение тока базы $I_{б.гр} = E_K / (\beta_{ст} \cdot R_K)$. Остаточное напряжение на транзисторе $U_{к.откр} = U_{кэ.нас}$, где $U_{кэ.нас}$ – выходное напряжение транзистора в режиме насыщения.

При дальнейшем увеличении $I_б > I_{б.гр}$ напряжение $U_{кэ} = U_{кэ.нас}$. Режим работы транзистора $VT1$ при $I_б > I_{б.гр}$ называют насыщенным, а отношение $S = I_K / I_{б.гр}$ – коэффициентом насыщения транзистора. В режиме насыщения транзистора ток базы $I_б = S I_K / \beta_{ст}$, где S для надежного насыщения транзистора может составлять 1,5–3. Изменение выходного напряжения ключа на транзисторе $VT1$ при наличии на его входе управляющего импульса показано на рис. 6.2. Длительность фронта нарастания коллекторного тока рассчитывается:

$$\tau_{\Phi} = \tau_{\text{в}} \ln I_{\text{б.отп}} / (I_{\text{б.отп}} - I_{\text{к}} / \beta_{\text{СТ}}) \quad (6.1)$$

где $\tau_{\text{в}}$ – эквивалентная постоянная времени транзистора.

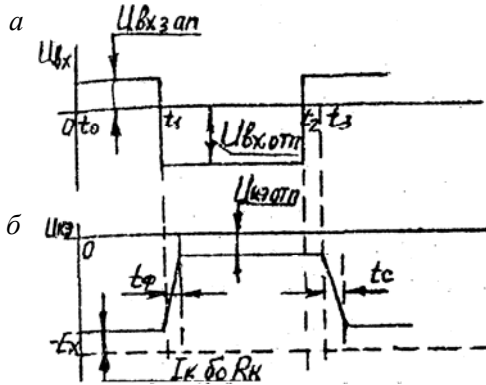


Рис. 6.2. Диаграмма напряжений ключевой схемы

Характер изменения $U_{\text{кэ}}(t)$ при отпирании транзистора (рис. 6.2, б) подчиняется зависимости $U_{\text{кэ}}(t) = E_{\text{к}} + i_{\text{к}}(t)R_{\text{к}}$. В момент времени t_2 действие $U_{\text{вх.отп}}$ заканчивается, к базе $VT1$ прикладывается $U_{\text{вх.зап}}$. Ток коллектора и напряжение $U_{\text{кэ}}$ в интервале $t_2 - t_3 = t_p$ остаются неизменными, а $VT1$ открыт. Создается задержка в запираии транзистора, обусловленная рассасыванием избыточных носителей.

Время рассасывания

$$t_p = \tau_{\text{в}} \ln \frac{I_{\text{б.отп}}}{I_{\text{б.гр}}} = \tau_p \ln S, \quad (6.2)$$

Длительность заднего фронта выходного импульса находится из зависимости:

$$t_{\text{с}} = \tau_{\text{в}} \ln ((I_{\text{б.гр}} + I_{\text{б.обр}}) / I_{\text{б.обр}}), \quad (6.3)$$

где $I_{\text{б.обр}}$ – ток в цепи базы при действии на входе напряжения $U_{\text{вх.зап}}$.

Длительности t_{ϕ} , t_p , t_c характеризуют быстрдействие транзисторного ключа.

В режиме открытого состояния транзистора (ключ замкнут):

$$R_k \rightarrow 0, \quad U_{\text{ккл}} = U_{\text{кз,нас}}, \quad I_{\text{ккл}} = I_{\text{к,ном.}}$$

Аппаратура, используемая при выполнении работы. Схема передней панели макета приведена на рис. 6.3. Подключение измерительных приборов и соединение элементов схемы производится при помощи клемм, расположенных на передней панели макета.

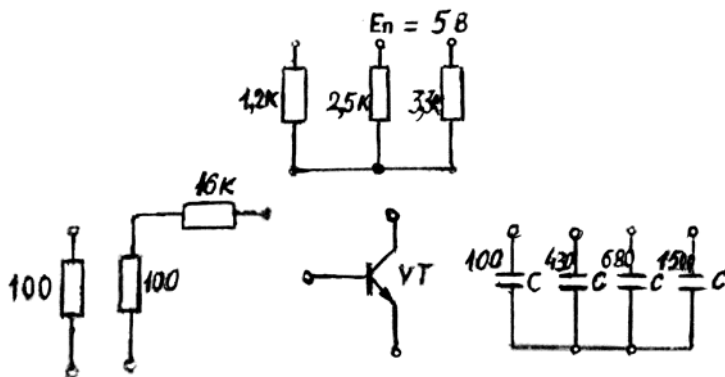


Рис. 6.3. Схема передней панели макета:

E_n – напряжение питания; C – емкость; VT – биполярный транзистор;

В работе используются:

- источник питания постоянного тока АГАТ;
- осциллограф С9-1;
- вольтметр В7-27;
- прибор комбинированный цифровой 4323А;
- импульсный генератор Г5-63.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рис. 6.4. При $R_6 = 16$ кОм для значений $R_k = 1,2$ кОм; 2 кОм; 5,1 кОм снять передаточную характеристику $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$, меняя $U_{\text{вх}}$ от 0 до 5 В с шагом 0,5 В.

Результаты зафиксировать в таблице.

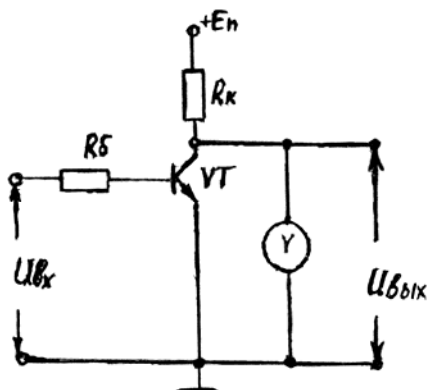


Рис. 6.4. Схема для снятия передаточной характеристики:
 $+E_{п}$ – напряжение питания; $R_{к}$, $R_{б}$ – сопротивления в цепи коллектора и базы;
 VT – биполярный транзистор; V – вольтметр; $U_{вх}$ – входной сигнал;
 $U_{вых}$ – выходной сигнал

2. Используя схему, представленную на рис. 6.5, снять зависимость $U_{бэ} = f(I_{б})$ при $R_{б} = 16 \text{ кОм}$, $R_{к} = 2,0 \text{ кОм}$.

Результаты зафиксировать в таблице.

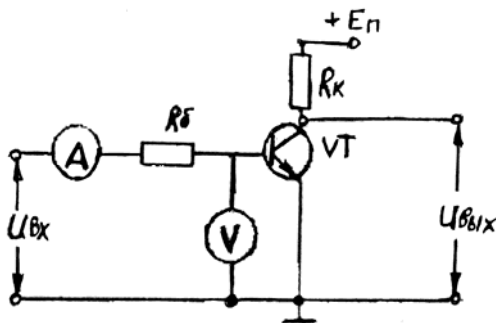


Рис. 6.5. Схема для исследования $U_{бэ} = f(I)$, A – амперметр

3. Собрать схему, представленную на рис. 6.6. Используя импульсный генератор и осциллограф, измерить переходные характеристики ключа при значениях емкостей 100, 430, 680, 1500 пФ. При этом необходимо учитывать, что ток базы $I_{б}$ определяется двумя источниками: импульсами положительной полярности, которые посту-

пают от генератора ($A = 4 \text{ В}$, $F = 30 \text{ кГц}$), и отрицательным напряжением смещения (1 В ; $0,75 \text{ А}$), поступающим от источника питания.

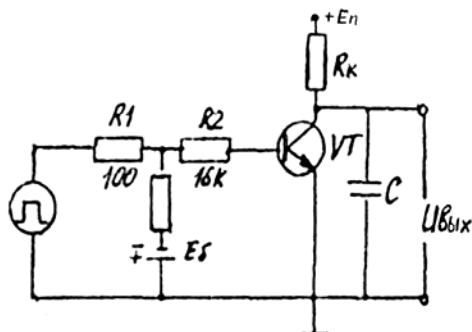


Рис. 6.6. Схема для исследования переходных характеристик ключа

Внимание! Перед началом эксперимента убедитесь, что с генератора импульсов подаются импульсы заданных параметров.

Контрольные вопросы

1. Зонная диаграмма и принцип работы биполярного транзистора.
2. Режимы работы биполярного транзистора.
3. Типы электронных ключей, основные требования к ним.
4. Диодно-резистивный ключ. Электрическая схема, принцип работы, параметры.
5. Многоходовый диодно-резистивный ключ. Электрическая схема, принцип работы.
6. Электронный транзисторный ключ с общим эмиттером (ОЭ). Электрическая схема, принцип работы, параметры.
7. Транзисторный ключ ОЭ с резистивной связью. Электрическая схема, принцип работы.
8. Транзисторный ключ ОЭ с емкостной связью. Электрическая схема, принцип работы.
9. Транзисторный ключ с общей базой.
10. Логический ключ-повторитель и ключ-инвертор. Таблицы истинности ключей.

Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Результаты измерений. Графики.
5. Выводы.

Лабораторная работа № 7

ИЗУЧЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ МДП-ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: практическое изучение характеристик и особенностей ключевого режима работы МДП-транзисторов. Исследование переходных процессов в ключе.

Краткие теоретические сведения

Простейший транзисторный ключ – это каскад усиления на МДП-транзисторе [3, 4, 9], управляющий перепадом напряжения (рис. 7.1).

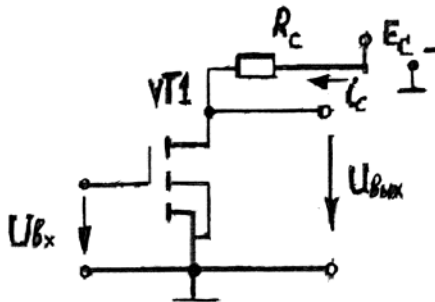


Рис. 7.1. Схема электронного ключа на МДП-транзисторе

Если на вход ключа подается сравнительно большое $U_{вх}$, то ключ открывается, $VT1$ насыщается. Ток стока возрастает до предельно возможного $I_{сн} = E_c / R_c$, а напряжение на стоке $U_{с.мин} = U_{сн.нас} = 0$.

В качестве элемента динамической нагрузки ключа также используются МДП-транзисторы. Схемы таких ключей показаны на

рис. 7.2. В схеме (рис. 7.2, а) VT_1 выполняет роль активного элемента, а VT_H – элемента динамической нагрузки.

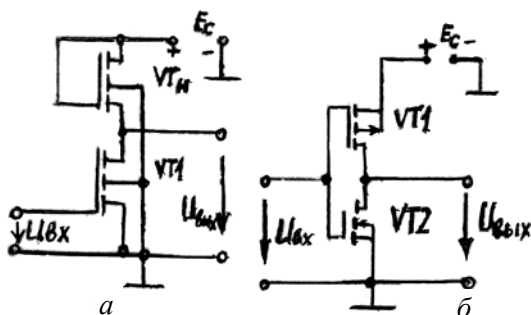


Рис. 7.2. Схемы электронных МДП-ключей на однотипных (а), разнотипных МДП-транзисторах (б)

Поскольку на сток и затвор VT_H подается одно напряжение, он ведет себя как нелинейное сопротивление. Его вольт-амперная характеристика аппроксимируется параболой.

$$I_c = 1/2b_n(E_c - U_{вх} - U_{сп}), \quad (7.1)$$

где b_n – удельная крутизна характеристики;

$U_{сп}$ – напряжение открывания транзистора.

Когда входное напряжение $U_{вх}$ превышает пороговое $U_{сп}$ транзистор VT_1 открывается, течет ток I_c , а $U_{ввых}$ снижается, напряжение на VT_H растет, он также открывается.

Переходные процессы в ключе в основном определяются процессами заряда и разряда емкостей транзисторов, их соединяющих элементов и нагрузки. Суммарная емкость

$$C_{\Pi} = C_{зк} + C_{сп} + C_{зин} + C_{инп} + C_n$$

где C_{Π} – емкости затвор-канал, сток-подложка транзистора VT_1 ;

$C_{зин}$ и $C_{инп}$ – емкости затвор-исток и исток-подложка транзистора VT_H ;

C_m – емкость монтажных соединений изоляции;

C_n – емкость нагрузки, подключаемой к ключу.

Задержка переключения при открывании ключа равна времени уменьшения заряда на $0,5EC_{\text{п}} / I_0$, где I_0 – ток разряда. Приближенное значение задержки переключения при закрытии ключа находится как время, в течение которого напряжение $C_{\text{п}}$ повышается от 0 до $0,5E$:

$$U_{\text{ВЫХ}} = 0,5 E; \quad E = E(1 - \exp(t^{0,1}/\tau_3)),$$

где $\tau_3 = C_{\text{п}} / [b_{\text{п}}(0,5E - U_{\text{зно}})]$.

Тогда

$$t_{\text{зг}}^{0,1} = \tau_3 \lg 2,$$

где $\tau_3 = C_{\text{п}} / [b_{\text{н}}(0,5E - U_{\text{зно}})]$.

Сопротивление открытого $VT_{\text{н}}$ больше сопротивления VT_1 , поэтому и задержка при открывании $t_{\text{зг}}^{0,1} > t_{\text{зг}}^{1,0}$.

В схеме (рис. 7.2, б) использованы два ключевых элемента, один из которых VT_1 – с каналом p -типа, а второй VT_2 – с n -каналом. Входным сигналом управляют оба транзистора. При низком входном напряжении VT_2 закрыт, а VT_1 открыт. Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ.макс}}$. При большом $U_{\text{ВХ}}$ VT_2 открывается, а VT_1 – закрывается. Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ.мин}} = U_{\text{ВЫХ}} = 0$. В обоих состояниях ключа один транзистор закрыт. Переходные процессы в ключах на комплементарных МДП-транзисторах аналогичны процессам в ключах на одностипных транзисторах.

Аппаратура, используемая при выполнении работы. Схема передней панели макета приведена на рис. 7.3.

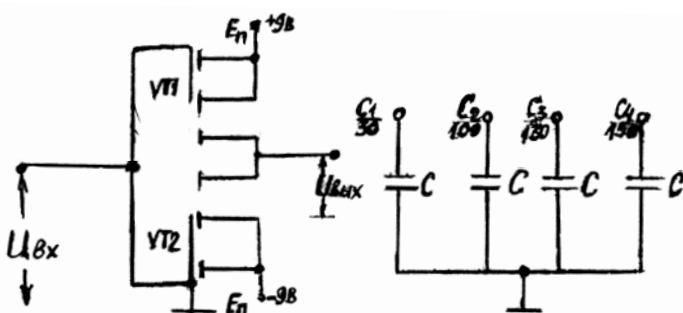


Рис. 7.3. Схема передней панели макета:

C – емкости с параметрами 30, 100, 680, 1500 пФ;

VT_1, VT_2 – МДП-транзисторы; $U_{\text{ВХ}}$ – входное напряжение;

$U_{\text{ВЫХ}}$ – выходное напряжение

Подключение измерительных приборов и соединение элементов производится внешними проводами с помощью клемм, которые расположены на передней панели макета.

В работе используются:

- источники питания постоянного тока АГАТ;
- осциллограф С9-1;
- вольтметр В7-27;
- прибор комбинированный цифровой 4323А;
- импульсный генератор Г5-63.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рис. 7.4.

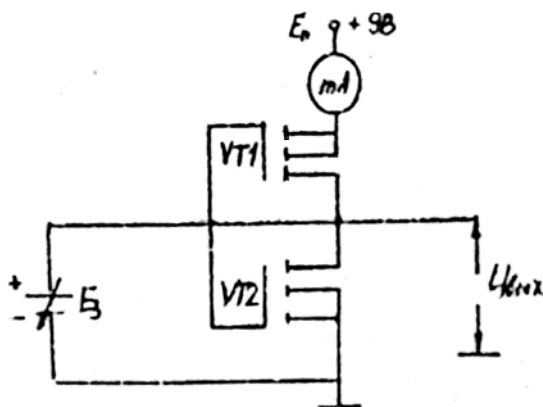


Рис. 7.4. Комплементарный ключ:
 E_3 – управляющее напряжение; mA – миллиамперметр

1.1. Снять передаточную характеристику, величину E_3 изменять от 0 до 9 В; результаты зафиксировать в таблице.

1.2. Снять выходные вольт-амперные характеристики, величину $E_{п}$ изменять от 0 до 9 В.

2. Собрать схему, изображенную на рис. 7.5, и с помощью осциллографа снять параметры переходных характеристик $t_{ф}$ и $t_{ср}$ по значениях емкости $C_c = 30, 100, 680, 1500$ пФ. Амплитуда положительных импульсов, подаваемых от генератора, должна быть равна 8 В.

Результаты измерений зафиксировать в таблице.

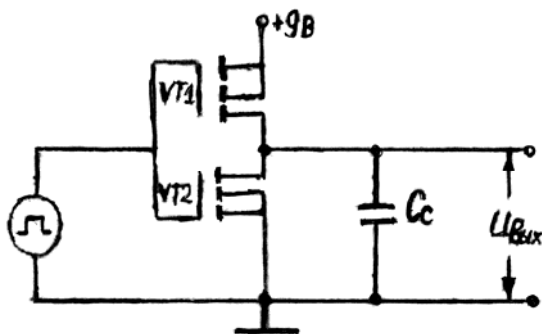


Рис. 7.5. Схема для исследования переходных характеристик

Контрольные вопросы

1. Зонная диаграмма и перенос носителей заряда в структуре металл-диэлектрик-полупроводник (МДП).
2. Режим работы МДП структуры.
3. Типы электронных ключей, основные требования к ним.
4. Электронный ключ на униполярном транзисторе с *p-n*-переходом. Схема, принцип работы.
5. Электронный ключ на МДП-транзисторе со встроенным каналом. Электрическая схема, принцип работы, параметры.
6. Электронный ключ на МДП-транзисторе с индуцированным каналом. Электрическая схема, принцип работы.
7. Электронный ключ на однотипных МДП-транзисторах. Электрическая схема, принцип работы.
8. Электронный ключ на разнотипных МДП-транзисторах.
9. Использование электронных ключей в коммутационных схемах и автоматических устройствах.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Результаты измерений. Графики.
5. Выводы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Цель работы: изучение основных параметров и принятого действия полупроводниковых источников света. С помощью лабораторного макета измерить основные параметры источника излучения, исследовать вольт-амперную и вольт-яркостную характеристики, а также схему применения светодиода – оптрона и его переходную характеристику.

Краткие теоретические сведения

В активных структурах полупроводниковых источников света заброс электронов из V -зоны или с примесного уровня полупроводника в C -зону может осуществляться как за счет температурной ионизации атома, так и электромагнитным излучением [3, 6, 8]. Такие носители заряда (НЗ) называются неравновесными. Обратный процесс перехода неравновесных электронов в V -зону или на примесный уровень называется рекомбинацией.

В инжекционном светодиоде неосновные носители создаются в активной области кристалла путем инжекции прямосмещенным p - n -переходом. Излучательную рекомбинацию, как правило, поддерживает инжекционная составляющая тока электронов i_n , инжектированных в активную область p -типа. Дырочная составляющая инжекционного тока i_p практически не дает вклада в излучательную рекомбинацию.

Электроны, инжектированные в активную область, могут рекомбинировать как излучательно, так и безызлучательно. Физическую излучательную способность светодиода можно характеризовать внутренним квантовым выходом η_i – это отношение числа генерируемых в активной области квантов света к числу инжектированных за то же время неосновных электронов.

Очевидно, что $0 < \eta_i < 100\%$. Основным параметром светодиода является внешний квантовый выход

$$\eta_v = \gamma \cdot \eta_i \cdot k,$$

где $\gamma = i_n / i_g$ – коэффициент инжекции p - n -перехода;

k – коэффициент вывода излучения из кристалла, определяемый отношением мощности излучения, выводимой из светодиода, к мощности излучения, генерируемой внутри кристалла.

В зависимости от конструкции и технологии изготовления максимальный внешний квантовый выход может достигать десятков процентов при плотностях прямого тока $J = (10-100) \text{ А/см}^2$ (рис. 8.1). При малых плотностях тока возрастает доля составляющих тока i_p , что приводит к уменьшению γ и, следовательно, η . При больших плотностях тока, протекающего через диод, возникает необходимость отвода тепла от кристалла, так как с ростом температуры уменьшается квантовый выход. В результате зависимость (см. рис. 8.1) для случая комнатной температуры оказывается экстремальной. В районе максимума, который достаточно размыт, зависимость яркости высвечивания, где $1 \leq n \leq (1,5-4)$ в области малых плотностей тока и $n \leq (0,7-1)$ в области больших плотностей тока, максимальная световая эффективность имеет место при краевой электролюминесценции, когда энергия излучаемых квантов близка к энергии запрещенной зоны полупроводника ($h\nu \geq E_g$) и когда время жизни неосновных (инжектированных) носителей тока (то есть время существования от момента инжекции до момента рекомбинации) равно времени жизни излучательной рекомбинации.

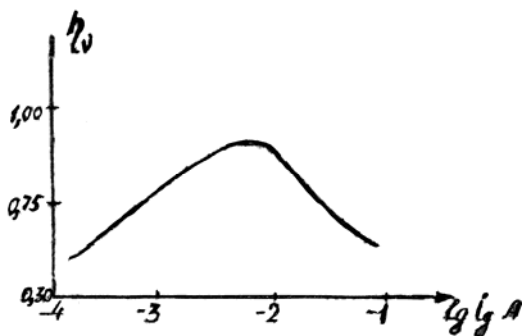


Рис. 8.1. Зависимость η_v для комнатной температуры

Основной характеристикой инжекционного диода как источника света является его яркостная характеристика (рис. 8.2). Она имеет

нелинейный начальный участок, ограниченный низкими выходными яркостями (мощностями), и почти линейный участок, протяженность которого определяется изменением яркости (мощности) на выходе диода в пределах одного-двух порядков. Линейный участок характеристики $B = f(i_g)$ инжекционного диода в оптоэлектронике чаще всего используется как рабочий. При этом в широком диапазоне изменений яркости в первом приближении можно принять

$$B = B_0 (i_g - I^*). \quad (8.1)$$

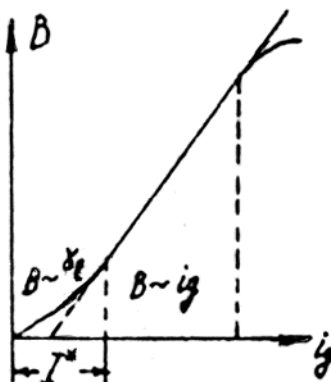


Рис. 8.2. Яркостная характеристика инжекционного диода

Соотношение является приближенным. Приемлемая аппроксимация соответствует степенной функции вида $B \sim i_g^\gamma$.

$$\gamma_g = f(j, \lambda, T, B).$$

Параметр I^* соответствует «пороговому» значению тока через диод, при котором уже становится возможной линейзация зависимости $B(i_g)$. Величина B_0 для комнатной температуры лежит в пределах от 0,1–0,5 до 1–2,5 мА и зависит от типа диода, параметров полупроводника, характеристик контактов и температуры. Величина B_0 имеет сравнительно большой разброс от диода к диоду одного и того же типа. Диапазон ее значений лежит в пределах 2–20 нт/мА.

Для светодиода вольт-амперная характеристика типично диодная (рис. 8.3) с сильно выраженной сверхлинейностью в прямом направ-

лении. С этим связана необходимость включения последовательно с диодом ограничивающего сопротивления, обеспечивающего устойчивый режим работы.

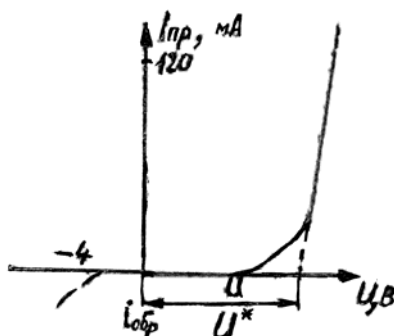


Рис. 8.3. Вольт-амперная характеристика светодиодов

Для смещенного в прямом направлении инжекционного диода

$$i_g = i_0 \exp(eU / nkT), \quad (8.2)$$

где i_0 , n – постоянные для различных областей U .

По вольт-амперным характеристикам определяются статическое дифференциальное R_{gi} и напряжение отсечки U^* .

Краткое описание лабораторного макета. Лабораторный макет состоит из генератора тока G_2 , генератора пилообразного напряжения G_1 , с помощью которого осциллографируется вольт-амперная характеристика светодиода, и схемы применения оптрона.

Принципиальная схема лабораторного макета приведена на рис. 8.4, 8.5.

Аппаратура, используемая при выполнении работы.

Для измерения параметров светодиода необходимы следующие приборы:

- лабораторный макет;
- источник напряжения;
- осциллограф С1-57;
- вольтметр 4323А, В7-27.

Порядок выполнения работы

1. Подготовка приборов к работе. АГАТ – ручку регулировки напряжения привести в крайнее левое положение. В7-27 – тумблер «Сеть» перевести в нижнее положение. Лабораторный макет – провод питания подключить к зажимам ЛИПС-20 «+» и «-». Соединить гнезда макета с осциллографом и вольтметром: гнездо Γ_3 – со входом «X» осциллографа; гнездо Γ_4 – со входом «У»; гнездо Γ_5 – заземлить.

2. Наблюдение ВАХ на осциллографе.

3. Измерение характеристик светодиода с помощью вольт-амперной характеристики. Клеммы Γ_8 и Γ_9 подключить к 4323А, переключатель пределов установить в положение 5 В. Для снятия величины тока используется В7-27, который подключен к гнездам Γ_6 и Γ_7 макета. Пределы измерения В7-27 устанавливаются с помощью переключателя.

Величины тока устанавливаются с помощью ручек R_1 (грубо) и R_2 (точно).

Значения тока и напряжения заносятся в таблицу, на основании этих данных строится вольт-амперная характеристика $i_g = f(U)$. Используя график вольт-амперной характеристики, находим статическое сопротивление $R_g = U / I$, напряжение отсечки U^* .

4. Измерение тока отсечки из ампер-яркостной характеристики. На лабораторном макете эти измерения осуществляются следующим образом:

4.1. Тумблер $S1$ установить в положение «С2».

4.2. Гнезда Γ_6 и Γ_7 соединить с вольтметром.

Вращая ручки R_1 , R_2 и изменяя предел измерения прибора 4323А, производим отсчет величин тока. Для измерения яркости свечения светодиода используем фотодиод, включенный в режим фотоЭДС. В этом режиме люкс-амперная характеристика фотодиода линейна, поэтому по изменению фотоЭДС в нашем эксперименте будем судить об изменении яркости светодиода. ФотоЭДС измеряем В7-27, подключенным к гнездам Γ_{10} и Γ_{11} макета.

Единица измерения – относительная единица яркости.

Используя график зависимости $B = f(i_g)$, находим величину тока отсечки I^* .

Схема эксперимента представлена на рис. 8.4, 8.5.

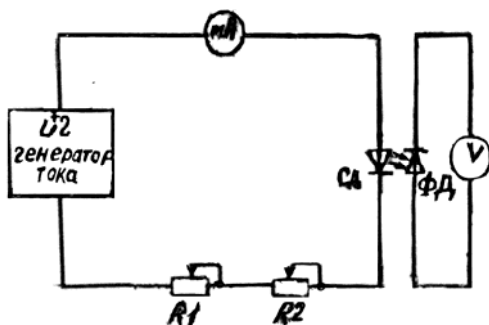


Рис. 8.4. Схема эксперимента

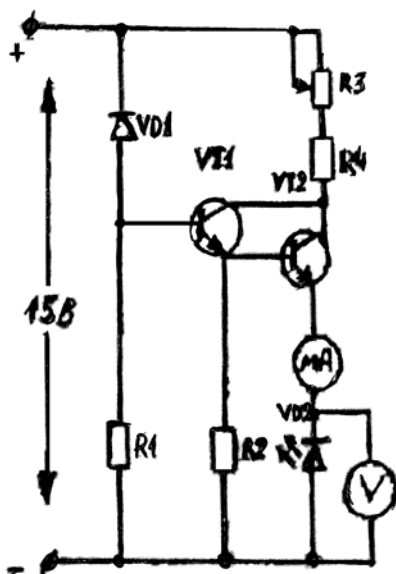


Рис. 8.5. Схема для снятия вольт-амперных характеристик

5. Изучение схемы применения.

Светодиод широко применяется в науке, технике, быту. Это индикаторы и источники некогерентного излучения в широкой области спектра. Одним из важных применений светодиода является оптрон.

Оптрон – прибор, состоящий из источника излучения и фотоприемника. Важной особенностью оптрона как элемента цепи является

то, что передающая и приемная части его гальванически не связаны. В данном случае связь оптическая.

В работе исследуется передаточная характеристика оптрона – зависимость сопротивления фотодиода от тока светодиода.

Ток светодиода отсчитывается так же, как и в п. 3.

Ток фотодиода измеряется вольтметром В7-27, который подключается к гнездам Γ_{12} и Γ_{13} лабораторного макета; тумблер S_1 поставить в положение «С1».

По результатам измерения строится график зависимости $R_{уд} = f(i_g)$.

$$R_{уд} = U_{уд} / I_g, \text{ Ом}, U_{уд} = 10 \text{ В.}$$

Контрольные вопросы

1. Фотоэлектрические явления в полупроводниках *p-n*-переходах.
2. Зонная диаграмма *p-n*-перехода, влияние интенсивности светового потока на потенциальный барьер *p-n*-перехода.
3. Полупроводниковые фоторезисторы: структура, характеристики, параметры.
4. Полупроводниковые фотодиоды: структура, принцип работы прибора.
5. Характеристики и параметры фотодиода.
6. Полупроводниковые фотогенераторы: структура, принцип работы фотогенератора.
7. Характеристики и параметры фотогенератора.
8. Полупроводниковые светодиоды: структура, зонная диаграмма светодиода, принцип работы.
9. Характеристики и параметры светодиода.
10. Оптоэлектронная пара светодиод–фотодиод, принцип работы, область использования.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Схемы установки и исследуемые схемы.
4. Результаты измерений, их обработки в виде графиков, таблиц и т. д., оценка погрешностей.
5. Выводы.

2. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ В АНАЛОГОВЫХ И ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Лабораторная работа № 9

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Цель работы: практическое изучение усилительных каскадов на биполярных транзисторах и освоение методики измерения основных параметров усилителей.

Краткие теоретические сведения

Электронный усилитель – это устройство для увеличения параметров электрических сигналов [3, 6, 9]. Простейший усилитель – усилительный каскад на транзисторе включает управляемый элемент (транзистор), источник электропитания и нагрузочный резистор, включенный в выходную цепь УЭ. На схеме электронный усилитель изображают в виде четырехполюсника (рис. 9.1) с входными и выходными выводами.

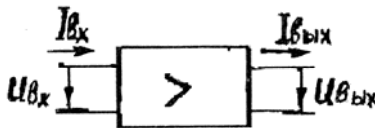


Рис. 9.1. Условное обозначение электронного усилителя

По функциональному назначению усилители подразделяются на усилители тока, напряжения, мощности, низкочастотные, высокочастотные, импульсные, электрометрические и операционные усилители, а также ламповые, транзисторные, магнитные; по схеме включения транзистора – каскады ОЭ, ОБ, ОК.

Основные параметры усилителей:

– коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = 20 \lg U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}, \text{ Дб};$$

$$- K_I = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}} = 20 \lg I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}, \text{ Дб};$$

$$- K_P = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}} = K_U \cdot K_I = 10 \lg P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}, \text{ Дб}.$$

Важнейшими характеристиками усилителя являются: амплитудная характеристика $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}}) / f_c = \text{const}$, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), $K_{\text{и}} = \varphi(f_c) / U_{\text{вх}} = \text{const}$, которые изображены на рис. 9.2. Мерой частотных искажений (рис. 9,2, б) является коэффициент частотных искажений на нижней и верхней частоте.

$$M_{\text{н}} = K_{\text{и0}} / K_{\text{ин}}; \quad M_{\text{в}} = K_{\text{и0}} / K_{\text{ив}}.$$

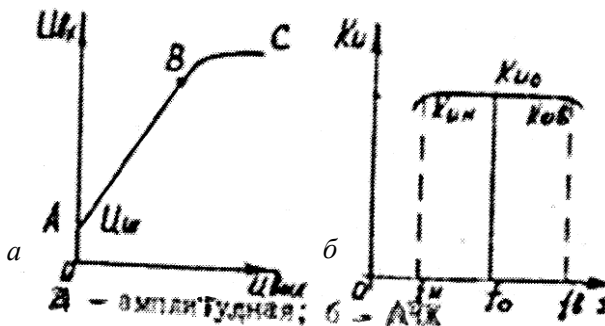


Рис. 9.2. Характеристики усилителя

Нелинейные искажения усилителя (рис. 9.2, а, участок BC) определяются коэффициентом гармоник

$$K_{\text{г}} = (I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)^{1/2} / I_1,$$

где I_2, \dots, I_n – составляющие тока второй, ... n – гармонии.

Коэффициент полезного действия усилителя

$$\eta = P_{\text{вых}} / P_0,$$

где $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность,

P_0 – мощность, потребляемая усилителем или от источника электропитания.

В многокаскадных усилителях (рис. 9.3) используются следующие виды межкаскадных связей: гальваническая (а), конденсаторная RC-связь (б), трансформаторная, автотрансформаторная (в).

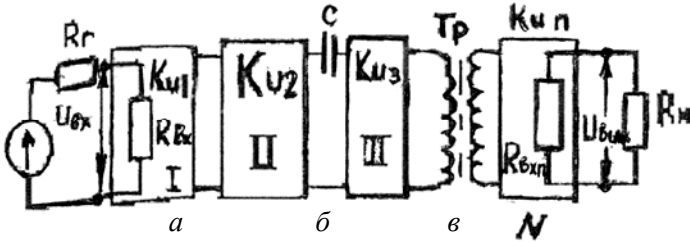


Рис. 9.3. Структурная схема многокаскадного усилителя

Параметры усилителя определяются графоаналитическим и аналитическим расчетом. При аналитическом расчете усилителя строится его эквивалентная схема (рис. 9.4), в которой изображается транзистор Т-образной схемой.

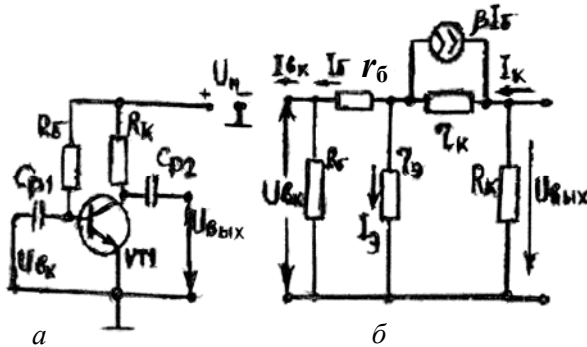


Рис. 9.4. Электрическая схема усилителя ОЭ (а) и его эквивалентная схема (б)

Ток коллектора

$$I_k = \beta I_б r_k / (r_k + r_v + R_k) = \beta r_k / r_k + Rk I_б = \beta_3 I_б,$$

где β_3 – эквивалентный коэффициент передачи по току.

Входное сопротивление

$$r_{вх} = U_{вх} / I_{вх} = U_{бэ} / I_б = r_б + r_э(\beta + 1).$$

Полное входное сопротивление

$$R_{вх} = r_{вх} / R_s = (r_{вх} R_б) / (r_{вх} + R_б).$$

Коэффициент усиления по току

$$K_I = \beta_3.$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = I_k R_k / I_6 R_6 = K_I R_k / R_{\text{ВХ}}.$$

Выходное сопротивление

$$R_{\text{ВЫХ}} = r_k / R_k \sim R_k.$$

Для повышения стабильности работы усилителя в него вводятся отрицательные обратные связи (ООС), причем напряжение цепи обратной связи $U_{\text{ос}} = f(I_{\text{ВЫХ}}, U_{\text{ВЫХ}})$.

Для усиления сигналов в некоторой узкой полосе частот используются резонансные усилители, нагрузкой которых являются LC либо RC – избирательные элементы, характеризующиеся резонансной частотой f_0 и добротностью Q избирательного элемента.

Приборы, используемые при выполнении работы. Электрическая схема лабораторного макета приведена на его передней панели. Схема усилителя собрана на транзисторе $VT1$. На транзисторе $VT2$ собран эмиттерный повторитель.

Переключатель S_1 позволяет переключить коллекторную нагрузку транзистора $VT1$. Дроссель $DP1$, шунтируемый переключателем S_2 , служит для подъема амплитудно-частотной характеристики на высоких частотах. С помощью переключателя, S_1 в качестве нагрузки в коллекторную цепь транзистора $VT1$ может быть включен колебательный контур L_2C_2 , в результате чего усилительный каскад становится избирательным. Коэффициент включения контура изменяется с помощью переключателя S_3 .

В работе используются следующие приборы:

- генератор синусоидальных сигналов низкой частоты ГЗ-109;
- генератор синусоидальных сигналов высокой частоты Г4-158;
- вольтметр цифровой В7-27;
- вольтметр переменного тока ВЗ-13;
- осциллограф С1-57;
- стабилизированный источник питания.

Порядок выполнения работы

1. Измерить входное сопротивление каскада. Для этого к входной клемме подсоединить резистор R величиной 4,7 кОм, и на его свободный конец подать от генератора низкой частоты сигнал $U_{\text{вх}}$ величиной 10 мВ (действующее значение) частотой 1 кГц. Измерив напряжение $U_{\text{вх}}$ на входной клемме усилителя (на другом конце резистора), определить входное сопротивление по формуле

$$R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} \cdot R / (U_{\text{вх}}^1 - U_{\text{вх}}).$$

2. Снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) аperiodического усилительного каскада. Для чего:

2.1. Подать от источника питания напряжение 10 В.

2.2. Установить переключатели на макете в положения: $S_1 = 1$, $S_2 = 1$, $S_3 = 6$, $S_4 = \text{ВЫКЛ}$.

2.3. На вход каскада от генератора низкой частоты подать сигнал величиной порядка 100 мВ, контролируя его величину вольтметром ВЗ-13.

2.4. Частоту генератора изменять от 20 Гц до 200 кГц, производя измерения на частотах (20, 40, 80, 160, 200), 10^n , где $n = 0, 1, 2, 3$.

3. Снять АЧХ аperiodического усилительного каскада, изменив сопротивление в цепи коллектора ($S_1 = 2$).

4. Исследовать влияние емкостей в цепи эмиттера на АЧХ. Для этого снять АЧХ при положении переключателя $S_2 = 2$, а затем при $S_2 = 3$.

5. Исследовать резонансный усилитель. Для этого:

5.1. Установить переключатели в следующие положения: $S_1 = 3$, $S_2 = 1$, $S_3 = 6$, $S_4 = \text{ВЫКЛ}$.

5.2. Подать с высокочастотного генератора на вход каскада сигнал величиной 100 мВ и, изменяя его частоту в интервале 150–300 кГц, определить резонансную частоту колебательного контура;

5.3. Исследовать влияние согласования усилительного каскада на коэффициент усиления K_u и полосу пропускания $2\Delta f$. Для этого, изменяя коэффициент связи путем поочередного переключения переключателя S_3 из положения 6 в положение 1, снять зависимость K_u . Перевести переключатель S_4 в положение «Вкл.» и снять ту же зависимость. Сравнить результаты, определить влияние на АЧХ усилителя цепочки R_7C_6 .

Контрольные вопросы

1. Классификация электронных усилителей.
2. Принципы построения усилительных каскадов.
3. Схемы цепей питания электронных усилителей.
4. Обратные связи в усилителях.
5. Стабилизация режима работы электронных усилителей.
6. Характеристики и параметры электронных усилителей.
7. Усилительный каскад на транзисторе с общим эмиттером.
8. Эмиттерный повторитель: электрическая схема, принцип работы.
9. Многокаскадные усилители. Типы многокаскадных связей.
10. Избирательные усилители. Электрическая схема, принцип работы.
11. Усилители постоянного тока. Электрическая схема усилителя, принцип работы.
12. Бестрансформаторные усилители мощности.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Таблицы с экспериментальными данными.
5. Графики исследованных зависимостей.
6. Выводы.

Лабораторная работа № 10

ИЗУЧЕНИЕ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: практическое ознакомление с простыми цепями постоянного тока и методами измерений напряжений и токов.

Краткие теоретические сведения

Цепью постоянного тока называют электрическую цепь, содержащую источник постоянного напряжения и ветви с резистивными элементами (рис. 10.1).

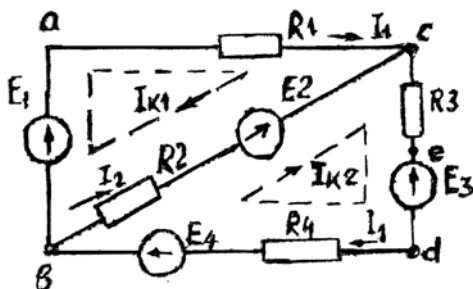


Рис. 10.1. Сложная электрическая цепь

Под анализом электрической цепи подразумевается определение токов (напряжений) на ее участках при заданных параметрах источников и приемников. Методы расчета сложных цепей основаны на использовании законов Кирхгофа [9, 10]. **Первый закон Кирхгофа** – алгебраическая сумма токов, находящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (10.1)$$

Второй закон Кирхгофа – алгебраическая сумма ЭДС в любом замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме падений напряжений на всех участках контура:

$$\sum_{k=1}^m E_k = \sum_{k=1}^l R_k I_k. \quad (10.2)$$

В общем случае токи электрической цепи постоянного тока определяются в результате совместного решения уравнений (10.1) и (10.2), причем количество уравнений m должно быть равно количеству неизвестных токов цепи.

Порядок расчета цепи:

1. Произвольно намечают направления токов ветвей и для цепи с n узлами по первому закону Кирхгофа записывается $(n - 1)$ уравнений [1].

2. Произвольно намечают направления обхода контуров и по второму закону Кирхгофа записывают $m - (n - 1)$ уравнений, при этом

контур выбирают так, чтобы каждый из них содержал хотя бы одну новую ветвь.

3. Решая систему из m уравнений, находят токи; если значения некоторых токов отрицательные, то их действительные направления противоположны первоначально выбранным.

Для электрической цепи (см. рис. 10.1) $n = 2$, $m = 3$ и расчет такой цепи осуществляется путем решения следующей системы уравнений:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0;$$

$$E_1 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2;$$

$$E_2 - E_3 + E_4 = r_2 I_2 + (R_3 + R_4) I_3.$$

Метод контурных токов позволяет уменьшить общее число уравнений на $(n - 1)$ и свести систему к числу $m - (n - 1)$ уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа. Последовательность расчета:

1. Цепь разбивают на отдельные контуры и в каждом контуре произвольно выбирают направление условно действующего контурного тока.

2. Выбрав обход контуров, совпадающий с направлением контурных токов, для каждого контура записывают уравнения второго закона Кирхгофа, при этом учитывают падения напряжения на элементах рассматриваемого контура и от соседних контурных токов.

3. Решая полученную систему уравнений, находят контурные токи.

4. Действительные токи ветвей определяются алгебраическим суммированием контурных токов, протекающих в них. Для электрической цепи, схема которой приведена на рис. 10.1, получим следующие уравнения:

$$E_1 - E_2 = (R_1 + R_2) I_{к1} - R_2 I_{к2};$$

$$E_2 - E_3 + E_4 = -R_2 I_{к1} + (R_2 + R_3 + R_4) I_{к2};$$

$$I_{к1} = \Delta 1 / \Delta; \quad I_{к2} = \Delta 2 / \Delta.$$

Действительны токи в ветвях $I_1 = I_{к1}$, $I_2 = I_{к2} - I_{к1}$, $I_3 = I_{к2}$.

Метод наложения основан на принципе наложения, согласно которому в линейной электрической цепи, содержащей несколько источников питания, токи ветвей рассматривают как алгебраическую сумму токов, вызываемых в этих ветвях действием каждой ЭДС в отдельности. Метод эффективен для расчета цепей, содержащих небольшое число источников.

Метод двух узлов применяется для расчета цепей, имеющих только два узла. Здесь определяется напряжение между узлами, после чего токи ветвей находят по обобщенному закону Ома.

Порядок расчета:

1. Произвольно выбирают направление узлового напряжения и определяют его величину по формуле

$$U_{об} = \frac{\sum_1^n g_k E_k}{\sum_1^m g_k},$$

где $\sum_1^n g_k E_k$ – алгебраическую сумму произведений ЭДС и проводимостей каждой ветви $g_k E_k$ берут со знаком плюс, если направление ЭДС E_k противоположно направлению напряжения $U_{об}$, и со знаком минус – когда их направления совпадают;

$\sum_1^m g_k$ – сумма проводимостей всех ветвей цепи.

Для цепи (см. рис. 10.1) узловое напряжение

$$U_{ав} = ((1/R1) \cdot E1) + ((1/R2) \cdot E2) + \\ + ((1/(R3 + R4) \times (E3 - E4)) / ((1/R1) + (1/R2) + (1/(R3 + R4))).$$

2. Рассчитывают токи в ветвях по обобщенному закону Ома.

Аппаратура, используемая при выполнении работы. Блок-схема передней панели макета приведена на рис. 10.2.

В работе используются:

- источник питания постоянного тока Б5-48;
- генератор сигналов низкочастотный ГЗ-109;
- осциллограф С9-1;
- прибор комбинированный цифровой Щ4300;
- вольтметр В7-27.

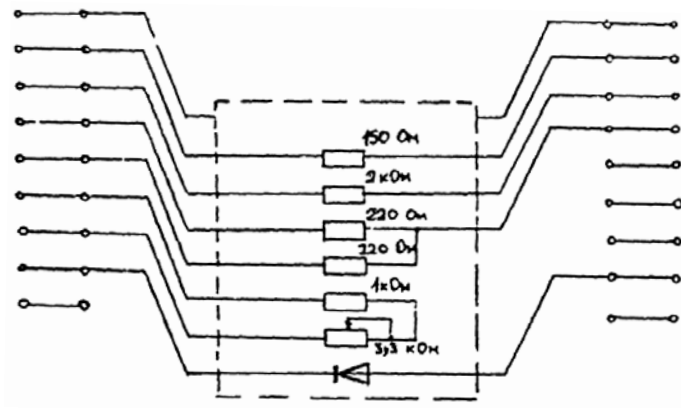


Рис. 10.2. Схема передней панели лабораторного макета

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, изображенную на рис. 10.3. Проверить выполнение закона Ома, измеряя напряжение, и ток при изменении входного напряжения источника питания от 2 до 10 В с шагом 1 В для двух резисторов разных номиналов. Результаты зафиксировать в таблице.

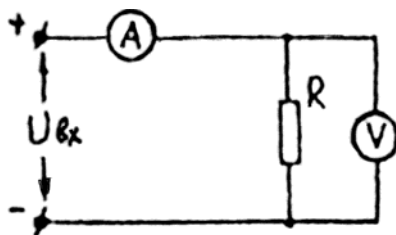


Рис. 10.3. Схема проверки закона

2. Собрать схему делителя напряжения на 2, приведенную на рис. 10.4. Проверить правильность выбранных номиналов измерением выходного напряжения при подаче на вход 2,5 и 10 В. Зафиксировать результаты в таблице.

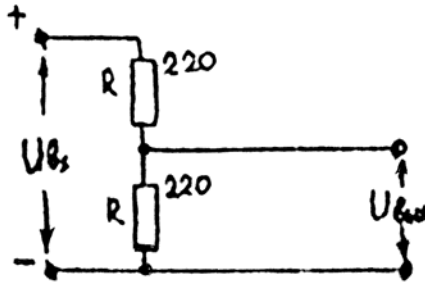


Рис. 10.4. Схема делителя напряжения

3. Собрать схему, изображенную на рис. 10.5. Измерить выходное напряжение при подаче на вход 2, 5, 10 В. Результаты зафиксировать в таблице.

Рассчитать полученную схему и показать, почему изменилось напряжение на выходе.

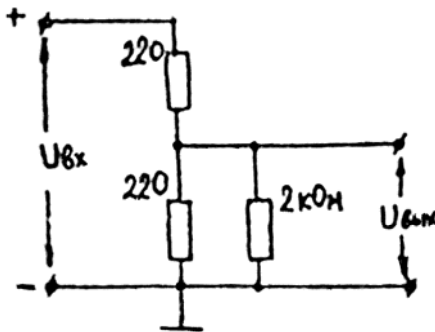


Рис. 10.5. Схема измерения выходного напряжения

4. Собрать схему, изображенную на рис. 10.4. Подать на вход делителя синусоидальное напряжение частоты 1 кГц с генератора ГЗ-109. Замерить и зарисовать напряжение на входе и выходе делителя с помощью осциллографа и вольтметра В7-27 (гнездо «+»).

5. Собрать схему, изображенную на рис. 10.6. Снять зависимость $U_d = f(I)$ при изменении напряжения на входе от 2 до 10 В с шагом 1 В. Построить график зависимости. Поменять полярность диода и, изменяя напряжение на входе, наблюдать, что получится.

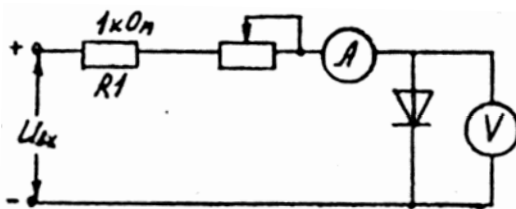


Рис. 10.6. Схема исследования зависимости $U_d = f(I)$

Контрольные вопросы

1. Расчет электрической цепи постоянного тока по закону Ома при параллельно-последовательном соединении резистивных элементов.
2. Записать уравнения для напряжений и токов в двухконтурной электрической цепи с помощью законов Кирхгофа.
3. Расчет токов в ветвях электрической цепи по обобщенному закону Ома.
4. Определить полное сопротивление электрической цепи, содержащей последовательно-параллельные соединения резисторов и источники ЭДС.
5. Расчет электрической цепи постоянного тока методом двух узлов.
6. Упрощение электрической цепи путем преобразования звезды в треугольник и треугольника в звезду.
7. Расчет электрической цепи постоянного тока методом контурных токов.
8. Определение входного и выходного сопротивления электрической цепи, представленной в виде четырехполосника.
9. Расчет электрической цепи постоянного тока методом узловых потенциалов.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Результаты измерений и расчетов. Графики.
5. Выводы.

ИЗУЧЕНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ И СХЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Цель работы: изучение основных характеристик операционных усилителей и принципов построения схем на операционных усилителях.

Краткие теоретические сведения

Название операционный усилитель относится к усилителю постоянного тока с большим коэффициентом усиления (как правило, превышающим 10 000), имеющему два входных вывода, называемых дифференциальными (разностными) входными выводами, и один несимметричный выходной вывод.

Условное обозначение ОУ на принципиальных электрических схемах приведено на рис. 11.1.

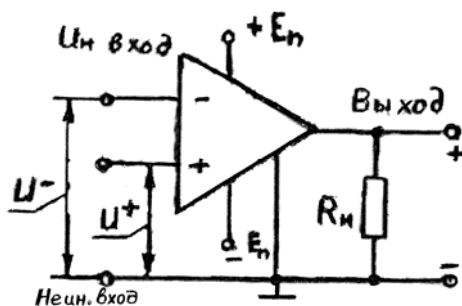


Рис. 11.1. Обозначение ОУ

Как видно из рис. 11.1, ОУ имеет пять основных выводов. Два из них, около которых стоят обозначения $+E_{п}$ и $-E_{п}$, подключаются к источнику питания. Токи от источников питания проходят через сопротивление нагрузки $R_{н}$, создавая на нем выходное напряжение $U_{вых}$, измеряемое относительно земли.

Входные выводы, помеченные на рис. 11.1 знаками «+» и «-», называются соответственно неинвертирующим и инвертирующим

входами. Напряжение выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ больше дифференциального входного сигнала между двумя входами в число раз, соответствующее коэффициенту усиления ОУ. На прямой и инверсный входы могут подаваться как постоянные, так и переменные сигналы. Кроме основных выводов, ОУ имеет еще несколько дополнительных, с помощью которых подключаются внешние цепи коррекции характеристик ОУ.

Высокий коэффициент усиления ОУ при помощи цепей обратных связей, выполняемых на навесных элементах, позволяет создавать разнообразные схемы, передаточные характеристики которых определяются только параметрами этих элементов.

С помощью характеристик идеального ОУ относительно легко и просто составить многие типовые схемы и получить уравнения для их расчета. Характеристики реальных ОУ приближаются к идеальным в зависимости от внешних по отношению к ОУ условий: сопротивлений источника сигналов и нагрузки, величины обратной связи и т. п.

Принято, что идеальный ОУ имеет бесконечно большое входное сопротивление, а его выходное сопротивление равно нулю:

$$R_{\text{вх}} \rightarrow \infty, R_{\text{вых}} \rightarrow 0, I_{\text{вх}} \rightarrow 0.$$

Идеальный ОУ имеет передаточную характеристику, изображенную на рис. 11.2.

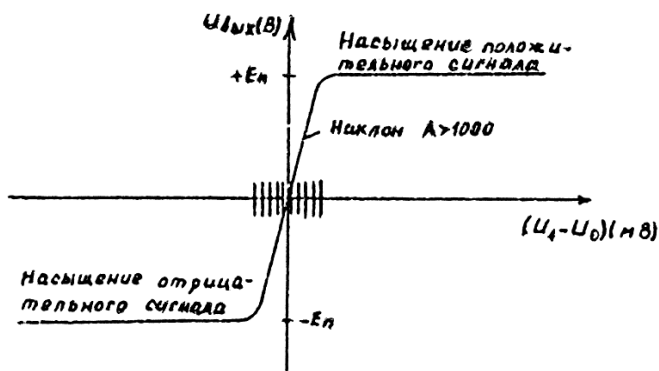


Рис. 11.2. Передаточная характеристика идеального ОУ

Допущение, что $R_{\text{вых}}$ ОУ равно нулю, означает, что ОУ может быть представлен в виде управляемого генератора напряжения (рис. 11.3), параметры которого определяются передаточной характеристикой.

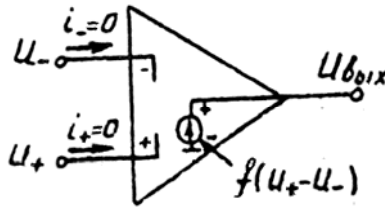


Рис. 11.3. Модель идеального ОУ для линейной области передаточной характеристики

Передаточная характеристика ОУ имеет три области: линейную, в которой величина выходного напряжения является линейной функцией разности входных напряжений ($U_+ - U_-$), и две области насыщения – по положительному и отрицательному напряжениям питания. В линейной области функциональная связь между выходным напряжением и разностью входных напряжений ($U_+ - U_-$) определяется коэффициентом усиления по напряжению A :

$$U_{\text{вых}} = A(U_+ - U_-).$$

Диапазон разности входных напряжений, соответствующий работе ОУ в линейной области, весьма мал и определяется из неравенства $(U_+ - U_-) < E_n$ [11.1].

При типовой величине $E_n = 15$ В и коэффициенте усиления 10^5 величина разностного сигнала

$$(U_+ - U_-) \leq 15 / 10^5 = 150 \text{ мкВ}.$$

Параметры и характеристики реальных ОУ во многом отличаются от идеальных. Эти различия могут существенно влиять на работу схем.

Для установки на выходе нулевого уровня необходимо между входами ОУ приложить некоторое напряжение, которое называется входным напряжением смещения $U_{\text{см}}$. У ряда типов ОУ имеются внешние выводы, к которым подсоединяется переменное сопротивление для компенсации или сведения к нулю выходного напряжения.

Входное сопротивление и входные токи ($R_{\text{вх}}, I_{\text{вх}}$). Входное сопротивление ОУ – это сопротивление со стороны его входов. Значения сопротивлений входа реальных ОУ находятся в диапазоне от 5 кОм до 20 МОм в зависимости от типа ОУ.

В реальных ОУ через входные клеммы протекают нулевые постоянные токи.

Разность двух входных токов ОУ называется разностным входным током. Как правило, его величина значительно меньше величины среднего тока смещения.

Выходное сопротивление и выходной ток ($R_{\text{вых}}, I_{\text{вых}}$). Все типы ОУ рассчитываются на определенное значение выходного тока, превышение которого недопустимо. Минимальное значение сопротивления нагрузки выбирается исходя из допустимой величины выходного тока и номинального значения выходного напряжения. Полоса пропускания и время нарастания.

Полоса пропускания – это частотный диапазон, в котором значение выходного напряжения уменьшается до 0,707 от максимальной величины при постоянной амплитуде входного сигнала.

Время нарастания – это время, которое требуется для того, чтобы напряжение на выходе усилителя с единичным усилением изменилось с 10 до 90 % от своего конечного значения.

Ширина полосы пропускания (ПП) связана со временем нарастания

$$\text{ПП} = 0,35 / t_{\text{н}},$$

где ПП измеряется в герцах, а $t_{\text{н}}$ – в секундах.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала ($K_{\text{ос.сф}}$). Реальный ОУ реагирует на среднюю величину напряжений U_+ и U_- , которая называется синфазным сигналом. Коэффициент усиления синфазного сигнала A_c – это усиление ОУ, когда на оба входа подается один и тот же сигнал.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала ($K_{\text{ос.сф}}$) является отношением A к A_c , выраженным в децибеллах (дБ):

$$K_{\text{ос.сф}} = 20\lg(A / A_c).$$

Типичные значения $K_{\text{ос.сф}}$ составляют 70–90 дБ.

Типовые схемы на ОУ. Линейные схемы изображены на рис. 11.4–11.7.

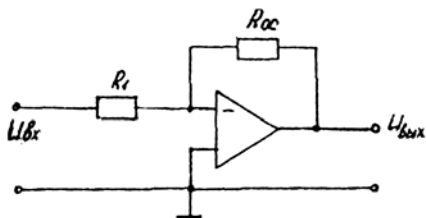


Рис. 11.4. Инвертирующий усилитель

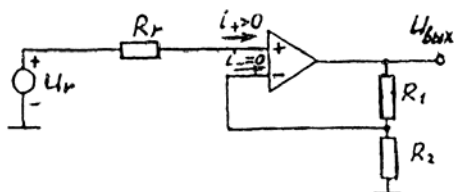


Рис. 11.5. Неинвертирующий усилитель

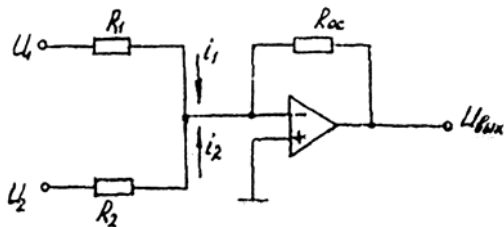


Рис. 11.6. Схема сложения аналоговых сигналов

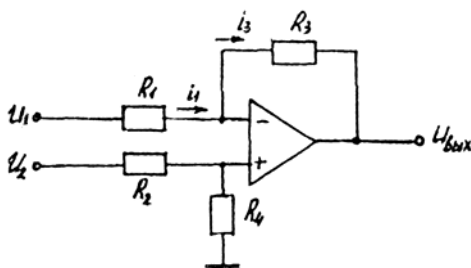


Рис. 11.7. Схема вычитания аналоговых сигналов

Нелинейные схемы изображены на рис. 11.8, 11.9.

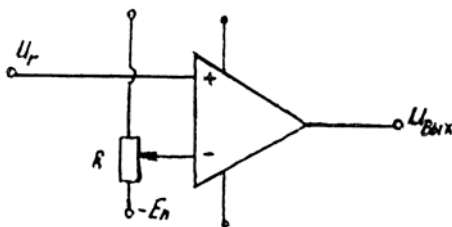


Рис. 11.8. Схема компаратора

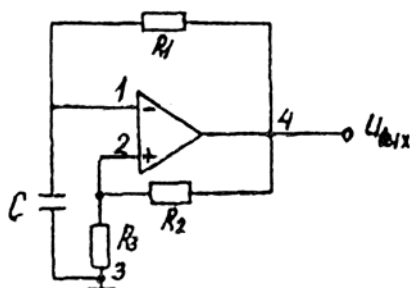


Рис. 11.9. Генератор прямоугольных импульсов

Приборы, используемые при выполнении работы. Схема лабораторного макета изображена на передней панели прибора. Макет выполнен на интегральном операционном усилителе типа 153УД2.

При выполнении работы используются следующие приборы:

- генератор звуковой частоты ГЗ-109;
- осциллограф С9-1;
- вольтметр В7-27.

Порядок выполнения работы

1. Измерение коэффициента усиления ОУ без обратной связи.

1.1. Соберите схему, приведенную на рис. 11.10.

1.2. Соедините выход генератора звуковой частоты с входом схемы.

1.3. Подготовьте к работе осциллограф и вольтметр переменного тока.

1.4. Подайте на вход схемы с генератора сигнал частотой 50 Гц и амплитудой 5 В.

1.5. Подсоедините вход вольтметра в точке Б схемы и измерьте напряжение U_6 , при этом входное дифференциальное напряжение ОУ будет равно $U_g = U_6 / 100$, а коэффициент усиления ОУ без обратной связи

$$A = U_{\text{ВЫХ}} / (U_6 / 100) = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{д}}$$

1.6. Делитель напряжения, собранный на сопротивлениях R_2 (99 кОм) и R_3 (1 кОм), обеспечивает входное дифференциальное напряжение усилителя $U_{\text{д}} = 1/100$ напряжения в точке Б схемы.

1.7. Измерьте напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ и U_6 .

1.8. Рассчитайте коэффициент усиления ОУ без обратной связи.

1.9. Подсоедините к входу схемы генератор звуковой частоты, подайте сигнал напряжением 10 мВ и частотой 50 Гц и измерьте коэффициент усиления схемы.

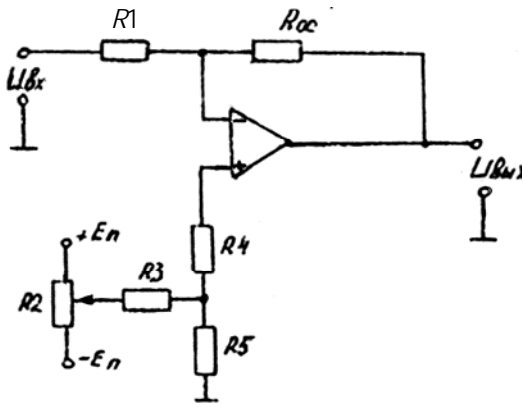


Рис. 11.10. Схема для измерения коэффициента усиления:
 $R_1 = 50 \text{ кОм}$; $R_2 = 99 \text{ кОм}$; $R_3 = 1 \text{ кОм}$; $R_4 = 50 \text{ кОм}$; $C_1 = 400 \text{ пФ}$

2. Исследование схемы установки нуля неинвертирующего усилителя.

2.1. Соберите схему, изображенную на рис. 11.11.

2.2. Рассчитайте коэффициент усиления схемы.

2.3. С помощью потенциометра $R1$ сбалансируйте схему, заземлив ее вход.

2.4. Измерьте коэффициент усиления схемы, подав на ее вход сигнал с параметрами $U_{вх} = 10$ мВ, $f = 50$ Гц.

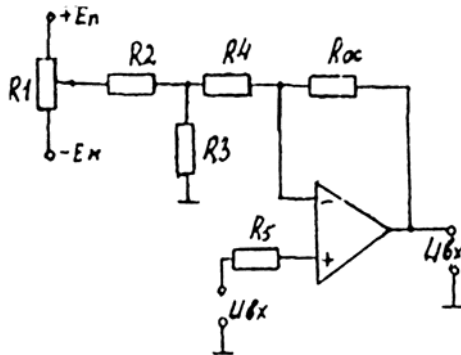


Рис. 11.11. Схема установки нуля неинвертирующего усилителя:
 $R_1 = 50$ кОм; $R_2 = 200$ кОм; $R_3 = 1$ кОм; $R_4 = 9$ кОм;
 $R_5 = 10$ кОм; $R_{oc} = 1$ МОм

3. Определение напряжения смещения ОУ типа К140УД9.

- 3.1. Соберите схему согласно рис. 11.12.
- 3.2. Подключите вольтметр постоянного тока к выходу ОУ.
- 3.3. Снимите показания вольтметра $U_{вых}$.
- 3.4. Определите коэффициент усиления схемы $U_{см}$.
- 3.5. Рассчитайте напряжение смещения ОУ по формуле

$$U_{см} = U_{вых} / K,$$

где K – коэффициент усиления.

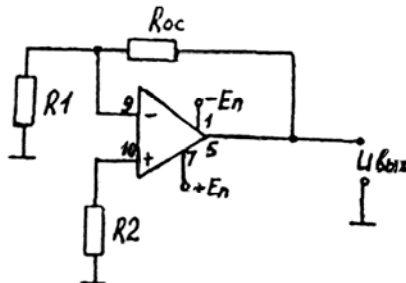


Рис. 11.12. Схема определения напряжения смещения:
 $R_1 = 10$ кОм; $R_2 = 9$ кОм; $R_{oc} = 1$ МОм; $+E_n = 10$ В

4. Измерение входных токов.

4.1. Соберите схему согласно рис. 11.13.

4.2. Подключите вольтметр к выходу ОУ для измерения постоянного напряжения.

4.3. Закоротите перемычкой на землю вход 10 ОУ.

4.4. Включите питание на ОУ и замерьте $U_{\text{ВЫХ}}$ по вольтметру.

4.5. Рассчитайте ток $I_{\text{ВХ}}$ по формуле

$$I_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВЫХ}} / R_1.$$

4.6. Снимите питание с ОУ, закоротите перемычкой выводы 5 и 9 ОУ между собой, а со входа 10 отсоедините перемычку от земли. Включите питание на ОУ и снимите $U_{\text{ВЫХ}}$. Рассчитайте $I_{\text{ВХ}}$ по формуле

$$I_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВЫХ}} / R_2.$$

4.7. Снимите питание с ОУ, уберите перемычку с 5 и 9 выводов, включите питание на ОУ и замерьте $U_{\text{ВЫХ}}$, так как $R_1 = R_2$, то

$$U_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВХ}}R - I_{\text{ВХ}}R = \Delta I_{\text{ВХ}}R.$$

4.8. Определите $\Delta I_{\text{ВХ}}$ по формуле

$$\Delta I_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВЫХ}} / R_2.$$

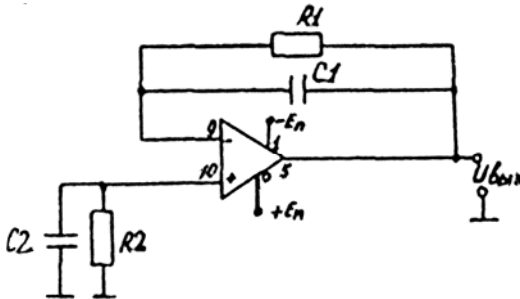


Рис. 11.14. Схема измерения выходных токов

5. Измерение коэффициента ослабления синфазного сигнала.

5.1. Соберите схему согласно рис. 11.14.

5.2. Включите генератор звуковой частоты; переключатель S_2 поставьте в положение «50», а переключатель пределов измерения – на «10».

5.3. Подайте питание на ОУ; на вход схемы подайте сигнал частотой 50 Гц, а величину сигнала с генератора увеличивайте до такого значения, при котором $U_{вх}$ ОУ станет равным 1 мВ.

5.4. Измерьте входное напряжение $U_{вх}$, вычислите коэффициент усиления синфазного сигнала $A_{сф}$ по формуле

$$A_{сф} = I \cdot 10^{-3} / U_{вх}.$$

5.5. Вычислите коэффициент ослабления синфазного сигнала по формуле

$$K_{ос.сф} = 20 \lg A,$$

где A – коэффициент усиления ОС, определенный вами ранее.

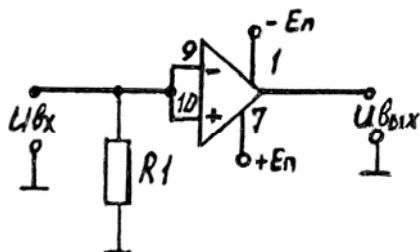


Рис. 11.14. Схема измерения коэффициента ослабления синфазного сигнала:
 $R_1 = 1 \text{ кОм}$; $E_n = 10 \text{ В}$

Контрольные вопросы

1. Назначение, структурная схема операционных усилителей (ОУ).
2. Базовые параметры операционных усилителей.
3. Амплитудные характеристики ОУ. Определение усилительных, входных и выходных параметров по АХ.
4. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики ОУ.
5. Инвертирующий ОУ. Схема, принципы работы.
6. Неинвертирующий ОУ. Схема, принципы работы.
7. Неинвертирующий сумматор на ОУ.
8. Преобразователь тока в напряжение на ОУ.
9. Компаратор (элемент сравнения напряжений) на ОУ.
10. Инвертор на ОУ. Схема, принцип работы.
11. Дифференцирующий элемент на ОУ.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Таблицы и графики по экспериментальным данным.
5. Выводы.

Лабораторная работа № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Цель работы: изучить схемы и принципы работы основных функциональных узлов вторичных источников питания, провести экспериментальные исследования их характеристик.

Краткие теоретические сведения

Вторичные источники питания предназначены для преобразования переменного напряжения сети (220 В, 50 Гц) в постоянное [3, 6, 9, 11].

Типовая блок-схема вторичного источника питания содержит следующие функциональные узлы (рис. 12.1):

1 – преобразователь уровней напряжения и тока;

2 – выпрямитель, преобразующий переменный ток в постоянный или пульсирующий ток одного направления;

3 – сглаживающий фильтр, уменьшающий пульсации выпрямленного напряжения;

4 – стабилизатор, компенсирующий колебания выходного напряжения питания при изменении тока нагрузки или входного напряжения.

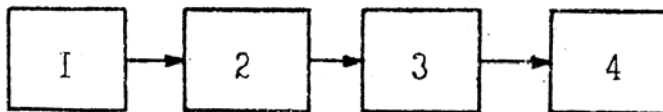


Рис. 12.1. Блок-схема вторичного источника питания

Функцию преобразования уровней напряжения и тока выполняют силовые трансформаторы. Напряжения на обмотках трансформатора принято давать в эффективных (действующих) значениях. Для выпрямления переменного тока используются полупроводниковые диоды. Схема простейшего однополупериодного выпрямителя представлена на рис. 12.2, а, а эпюры напряжений на его входе и выходе – на рис. 12.2, б. Выпрямленное напряжение U_H содержит постоянную составляющую U_1 , первую U_{1m} и высшие гармоники:

$$U_0 = 0,45U_{эф},$$

$$U_{1m} = Um/2.$$

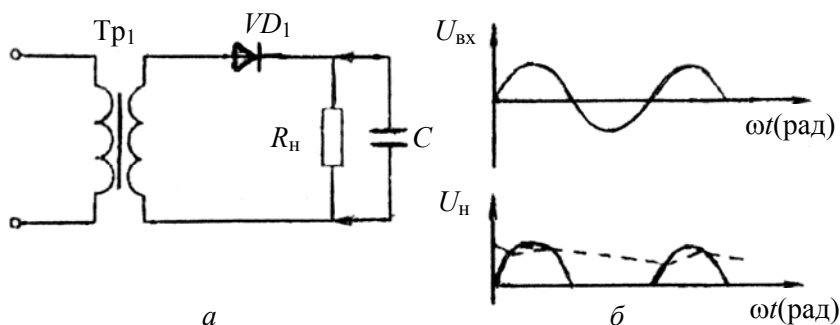


Рис. 12.2. Однополупериодный выпрямитель:
а – схема; б – эпюры напряжений

Коэффициент пульсации, представляющий собой отношение амплитуды первой гармоники к постоянной составляющей, для рассматриваемого выпрямителя составит:

$$K_{п} = \frac{U_{1m}}{U_0} = 1,57.$$

Для уменьшения коэффициента пульсаций параллельно с нагрузкой в цепь выпрямителя включается конденсатор. Форма напряжения на нагрузке с параллельно подключенным конденсатором показана пунктиром на рис. 12.2, б.

Для улучшения параметров выпрямителя применяется мостовая схема выпрямления (рис. 12.3), которая обеспечивает заряд конденсатора во время положительной и отрицательной полуволн. Максимальная величина обратного напряжения на диодах равна выходному напряжению схемы в режиме холостого хода (то есть при $R_n = \infty$)

$$U_0 = U_{эф} - 2U_D.$$

Так как ток в нагрузке для мостовой схемы протекает в течение обоих полупериодов, то постоянная составляющая выпрямленного напряжения будет в два раза больше, чем для однополупериодного выпрямителя.

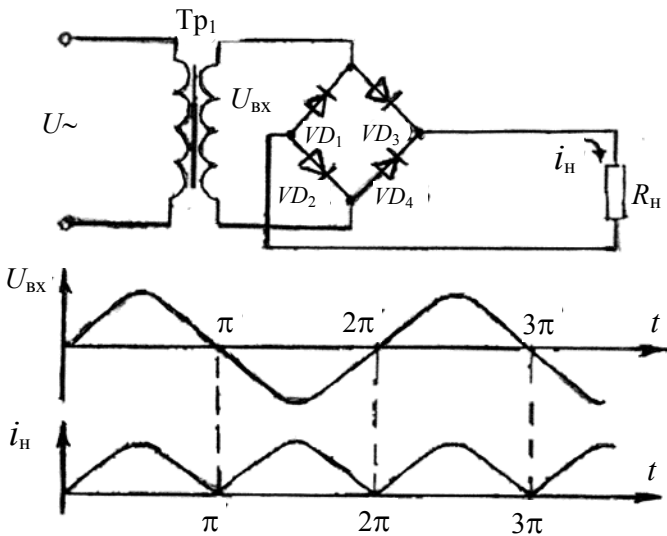


Рис. 12.3. Схема мостового выпрямителя

Коэффициент пульсации мостовой схемы при отсутствии сглаживающего конденсатора равен 0,667, а частота пульсации в два раза выше частоты входного напряжения.

Так как трансформатор является габаритным и дорогим элементом, то в ряде случаев, когда мощность, потребляемая от выпрямителя, небольшая, применяют схемы умножения напряжения. Одна из таких схем – схема удвоения напряжения приведена на рис. 12.4.

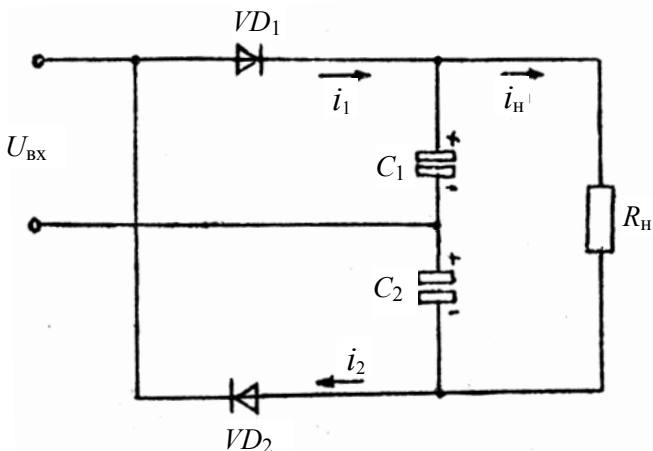


Рис. 12.4. Схема удвоения напряжения

При положительных полуволнах ток i_1 заряжает конденсатор C_1 через диод D_1 , а при отрицательных – ток i_2 заряжает конденсатор C_2 через диод D_2 .

Общее напряжение на конденсаторах C_1 и C_2 , включенных последовательно, обеспечивает протекание тока через нагрузку R_H .

У нестабилизированных источников питания при увеличении тока нагрузки постоянная составляющая напряжения на выходе источника падает, а напряжение пульсации растет.

Для устранения этого недостатка служат стабилизаторы напряжения, которые обеспечивают постоянство выходного напряжения при изменении нагрузки или входного напряжения в оговоренных пределах. Работа стабилизаторов напряжения изложена, например в [3, 6, 9].

Приборы, используемые при выполнении работы. Электрическая принципиальная схема лабораторного макета приведена на его передней панели. Она включает силовой трансформатор TP_1 , к первичной обмотке которого подводится напряжение сети, а со вторичной снимается пониженное напряжение.

Вторичная обмотка TP_1 с помощью переключателя S_1 подключается к одной из трех исследуемых схем: положение 1 – к схеме однополупериодного выпрямителя, положение 2 – к схеме мостового

выпрямителя; положение 3 – к схеме выпрямителя с удвоением напряжения (рис. 12.4).

Переключатель S_3 предназначен для подключения конденсатора C_1 или C_2 , которые выполняет роль фильтрующего элемента в схеме однополупериодного выпрямителя.

Переключатель S_4 предназначен для подключения одного из резисторов R_2 – R_6 , которые выполняют роль нагрузки в схеме однополупериодного выпрямителя.

Переключатель S_2 предназначен для подключения к мостовой схеме выпрямления, выполненной на НР диодах VD_2 – VD_4 , сглаживающих конденсаторов C_1 , C_2 и нагрузочных сопротивлений R_2 – R_6 (положение 1 – S2.1), либо к схеме, выполненной на транзисторах VT_6 – VT_7 (положение 1 – S2.1), либо к схеме с операционным усилителем (положение 3).

В работе используются:

- осциллограф С9-1;
- вольтметр В7-27;
- источник питания постоянного тока типа АГАТ.

Порядок выполнения работы

Исследование однополупериодного выпрямителя

Подключить схему однополупериодного выпрямителя к вторичной обмотке трансформатора с помощью переключателя S_1 .

1. Исследовать зависимость коэффициента пульсации выпрямленного напряжения от величины сглаживающей емкости и нагрузки, для чего:

1.1. Подключить осциллограф к гнезду X_5 , получить устойчивое изображение 2–3 периодов напряжения, зарисовать в одном масштабе шесть эпюр выходного напряжения (не изменяя положения ручек управления осциллографом) для двух значений нагрузки (R_2 , R_6) при каждом из трех положений переключателя S_3 , то есть подключая соответственно емкости $C = 0$, $C_1 = 5$ мкФ, $C_2 = 20$ мкФ.

1.2. Подключить к гнездам X_5 и X_6 вольтметры и измерить постоянную и переменную составляющие выпрямленного напряжения для каждой из 15 возможных комбинаций переключателей S_3 и S_4 . Данные измерений свести в таблицу.

Учитывая величины сопротивления ($R_2 = 1$ кОм, $R_3 = 5$ кОм, $R_4 = 10$ кОм, $R_5 = 15$ кОм, $R_6 = 20$ кОм), построить графики зависимости коэффициента пульсации $K_{п}$ от величины нагрузки для трех значений сглаживающей емкости. Рассчитать и изобразить графически зависимость коэффициента фильтрации N от величины нагрузки. Коэффициент фильтрации вычисляется из выражения

$$N = K_{по} / K_{п}.$$

где $K_{по}$ – коэффициент пульсации при отсутствии емкости ($C = 0$).

Подключить осциллограф к гнезду X_5 и получить изображение 2–3 периодов переменной составляющей; зарисовать в одном масштабе осциллограммы выходного напряжения для трех положений переключателей S_3 и S_4 .

2. Исследовать мостовую схему выпрямителя.

Подключить схему мостового выпрямителя к вторичной обмотке трансформатора с помощью переключателя S_1 , с помощью S_2 подключить к мостовой схеме гнезда X_5 , X_6 .

Повторить п. 1 для мостовой схемы.

3. Исследовать электронный стабилизатор напряжения, выполненный на транзисторах VT_6 и VT_7 .

Подключить с помощью переключателя S_2 схему стабилизатора к схеме мостового выпрямителя; подключить вольтметры к гнездам X_3 и X_7 .

3.1. Исследовать стабилизирующие характеристики схемы:

- отключить макет от сети;
- к гнездам X_3 подать напряжение 10 В от источника питания (к верхнему гнезду «+»);
- поставить R_{10} в одно из крайних положений;
- фиксировать напряжение на выходе стабилизатора, изменяя напряжение на входе стабилизатора от 1 до 15 В с шагом 1 В; результаты измерений свести в таблицу; рассчитать коэффициент стабилизации по формуле

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх} \cdot U_{вых}}{\Delta U_{вых} \cdot U_{вх}};$$

- построить график зависимости $K_{\text{ст}} = f(U_{\text{вх}})$;
- поставить R_{10} в другое крайнее положение и повторить измерение;
- подключить к гнездам V_8 сопротивление 40 Ом и повторить измерения.

3.2. Исследовать сглаживающие свойства стабилизатора:

- подключить макет к сети;
- измерить постоянное и переменное значения напряжений на входе и выходе стабилизатора, изменяя потенциометром R_{10} выходное напряжение от минимального до максимального с шагом 1 В;
- результаты свести в таблицу;
- рассчитать коэффициент пульсаций на входе $K_{\text{п. вх}}$ и выходе $K_{\text{п. вых}}$ стабилизатора; определить коэффициент фильтрации схемы по формуле

$$N = K_{\text{п. вх}} / K_{\text{п. вых}};$$

- подключить к гнездам X_8 сопротивление 40 Ом, повторить измерения;
- построить графики зависимости

$$f_1(U_{\text{вых}}); \quad N = f_2(U_{\text{вых}}).$$

4. Исследовать электронный стабилизатор напряжения, выполненный на операционном усилителе.

С помощью переключателя S_2 подключить схему стабилизатора к схеме мостового выпрямителя, а к гнездам X_3 и X_9 подключить вольтметры.

Повторить измерения по п. 3, при этом нагрузочное сопротивление подключить к гнездам R_{10} , а минимальное и максимальное напряжение устанавливать с помощью потенциометра R_{18} .

5. Исследовать выпрямитель с удвоенным напряжением. С помощью переключателя S_1 подключить схему удвоенного напряжения к вторичной обмотке трансформатора. Подключить вольтметры на вход X_4 и выход X_{11} .

Снять зависимость выходного постоянного напряжения от величины входного переменного напряжения, поставив S_6 в положение 1. Величину входного напряжения менять с шагом 1 В при помощи потенциометра R_{20} . Результаты свести в таблицу.

Повторить измерения, установив S_6 в положение 2.

Построить графики зависимости

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}}).$$

6. Снять внешнюю характеристику выпрямителя $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{H}})$ для мостовой схемы. Изменяя переключателем S_3 сопротивления R_2-R_6 , измерить значение тока I_{H} и напряжение U_{H} . Построить график зависимости $U_{\text{H}} = f(I_{\text{H}})$.

Контрольные вопросы

1. Классификация выпрямителей по типу приборов и виду электрических схем.
2. Структурная схема выпрямителей переменного напряжения и основные его параметры.
3. Однополупереходная схема выпрямителя, принцип его работы, энергетические соображения.
4. Виды нагрузки выпрямителей.
5. Внешние характеристики выпрямителей.
6. Двухполупериодная схема выпрямителя, временные диаграммы.
7. Сглаживающие фильтры: электрические схемы LC-фильтров, их параметры.
8. Мостовая схема однофазного выпрямителя. Принцип его работы, энергетические соотношения.
9. Стабилизаторы напряжения: назначение, основные параметры, типы стабилизаторов напряжения.
10. Параметрические стабилизаторы напряжения. Электрическая схема, принцип работы.
11. Компенсационные стабилизаторы напряжения. Электрическая схема, принцип работы.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Исследуемые схемы.
4. Результаты измерения. Осциллограммы.
5. Выводы.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ АВТОГЕНЕРАТОРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: практическое изучение электрических схем LC - и RC -автогенераторов, выполнение расчетов LC -генераторов высокой частоты и RC -генераторов низкой частоты; проведение экспериментальных измерений основных параметров генерируемых колебаний.

Краткие теоретические сведения

Автогенераторами (генераторами с самовозбуждением) называются электронные устройства, способные преобразовывать энергию постоянного тока в электрические колебания заданной формы и частоты [3, 6, 9, 12].

По форме генерируемых сигналов различают генераторы гармонических и релаксационных колебаний. Первые генерируют синусоидальное напряжение, а вторые – импульсы прямоугольной, пилообразной, треугольной и других форм.

Для генерированных синусоидальных колебаний высокой частоты наиболее широко используется метод компенсации потерь в LC -контуре при помощи усилительного элемента.

Структурная схема автогенератора представлена на рис. 13.1.

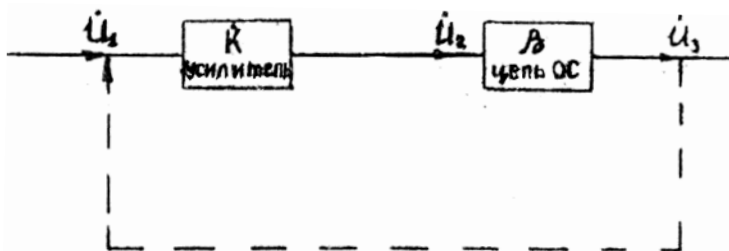


Рис. 13.1. Структурная схема автогенератора

Она содержит усилитель и схему частотно зависимой обратной связи. Между напряжением на выходе усилителя U_2 и напряжением

на его входе \dot{U}_1 наблюдается фазовый сдвиг φ_k . Напряжение \dot{U}_2 будет определяться выражением

$$\dot{U}_2 = K\dot{U}_1.$$

На выходе схемы частотно зависимой обратной связи напряжение U_1 также будет иметь фазовый сдвиг φ_2 по отношению к напряжению U_2 . Напряжение U_3 определяется выражением

$$\dot{U}_3 = \beta\dot{U}_2.$$

Если подобрать обратную связь в рассматриваемой схеме таким образом, что ее выходное напряжение U_3 будет равным входному напряжению усилителя U_1 и подать это напряжение U_3 на вход усилителя, то в замкнутой схеме возможно существование колебаний. Следовательно, условием генерации замкнутой схемы является равенство выходного напряжения схемы обратной связи входному напряжению усилителя:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_3.$$

Это равенство будет выполняться при условии:

$$K\beta = 1. \quad (13.1)$$

Соотношение (13.1) называется условием самовозбуждения генератора. Комплексные коэффициенты K и β могут быть записаны в виде:

$$K = Ke^{j\varphi_k}, \quad \beta = \beta e^{j\varphi\beta},$$

где K – численное значение коэффициента усиления усилителя по напряжению;

β – численное значение коэффициента обратной связи;

$\varphi_k, \varphi\beta$ – фазовые сдвиги, вносимые соответственно усилителем и цепью обратной связи.

Поэтому соотношение (13.1) можно записать в виде двух равенств:

$$K\beta = 1; \quad (13.2)$$

$$\varphi_k + \varphi\beta = 0 \dots 2\pi n. \quad (13.3)$$

Равенство (13.2) называется условием баланса амплитуд. Оно отражает тот факт, что генератор будет возбуждаться только в случае компенсации усилителем потерь, вносимых схемой обратной связи.

Равенство (13.3) – называется условием баланса фаз. Оно отражает тот факт, что генератор будет возбуждаться только в случае совпадения фаз напряжений на выходе схемы обратной связи и на входе усилителя.

Приборы, используемые при выполнении работы. При выполнении данной работы используются два макета: макет для изучения LC -генераторов и макет для изучения RC -генераторов.

Макет для изучения LC -генераторов

Принципиальная электрическая схема лабораторного макета приведена на его передней панели. Усилитель генератора выполнен на транзисторе VT_1 , нагрузкой которого является колебательный контур L_2C_3 , настроенный на резонансную частоту $f_0 = 240$ кГц.

Для изменения добротности колебательного контура служит резистор R_5 , подключаемый к колебательному контуру переключателем S_5 .

Обратная связь осуществляется с помощью катушек индуктивности L_1 и L_2 . Коэффициент обратной связи может регулироваться путем изменения положения катушки L_1 относительно катушки L_2 путем плавного поворота соответствующей ручки. При помощи переключателя S_3 может быть изменен знак обратной связи – в нижнем положении переключателя она становится отрицательной.

В макете предусмотрена возможность проведения исследований работы схемы в трех режимах. Режим выбирается с помощью переключателя S_1 .

В первом положении переключателя S_1 цепь обратной связи отключается, и автогенератор может работать только в режиме усиления, подаваемого на базу транзистора V_1 через трансформатор Tr_1 внешнего синусоидального напряжения.

Во втором положении переключателя S_1 цепь положительной обратной связи замыкается, чем обеспечивается режим автоколебаний.

В третьем положении переключателя по входу усилителя подключается цепь обратной связи и вторичная обмотка трансформатора. Этим обеспечивается исследование процесса захватывания частоты.

Смещение на базу транзистора V_1 задается потенциометром R_2 . Для измерения напряжения смещения служат гнезда pU_1 . Контроль

тока коллектора транзистора осуществляется путем подключения миллиамперметра к гнездам pA_2 .

Импульсный модулятор, служащий для создания импульсного режима работы генератора, включается в цепь коллектора с помощью переключателя S_3 . Импульсный модулятор имеет гнезда, служащие для вывода сигнала синхронизации осциллографа при наблюдении импульсного режима работы генератора.

Подключение приборов для наблюдения формы сигнала генератора и измерения его параметров производится к гнездам X_3 .

Макет для изучения RC-генераторов

Принципиальная электрическая схема макета изображена на его передней панели. Она содержит два операционных усилителя типа 153УД2, выводы которых распаяны, согласно электрической схеме, на клеммы 1–8 коммутационного поля. Коммутационное поле, состоящее из 50 клемм, предназначено для подсоединения навесных элементов. С целью предупреждения паразитной генерации между выводами 1 и 8 операционного усилителя необходимо подсоединять конденсатор емкостью 5–30 пФ.

На передней панели макета расположены четыре переменных резистора R_1 – R_4 , которые могут использоваться при макетировании соответствующих генераторов.

Источники питающих напряжений для микросхем операционных усилителей подсоединяются соответственно к клеммам 7 ($+E_n$) и 4 ($-E_n$).

Схема частотно зависимой обратной связи генератора выполняется посредством подсоединения навесных элементов к клеммам макета и коммутации их проводниками с соответствующими выводами операционного усилителя.

Проверка функционирования схемы и измерения ее параметров производится путем подключения к соответствующим точкам схемы измерительных приборов.

При выполнении работы используются следующие приборы:

- два стабилизированных источника питания;
- осциллограф;
- вольтметр;
- генератор;
- мультиметр.

Порядок выполнения работы

1. Исследовать LC -генератор. Выставить $E_{\text{п}} = 10 \text{ В}$.

1.1. Снять и построить характеристику зависимости коллекторного тока транзистора V_1 от напряжения $U_{\text{бэ}} I_k = f(U_{\text{бэ}})$.

Для этого подключить к гнездам pA_2 миллиамперметр (соответствующие гнезда вольтметра), а к гнездам pU_1 – вход мультиметра. Переключатель S_1 поставить в положение 1, S_2 – в положение «Выкл.», S_4 – в положение «Вкл.», S_3 – в правое положение, S_6 – в положение «Выкл.». Изменяя потенциометром R_2 напряжение от 0 до 2 В с шагом 0,2 В, снять показания миллиамперметра. Данные свести в таблицу и построить график проходной характеристики транзистора $I_k = f(U_{\text{бэ}})$.

1.2. Снять и построить амплитудно-частотную характеристику усилителя, для этого с помощью переменного резистора R_2 установить напряжение, равное 1,8 В.

Подать сигнал величиной 200 мВ на вход схемы с генератора. Значения сигнала контролировать вольтметром. Поддерживая входное напряжение постоянным и изменяя частоту в пределах от 150 до 300 кГц с интервалом 10–20 кГц, измерить величину выходного сигнала на фиксированных частотах. Результаты измерений свести в таблицу и построить АЧХ. По АЧХ рассчитать полосу пропускания усилителя и добротность колебательного контура.

1.3. Исследовать работу автогенератора в режиме самовозбуждения. Для этого поставить переключатель S_1 в положение 2 и подключить осциллограф к гнездам X_3 . Наблюдать колебания на экране осциллографа, плавно изменяя с помощью ручки положение катушки L_1 относительно катушки L_2 . Переключив тумблер S_3 в левое положение, убедиться в срыве колебаний, происходящих в результате смены знака обратной связи. Тумблер S_3 вернуть в прежнее положение.

1.4. Измерить частоту генерируемых колебаний с помощью осциллографа, используя метод фигур Лиссажу. Для этого поставить ручку переключателя «Синхронизация», находящуюся на передней панели осциллографа, в положение «Вход X», отключив тем самым генератор горизонтальной развертки. На гнезда «Вход X» подать сигнал с выхода генератора. Сигнал с выхода макета (гнезда X_3) подать на вход Y осциллографа.

Отрегулировать усиление каналов X и Y осциллографа таким образом, чтобы на экране образовался светящийся прямоугольник.

Плавно изменяя частоту генератора в диапазоне 180–250 кГц, получить на экране осциллографа медленно вращающийся эллипс. Зафиксировать значение частоты генератора, которая в этом случае равна частоте генерируемых исследуемым автогенератором колебаний.

С помощью переключателя S_2 ввести в цепь обратной связи автогенератора дополнительный фазовый сдвиг и, используя метод фигур Лиссажу, найти величину изменения частоты колебаний автогенератора.

С помощью переключателя S_5 зашунтировать колебательный контур автогенератора сопротивлением R_5 и измерить уход частоты при введении в цепь обратной связи дополнительного фазового сдвига.

1.5. С помощью переключателя S_6 включить в коллекторную цепь транзистора V_1 импульсный модулятор и наблюдать на экране осциллографа изображение генерируемых радиоимпульсов. Исследовать влияние коэффициента обратной связи и добротности контура на форму переднего фронта и среза радиоимпульсов.

Зарисовать полученные осциллограммы.

2. Исследовать RC -генератор.

2.1. При выполнении данной части работы используйте макет с операционными усилителями.

2.2. Получите у лаборанта резисторы и конденсаторы, номиналы которых должны соответствовать вашему варианту.

2.3. Используя полученные элементы, соберите схему автогенератора с мостом Вина (рис. 13.2). В качестве регулируемого сопротивления в цепи обратной связи используйте переменный резистор, расположенный на панели макета.

2.4. После проверки собранной схемы преподавателем подайте на напряжения питания и с помощью осциллографа наблюдайте колебание.

Плавно вращая ручку переменного резистора, получите сигнал гармонической формы. Зарисуйте полученную осциллограмму.

2.5. Измерьте период и вычислите частоту полученных колебаний.

2.6. Определите частоту полученных колебаний методом фигур Лиссажу, используя генератор звуковой частоты.

2.7. Соберите схему автогенератора с трехзвенной фазосдвигающей цепочкой и проверните вышеописанными методами частоту полученных колебаний.

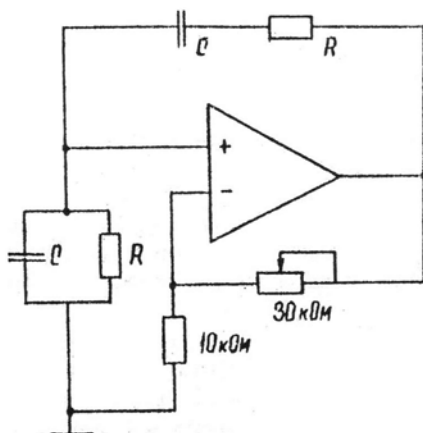


Рис. 13.2. Автогенератор с мостом Вина

Обработка результатов

1. Построить проходную характеристику по результатам измерений, полученным по п. 1.1.
2. Построить амплитудно-частотную характеристику по результатам измерений, полученных по п. 1.2.
3. Привести результаты измерений частоты колебаний C -автогенератора, полученные по п. 1.4. Объяснить полученные результаты.
4. Представить осциллограммы, полученные по п. 1.5, и объяснить их.
5. Привести осциллограмму, полученную по п. 2.5, и объяснить порядок определения частоты колебаний.
6. Привести значение частоты, полученное по п. 2.6, и объяснить причины расхождения значений, полученных по п. 2.5 и 2.6.

Контрольные вопросы

1. Классификация электрических генераторов по форме генерирующих колебаний, амплитуде и частоте.
2. Структурная схема электронного генератора, принцип его работы.
3. Условия самовозбуждения электронного генератора.
4. Избирательные элементы электронных генераторов.
5. LC -генератор с резонансным LC -контуром.

6. Трехточечные индуктивные и емкостные схемы электронных генераторов.

7. Электронный RC -генератор с мостом Вина. Электрическая схема, принцип работы, электрические параметры.

8. Электронный RC -генератор на операционном усилителе с Т-образными RC -звеньями. Принцип работы, электрические параметры.

9. Электронный RC -генератор на операционном усилителе с двойным Т-образным мостом.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткое описание хода работы.
4. Принципиальные электрические схемы исследуемых автогенераторов.
5. Таблицы с экспериментальными данными.
6. Графики исследованных зависимостей.
7. Выводы.

Лабораторная работа № 14

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНОГО МОДУЛЯТОРА И ДЕТЕКТОРА АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: практическое изучение функционирования амплитудных модуляторов и диодных детекторов амплитудно-модулированных сигналов; проведение экспериментальных исследований характеристик модуляторов и детекторов.

Краткие теоретические сведения

Сообщения в электронной технике передаются с помощью высокочастотных модулированных колебаний, навиваемых несущими колебаниями [6, 9, 12].

В качестве несущего высокочастотного колебания обычно используется гармоническое колебание.

$$S(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (14.1)$$

Модуляция – это изменение одного или нескольких параметров высокочастотного колебания (U_m , ω_0 , φ) по закону передаваемого сообщения $C(t)$.

Детектированием или демодуляцией называется операция восстановления передаваемого сообщения из модулированного несущего колебания.

Информация, передаваемая по радиотехническому каналу, обычно заключается в электрическом сигнале, который вырабатывается или микрофоном, или передающей телевизионной камерой, или датчиком. Частота этого сигнала, по сравнению с несущей частотой, значительно ниже, то есть передаваемые сигналы являются низкочастотными.

При амплитудной модуляции (АМ) частота ω_0 и начальная фаза φ несущих колебаний остаются постоянными, а амплитуда U_m изменяется пропорционально изменению модулирующего сигнала $C(t)$.

Рассмотрим случай модуляции несущей частоты сигналом гармонической формы с угловой частотой Ω , амплитудой U_{m0} и начальной фазой, равной нулю:

$$C(t) = U_{m0}\sin\Omega t. \quad (14.2)$$

Мгновенное значение амплитуды модулированных высокочастотных колебаний в этом случае будет определяться выражением

$$U_m(t) = U_m + a_{am}U_{m0}\sin\Omega t, \quad (14.3)$$

где a_{am} – коэффициент пропорциональности.

Подставив полученное значение $U_m(t)$ вместо U_m в выражение (14.1), получим выражение, описывающее амплитудно-модулированный высокочастотный сигнал:

$$S_{AM} = (U_m + a_{am}U_{m0}\sin\Omega t)\sin(\omega_0 t + \varphi). \quad (14.4)$$

Важным параметром АМ колебаний является коэффициент модуляции m , представляющий собой отношение максимального значения приращения огибающей к амплитуде немодулированного высокочастотного сигнала:

$$m = U_{m0} / U_m. \quad (14.5)$$

Используя коэффициент модуляции, выражение (14.5) можно переписать в виде:

$$S_{AM}(t) = U_m(1 + m\sin\Omega t)\sin\omega_0 t. \quad (14.6)$$

Из равенства (14.6) видно, что при $m = 0$ амплитуда высокочастотных колебаний остается постоянной. При $m = 1$ огибающая высокочастотных колебаний изменяется от 0 до $2U_m$.

Рассмотрим схему модулятора с нелинейным элементом, которая использована в лабораторном макете (рис. 14.1).

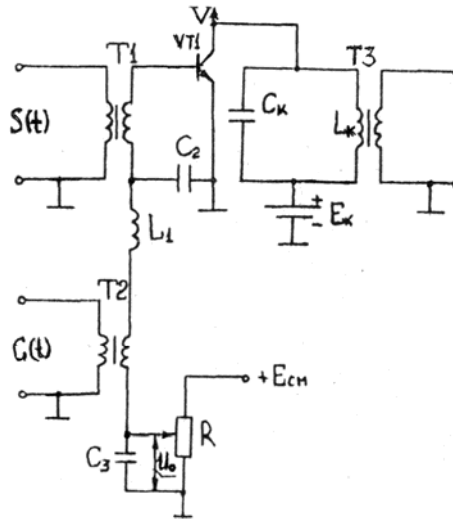


Рис. 14.1. Схема модулятора

Нелинейным элементом в схеме служит транзистор VT_1 . Его нелинейной характеристикой, используемой в рассматриваемой схеме, является проходная характеристика $i_2 = f(U_{63})$. В цепь коллектора транзистора включен колебательный контур $C_k \leftarrow L_k$, имеющий резонансную частоту, равную подводимой к базе транзистора частоте несущих колебаний.

К базе транзистора подводится постоянное напряжение смещения U_0 с резистора R , напряжение несущей частоты $S(t)$ через трансформатор T_1 и модулирующий сигнал низкой частоты $C(t)$ через

трансформатор T_2 . Катушка L_1 и конденсаторы C_1 и C_2 обеспечивают подведение к базе транзистора вышеперечисленных напряжений и исключают влияние источников сигналов друг на друга.

Работа модулятора основана на использовании зависимости средней крутизны транзистора S_{cp} от напряжения смещения $U_{бз}$, которое определяется суммой постоянной составляющей и модулирующего сигнала:

$$U_{бз} = U_0 + e(t). \quad (14.7)$$

Для того, чтобы получить модуляцию без нелинейных искажений, необходимо использовать только квадратичный участок проходной характеристики протяженностью $\Delta U_{бз}$ (рис. 14.2)

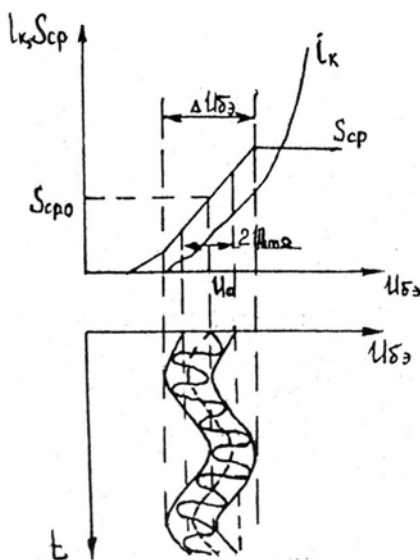


Рис. 14.2. Формирование АМ сигналов

Перейдем к рассмотрению процесса детектирования. Детектирование представляет собой процесс восстановления сигнала модуляции.

Обобщенную схему детектора можно представить в виде двух элементов (рис. 14.3).

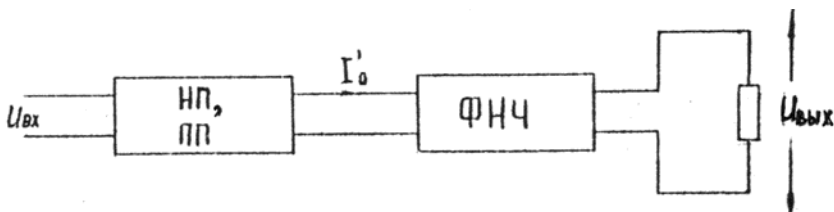


Рис. 14.3. Обобщенная схема детектора:

a – нелинейный преобразователь (НП); *b* – фильтр нижних частот (ФНЧ), исключающий прохождение на выход схемы высокочастотных составляющих

С целью выделения модулирующего сигнала в схеме детектора (рис. 14.4) последовательно с диодом включена цепь RC, у которой

$$1 / \omega_0 C \ll R. \quad (14.8)$$

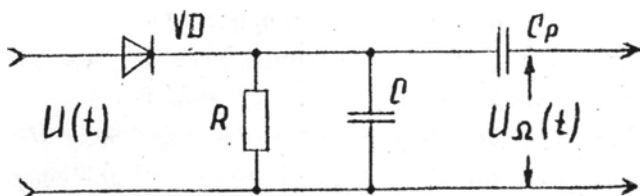


Рис. 14.4. Диодный детектор АМ колебаний

Емкость C выполняет роль фильтра низкой частоты, так как высокочастотная компонента сигнала на выходе схемы в соответствии неравенством (14.6) очень мала.

Величина частотных искажений определяется по частотной характеристике детектора, которая представляет собой зависимость выходного низкочастотного напряжения от частоты модуляции Ω при постоянной величине несущей U_m и постоянном коэффициенте глубины модуляции m .

Описание лабораторного макета и используемые приборы.

Схема лабораторного макета приведена на его передней панели. Она содержит амплитудный модулятор, выполненный на транзисторе VT_1 , и диодный амплитудный детектор, выполненный на диоде VP_3 .

Схема модулятора соответствует схеме, приведенной на рис. 14.3. Задание рабочей точки транзистора VT_1 осуществляется при помощи

потенциометра R_6 . Контроль напряжения смещения осуществляется вольтметром, подключаемым к гнездам pU .

Постоянная составляющая коллекторного тока транзистора VT_1 измеряется при помощи миллиамперметра, подключаемого к гнездам pA .

Выходной сигнал снимается с гнезд X_4 . Его форма может контролироваться с помощью осциллографа, подключаемого к гнездам X_5 .

Форма сигнала, подводимого к базе транзистора VT_1 , может контролироваться с помощью осциллографа, подключаемого к гнездам X_3 .

В схему детектирования входит резонансный усилитель, выполненный на транзисторе VT_2 . Он предназначен для усиления модулированного высокочастотного сигнала, подаваемого на вход детектора. Для подачи сигнала на вход усилителя служат гнезда X_6 .

Постоянная составляющая тока детектора осуществляется с помощью микроамперметра, подключаемого к гнездам $p2A$.

Высокочастотный модулированный сигнал с выхода усилителя на вход детектора поступает при первом положении переключателя S_2 .

В положении 2 переключателя к выходу усилителя подключается переменный резистор R_{10} , используемый при измерении входного сопротивления детектора методом замещения. Величины R и C фильтрующей цепи детектора выбираются при помощи переключателей S_3 , и S_4 соответственно.

Контроль формы сигнала на выходе детектора осуществляется с помощью осциллографа путем подключения его к гнездам X_6 .

Контроль сигнала с отфильтрованной постоянной составляющей осуществляется на гнездах X_9 .

При выполнении работы используются следующие приборы:

- стабилизированный источник питания;
- осциллограф;
- генератор высокой частоты;
- вольтметр;
- мультиметр;
- генератор низкой частоты.

Порядок выполнения работы

1. Подайте на схему напряжение питания $E_{п} = +12$ В. Подключите к гнездам pU вольтметр, а к гнездам pA – миллиамперметр и

снимите зависимость тока коллектора транзистора VT_1 от напряжении на его базе ($i_k = f(U_{бэ})$).

Изменяйте при помощи потенциометра R_6 напряжение. Результаты измерения сведите в таблицу и постройте проходную характеристику транзистора VT_1 .

Выделите на характеристике квадратичный участок, определите его протяженность $\Delta U_{бэ}$ и напряжение U_0 , соответствующее середине квадратичного участка.

Аппроксимируйте квадратичный участок полиномом второй степени

$$i_k = d_0 + dU_{бэ} + d_2U_{бэ}^2.$$

2. Подключите к гнездам X_1 генератор высокой частоты, а к гнездам X_4 – милливольтметр переменного тока.

С помощью потенциометра R_6 установите на базе транзистора VT_1 напряжение смещения, равное U_0 . Подайте с выхода генератора немодулированный сигнал величиной $\frac{\Delta U_{бэ}}{\sqrt{2 \cdot 4}}$.

Изменяя частоту генератора в диапазоне 290–320 кГц и поддерживая на входе величину сигнала неизменной, снимите АЧХ усилителя при двух положениях тумблера S_1 . Результаты измерений сведите в таблицу. По полученным данным постройте АЧХ и определите резонансную частоту f_0 и полосу пропускания $2\Delta f$ для каждого положения переключателя S_1 .

3. Снимите и постройте статическую модуляционную характеристику модулятора $U_{\text{вых}} = fU_{\text{вх}}$. Частота сигнала при этом должна соответствовать частоте f_0 , а его напряжение – величине $\Delta U_{бэ}/2$. По характеристике определите исходное положение рабочей точки транзистора и максимально допустимое значение амплитуды модулирующего сигнала $U_{m\Omega}$.

Подключите низкочастотный генератор к гнездам X_2 и подайте модулирующий сигнал частотой 1000 Гц и амплитудой U_{mct} .

Подключите осциллограф к гнездам X_4 , получите на его экране осциллограмму АМ сигнала и зарисуйте ее.

По осциллограмме определите коэффициент глубины модуляции и сравните его с расчетным значением $m = 2U_{m\Omega}$, где a_1 и a_2 – коэффициенты аппроксимации ВАХ транзистора.

Поочередно подключите осциллограф к гнездам X_3 , X_4 , X_5 , зарисуйте осциллограммы и объясните их.

4. Изменяя напряжение модулирующего сигнала от 0 до 0,5 В, снимите зависимость m от величины сигнала (частота модулирующего сигнала 1000 Гц). Результаты измерений сведите в таблицу. Постройте динамическую характеристику модулятора и определите по ней максимально допустимую величину модулирующего сигнала.

5. Подать АМ сигнал с выхода модулятора (гнезда X_4) на вход усилителя, расположенного перед детектором (гнезда X_6). Переключатели S_3 и S_4 поставить в положение 2. Подключая осциллограф к гнездам X_7 , X_8 , X_9 , зарисовать осциллограммы и объяснить их.

6. Милливольтметр переменного тока подсоединить к гнездам X_7 . Подать на гнезда X_6 модулированный S_4 сигнал напряжением 200–300 мВ и, изменив его частоту в диапазоне 200–300 кГц, снять и построить АЧХ усилителя при трех положениях переключателя S_3 (S_2 – в положении 1, S_4 – в положении 2). Объяснить характеристики.

7. Снять и построить детекторные характеристики $j_0 = f(U_{m\Omega})$ при трех значениях сопротивления нагрузки детектора R_{11} , R_{12} , R_{13} (S_4 – во втором положении, S_2 – в первом).

Величину ВЧ сигнала изменять от 0 до 2 В, контролируя ее на гнездах X_7 с помощью милливольтметра. При этом частота сигнала должна соответствовать резонансной частоте усилителя. Ток I_0 измерять с помощью микроамперметра, подключив его к гнездам p_2A .

8. Поставить переключатели S_3 и S_4 в положение 2. Подать на вход детектора немодулированный ВЧ сигнал величиной 0,1 В. Включить внутреннюю модуляцию генератора и установить ее глубину 80–90 %. Зарисовать осциллограммы на гнездах X_7 и X_8 .

Повторить эксперимент, установив уровень ВЧ сигнала 1,5 В. Сравнить осциллограммы и оценить уровень линейных искажений для обоих случаев.

9. Проконтролировать влияние постоянной времени нагрузки детектора на форму выходного сигнала. С этой целью подать на вход детектора ВЧ сигнал напряжением 1,0–1,5 В, установив глубину модуляции $m = 80$ –90 %.

Подключить к гнездам X_8 осциллограф и зарисовать осциллограммы для трех положений переключателей S_3 и S_4 . Объяснить полученные результаты.

10. Снять и построить частотные характеристики детектора, подключая с помощью переключателей S_3 и S_4 поочередно $R_{12}C_{12}$; $R_{12}C_{13}$; $R_{13}C_{13}$. Для этого генератор ВЧ сигнала перевести в режим внешней модуляции и, подавая на его соответствующий вход сигнал с НЧ генератора, получить на выходе промодулированный сигнал с $m = 70\%$. К гнездам X_9 подключить милливольтметр переменного тока. Изменяя частоту модуляции в пределах от 20 Гц до 20 кГц, задавая частоты ряда согласно ГОСТ, равными (20; 31,5; 50; 80; 125; 200) · 10^N Гц, где $N = 1, 2$, снять зависимость выходного напряжения от частоты модулирующего сигнала. Результаты измерений свести в таблицу и построить частотные характеристики детектора.

Контрольные вопросы

1. Преобразователи частоты. Структурная схема, принцип работы.
2. Модулированные электрические сигналы, их типы и параметры.
3. Амплитудная модуляция. Характеристики и параметры процесса модуляции.
4. Угловая модуляция электрических сигналов. Основные соотношения и параметры угловой модуляции.
5. Амплитудные модуляторы электрических сигналов. Электрическая схема, принцип работы.
6. Частотные модуляторы электрических сигналов, электрическая схема, механизм функционирования.
7. Фазовые модуляторы электрических сигналов.
8. Процессы детектирования электрических сигналов.
9. Амплитудные детекторы электрических сигналов с диодными нелинейными элементами.
10. Транзисторные детекторы амплитудно-модулированных электрических сигналов.
11. Частотные детекторы электрических модулированных сигналов.

ИЗУЧЕНИЕ RC-ЦЕПЕЙ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ

Цель работы: практическое ознакомление с RC-цепями.

Краткие теоретические сведения

Одним из основных применений RC-цепи в импульсных устройствах, схема которой изображена на рис. 15.1, а, является укорочение (дифференцирование) импульсов [3, 6, 9].

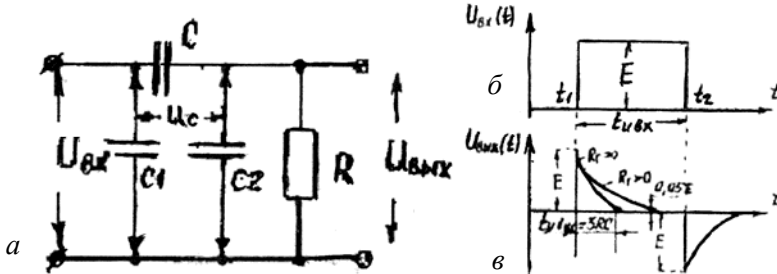


Рис. 15.1. Электрическая схема (а) и временные диаграммы (б, в) дифференцирующей цепи

Если на вход дифференцирующей цепи с постоянной времени $\tau \ll t_{и\text{вх}}$, ($\tau = RC$) подан импульс прямоугольной формы (рис. 15.1, б), то на выходе схемы формируются два импульса остроконечной формы и чередующейся полярности, начала которых совпадают во времени с перепадами входного напряжения; амплитуда выходных импульсов равна величине E перепада входного напряжения, а длительность выходных импульсов $U_{\text{вых}}(t)t_{и\text{вых}} = 3\tau = 3RC$. Форма импульсов, показанная на рис. 15.1, в, возможна при бесконечно малой длительности фронтов перепадов входного напряжения, нулевым сопротивлением генератора и отсутствии паразитных емкостей. Влияние конечной длительности фронта входного импульса сводится к уменьшению амплитуды выходных импульсов, и ею можно пренебречь, если значение $t_{ф\text{вх}} < 0,2RC$.

При наличии паразитных емкостей C_1 и C_2 (емкости генератора и нагрузки) выражение для выходного напряжения при воздействии на вход перепада напряжений величиной E :

$$U_{\text{ВЫХ}} = AE(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (2),$$

где $\tau_1 = R_r(C_1 + C_2)$; $\tau_2 = R_r(C + C_1 + C_2)$;

$$A = 1 / (1 + R_r / R + (C_1 + C_2) / C).$$

Влияние паразитных емкостей сводятся к растягиванию переднего фронта, уменьшению амплитуды и увеличению выходного импульса (рис. 15.1, в). Величина емкости C выбирается значительно больше значений паразитных емкостей C_1 и C_2 .

RC -цепи также можно использовать для расширения импульсов, то есть для получения импульсов с длительностью $t_{u \text{ Вых}} \gg t_{u \text{ ВХ}}$. Такие цепи называют интегрирующими (рис. 15.2, а). Это обусловлено тем, что при $t \leq t_{u \text{ ВХ}}$ выходное напряжение спадает медленно.

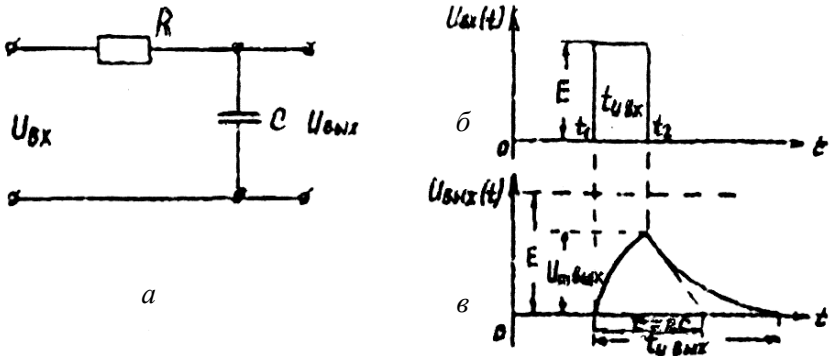


Рис. 15.2. Электрическая схема (а) и временные диаграммы (б, в) интегрирующей цепи

Чем больше постоянная времени цепи по сравнению с $t_{u \text{ ВХ}}$ ($\tau \gg t_{u \text{ ВХ}}$), тем большую длительность имеет импульс на емкости C RC -цепи (рис. 15.2, б, в).

Интегрирующая цепь – это устройство для выполнения операции интегрирования, то есть для получения выходного напряжения

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = 1/\tau \int_0^T U_{\text{ВХ}}(t) dt. \quad \text{Чем больше постоянная времени цепи } \tau,$$

тем точнее RC -цепь выполняет функции интегрирующей. Однако, с увеличением τ уменьшается амплитуда выходных сигналов. Интеграторы применяются для формирования линейно изменяющегося напряжения, селекции импульсов по длительности.

RC -цепи применяются при синтезе фильтров.

Схемы фильтра нижних, верхних частот и полосового фильтра изображены на рис. 15.3.

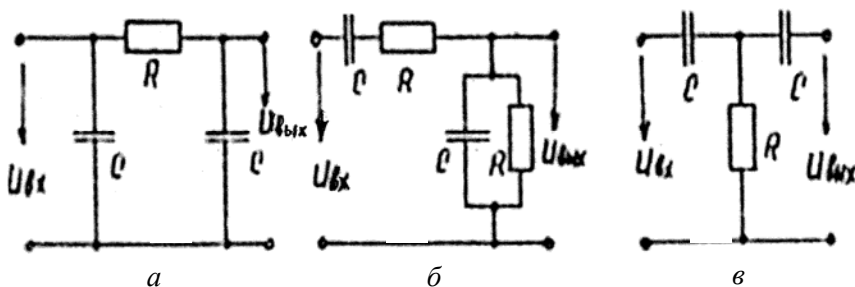


Рис. 15.3. Схемы фильтров нижних частот (а), полосового (б) и верхних частот (в)

Их важнейшими параметрами являются полоса пропускания и амплитудно-частотная характеристика $K_u(\omega)$. В общем случае

$$K_u(\omega) = \frac{Z(\omega)_{\text{ВЫХ}}}{Z(\omega)_{\text{ВХ}}}$$

Для фильтра нижних частот

$$K_u(\omega)_н = \frac{R + 2X_c(\omega)}{R + X_c(\omega)}$$

для полосового фильтра

$$K_u(\omega)_п = \frac{1}{(X_c(\omega) + R)^2 / X_c(\omega) R^{+1}}$$

Для фильтра верхних частот $K_u(\omega)_в$ вычисляется путем замены импедансов звезды импедансами треугольника с последующим вычислением по формуле (15.1).

Волновое сопротивление реальных фильтров зависит от частоты. Поэтому результаты расчета фильтров, выполненных при предположении их согласованности, являются приближенными.

Аппаратура, используемая при выполнении работы. Блок-схема макета изображена на его передней панели. Подключение измерительных приборов и соединение элементов схемы производится при помощи клемм, расположенных на передней панели макета.

В работе используются:

- генератор прямоугольных импульсов Г5-63;
- осциллограф С9-1;
- генератор сигналов низкочастотный ГЗ-109;
- милливольтметр ВЗ-48А;
- источник питания постоянного тока типа АГАТ.

Порядок выполнения работы

1. Собрать интегрирующую RC -цепь, приведенную на рис. 15.4:

- подать на вход схемы с генератора прямоугольные импульсы амплитудой 10 В, длительностью 5 мкс с частотой 1000 Гц;
- измерить с помощью осциллографа постоянную времени цепи путем определения времени спада выходного сигнала до 37 %;
- поменять величину резистора и снова измерить постоянную времени цепи;
- зарисовать осциллограмму.

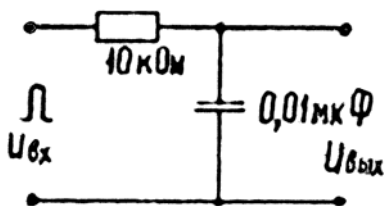


Рис. 15.4. Интегрирующая цепь

2. Собрать дифференцирующую RC -цепь, приведенную на рис. 15.5:

- подать на вход схемы с генератора прямоугольные импульсы амплитудой 10 В, длительностью 10 мкс с частотой 10 кГц;
- зарисовать форму выходного сигнала;

- изменить сопротивление в 5 раз; зарисовать форму выходного сигнала;
- объяснить изменение параметров выходного сигнала.

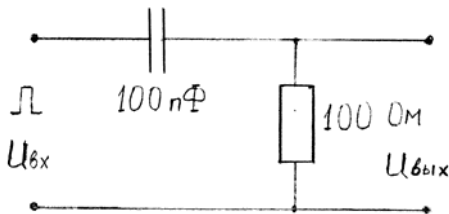


Рис. 15.5. Дифференцирующая RC-цепь

3. Собрать схему фильтра нижних частот, приведенную на рис. 15.6:

- подать на вход схемы синусоидальные колебания от генератора сигналов низкой частоты величиной 2 В и частотой 20 Гц;
- поддерживая величину входного сигнала постоянной, изменять частоту ступенями по 500 Гц и заносить значения выходного сигнала в таблицу до тех пор, пока его величина не станет равной 20 мВ;
- рассчитать, на какой частоте ослабление сигнала равно 3 дБ, учитывая, что отношение сигналов, выраженное в децибелах, равно $20 \lg(U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}})$;
- измерить выходной сигнал при частотах, превышающих частоту, при которой ослабление сигнала составляло 3 дБ, в 2, 10, 20 раз;
- построить график изменения выходного сигнала в зависимости от частоты и найти ослабление фильтра в децибелах на октаву и на декаду.

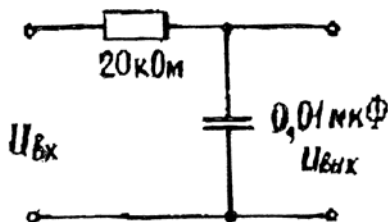


Рис. 15.6. Схема фильтра нижних частот

4. Собрать схему фильтра верхних частот, приведенную на рис. 15.7:
 - рассчитать частоту, на которой сигнал на выходе ослабляется на 3 дБ;
 - подать на вход схемы от генератора сигнал величиной 2 В и частотой 200 кГц;
 - уменьшая частоту, найти ее значение, на котором величина выходного сигнала уменьшается на 3 дБ;
 - измерить выходной сигнал на частотах, меньших частоты, которая соответствует ослаблению 2 дБ, в 2, 10 и 20 раз.

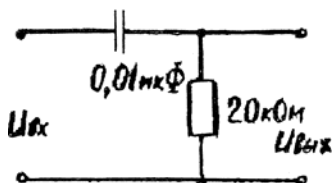


Рис. 15.7. Фильтр верхних частот

5. Собрать схему, приведенную на рис. 15.8:
 - подключить схему к источнику питания (+10 В) и генератору низкой частоты (2 В, 100 кГц);
 - снять с выхода сигнал с помощью осциллографа, используя открытый вход;
 - зарисовать выходной сигнал, обозначив постоянный уровень и сигнал переменного тока.
6. Подсоединить к выходу схемы (рис. 15.8) схему, приведенную на рис. 15.9:
 - определить нижнюю граничную частоту для исследуемой схемы.

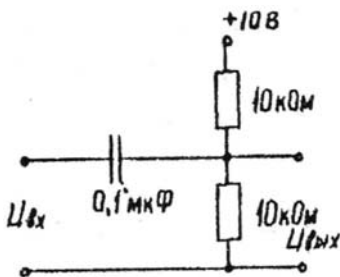


Рис. 15.8. RC-цепь с резистивным делителем

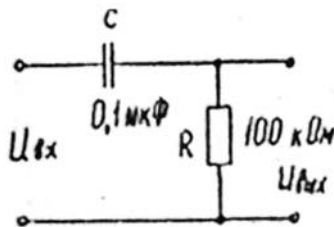


Рис. 15.9. Схема фильтра верхних частот: C – емкость, R – сопротивление

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Исследуемые схемы.
4. Результаты измерений. Осциллограммы.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Область использования RC -цепей в импульсных и логических устройствах.
2. Разделительная RC -цепь. Схема, принцип работы.
3. Укорачивающая (дифференцирующая) RC -цепь. Схема, принцип работы.
4. Расширяющая (интегрирующая) RC -цепь. Схема, принцип работы.
5. Использование электрической RC -цепи в качестве резистивно-емкостного делителя.
6. Избирательные резонансные контуры на RC -элементах.
7. Использование RC -элементов в формирователях импульсных сигналов.
8. Низкочастотные фильтры на RC -элементах.
9. Высокочастотные фильтры на RC -элементах.
10. Полосовые фильтры на RC -элементах. Электрическая схема, принцип функционирования.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ТРИГГЕРЫ

Цель работы: изучение структуры и основных схем включения триггеров.

Краткие теоретические сведения

Триггером называется устройство, имеющие два устойчивых состояния («0» или «1») и способные под действием входного сигнала скачком переходить из одного устойчивого состояния в другое.

Триггеры имеют два выхода: прямой Q и инверсный \bar{Q} . Если триггер имеет состояние «1», то его выход Q равен «1», а выход \bar{Q}

равен «0». Если триггер имеет состояние «0», то его выход Q равен «0», а выход \bar{Q} равен «1».

Асинхронный RS-триггер. Условное обозначение асинхронного RS-триггера (*a*), его схема (*б*) и диаграмма работы (*в*) представлены на рис. 15.10.

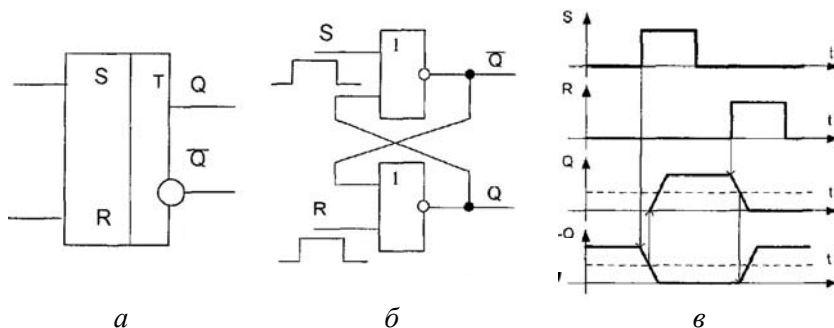


Рис. 15.10. Условное обозначение асинхронного RS-триггера (*a*), схема на логических элементах ИЛИ-НЕ (*б*) и диаграмма работы (*в*)

Из схемы и диаграммы работы RS-триггера видно, что активным сигналом, вызывающим переключение триггера, например, из состояния «1» в состояние «0» является сигнал «1». Таким образом запрещенной комбинацией будет являться комбинация входных сигналов $R = S = 1$.

Работу асинхронного RS-триггера можно описать с помощью таблицы истинности (табл. 15.1).

Таблица 15.1

Q_t	S^1	R^1	Q_{t+1}	
0	0	0	0	Режим хранения «0»
0	0	1	0	Установка в состояние «0»
0	1	0	1	Установка в состояние «1»
0	1	1	–	Запрещенная комбинация
1	0	0	1	Режим хранения «1»
1	0	1	0	Установка в состояние «0»
1	1	0	1	Установка в состояние «1»
1	1	1	–	Запрещенная комбинация

Синхронный CRS-триггер со статическим управлением.
 У синхронных триггеров запись информации происходит под действием разрешающего сигнала синхронизации (рис. 15.11).

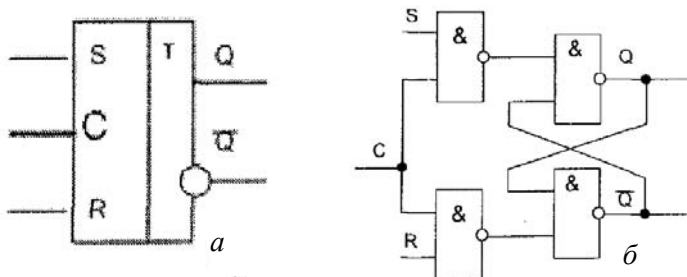


Рис. 15.11. Условное обозначение синхронного CRS-триггера со статическим управлением (а) и его схема на логических элементах И-НЕ (б)

Из схемы CRS-триггера видно, что переключения состояния триггера под действием информационных сигналов R и S происходят тогда, когда на входе C имеется сигнал «1».

Синхронный CRS-триггер с динамическим управлением.
 Синхронные триггеры с динамическим управлением записью принимают только информационные сигналы, которые были на информационных входах к моменту прихода синхроимпульса (рис. 15.12).

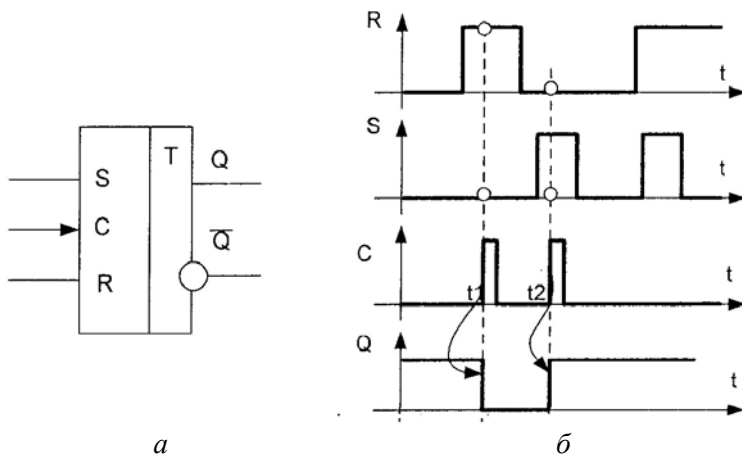


Рис. 15.12. Условное обозначение синхронного CRS-триггера с динамическим управлением (а) и диаграмма работы (б)

Из рис. 15.12 видно, что переключения состояния триггера под действием информационных сигналов R и S происходят тогда, когда на входе C имеется перепад напряжения из «0» в «1».

На рис. 15.13 приведены условные обозначения динамического входа синхронизации триггеров.

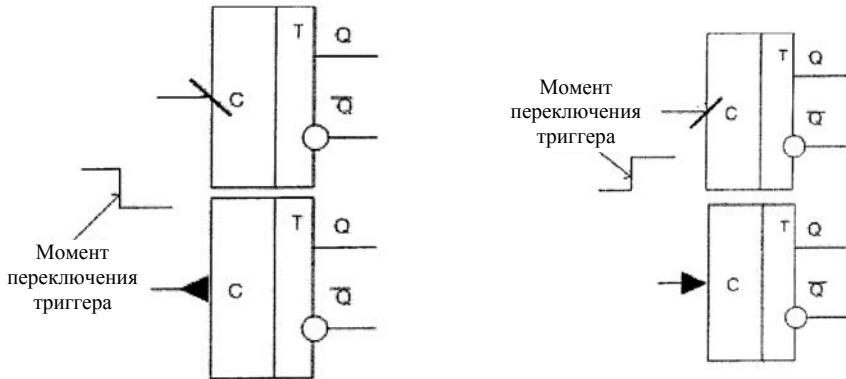


Рис. 15.13. Условные обозначения входа синхронизации триггера с динамическим управлением

Двухступенчатый CRS -триггер. Синхронные двухступенчатые триггеры состоят из двух ступеней (рис. 15.14). Запись информации в первую ступень происходит с появлением синхроимпульса, а во вторую – после окончания.

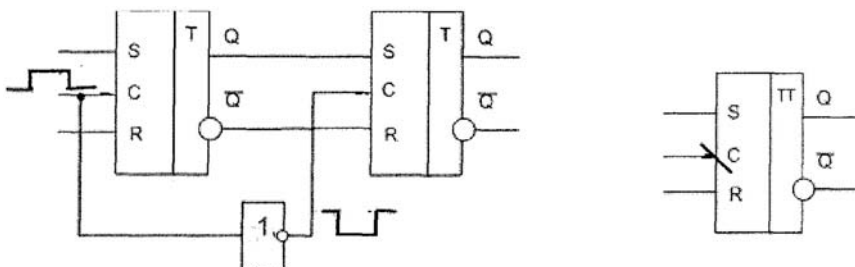


Рис. 15.14. Синхронный двухступенчатый CRS -триггер D -триггер

D -триггер имеет один информационный вход D (вход данных) и один тактовый вход C (рис. 15.15). Триггер переключается (то есть меняет свое состояние) по положительному фронту сигнала C

(по его переходу из нуля в единицу) в зависимости от состояния входа данных D . Если на входе D единичный сигнал, то по фронту сигнала C прямой выход триггера устанавливается в единицу (инверсный – в нуль). Если же на входе D – нулевой сигнал, то по фронту сигнала C прямой выход триггера устанавливается в нуль (инверсный – в единицу).

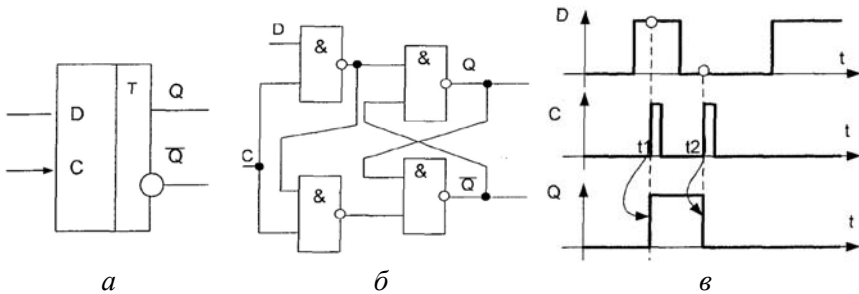


Рис. 15.15. Условное обозначение синхронного D -триггера (a), схема на логических элементах И-НЕ ($б$) и диаграмма работы ($в$)

D -триггер с установочными входами. Условное обозначение такого триггера представлено на рис. 15.16, a , диаграмма его работы на рис. 15.16, $б$.

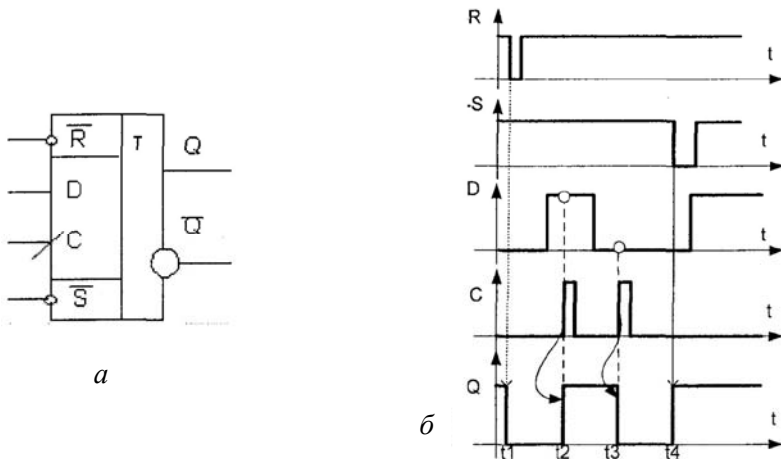


Рис. 15.16. Условное обозначение синхронного D -триггера с установочными входами $\bar{R}\bar{C}$ (a) и диаграмма работы ($б$)

Как следует из диаграммы (см. рис. 15.16, б), в момент t_1 работа триггера определяется установочным сигналом на входе R (логический «0») – триггер перебрасывается в состояние «0».

В момент t_2 работу триггера определяет вход D (логическая «1») и положительный фронт сигнала C (триггер переходит в состояние «1»).

В момент t_3 работу триггера определяет вход D (логический «0») и положительный фронт сигнала C (триггер переходит в состояние «0»).

В момент t_4 работу триггера определяет установочный вход \bar{S} , который обеспечивает его переключение в состояние «1».

Следует отметить, что согласно схмотехнической организации триггера с установочными входами при одновременном действии сигналов на один из установочных входов, состояние триггера определяет установочный вход. На установочные входы $\bar{R}\bar{C}$ активные сигналы ($\bar{R} = 0$ и $\bar{S} = 0$) не могут быть поданы одновременно (согласно схеме $\bar{R}\bar{C}$ -триггера это запрещенная комбинация).

T -триггер. T -триггер имеет только один счетный вход T . Условное обозначение T -триггера приведено на рис. 15.17, а, его схема – на рис. 15.17, б, диаграмма работы – на рис. 15.17, в.

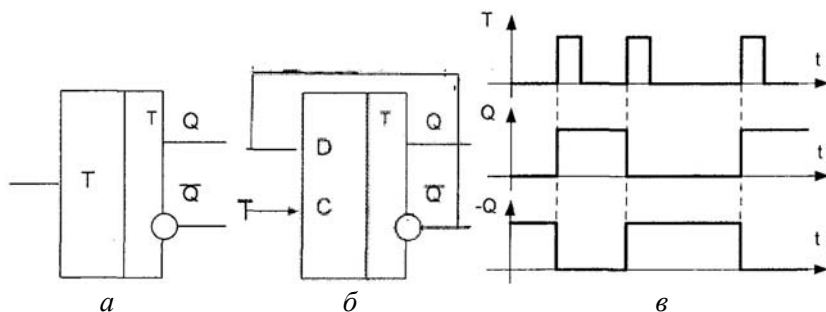


Рис. 15.17. Условное обозначение T -триггера (а), его схема на D -триггере (б) и диаграмма работы (в)

С приходом каждого активного сигнала триггер меняет свое состояние на противоположное тому, в котором он находится.

JK -триггер. JK -триггер является универсальным триггером, на основании которого возможно реализовать RS -триггер, D -триггер, T -триггер.

JK-триггер функционирует подобно *RS*-триггеру с той лишь разницей, что не имеет запрещенной комбинации входных сигналов (рис. 15.18).

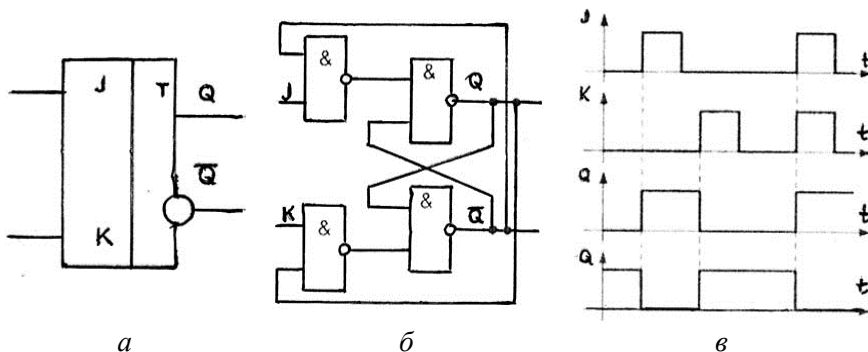


Рис. 15.18. Условное обозначение асинхронного *JK*-триггера (а), его схема (б) и диаграмма работы (в)

Вход *J*-триггера (аналогично входу *S*) является входом установки триггера в единичное состояние по прямому выходу *Q*.

Вход *S*-триггера (аналогично входу *R*) является входом установки триггера в нулевое состояние по прямому выходу *Q*.

Если на входы *J* и *K* действует активный сигнал «1», то триггер изменяет свое состояние на противоположное тому, в котором он находился до действия сигналов, иначе говоря, работает в счетном режиме.

Условное обозначение асинхронного *JK*-триггера (а), его схема (б) и диаграмма работы (в) представлены на рис. 15.18.

Работу асинхронного *JK*-триггера можно описать табл. 15.2.

Таблица 15.2

Таблица истинности

Q_t	J	K	Q_{t+1}	
0	0	0	0	Режим хранения «0»
0	0	1	0	Установка в состояние «0»
0	1	0	1	Установка в состояние «1»
0	1	1	1	Счетный режим, триггер переходит из состояния «0» в состояние «1»

Q_t	J	K	Q_{t+1}	
1	0	0	1	Режим хранения «1»
1	0	1	0	Установка в состояние «0»
1	1	0	1	Установка в состояние «1»
1	1	1	0	Счетный режим, триггер переходит из состояния «1» в состояние «0»

На рис. 15.19 показаны схемы D - и T -триггеров на основе JK -триггера.

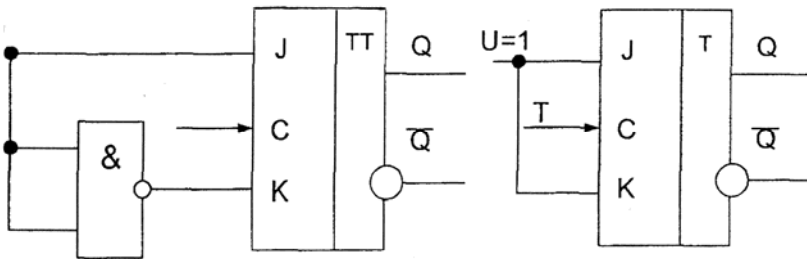


Рис. 15.19. Схемы D - и T -триггеров на основе JK -триггера

Порядок выполнения лабораторной работы

Получить у преподавателя номера вариантов из заданий. Выполнить преобразования, представить схемы для проверки преподавателем и получить его разрешение на макетирование.

Порядок работы с лабораторным макетом

1. Ознакомьтесь с лабораторным макетом.
2. Присоедините стенд к источнику питания +5 В.
3. Соберите на лабораторном макете асинхронный RS -триггер на логических элементах ИЛИ–НЕ, исследуйте его работу согласно таблице истинности. Нарисуйте диаграмму работы.
4. Соберите на лабораторном макете синхронный RS -триггер на логических элементах И–НЕ, исследуйте его работу согласно таблице истинности. Нарисуйте диаграмму работы.

5. Исследуйте работу D -триггера с установочными входами. Определите, по какому фронту срабатывает триггер.

6. Преобразуйте триггер D в триггер T . Исследуйте его работу.

7. Исследуйте работу JK -триггера с установочными входами. Определите, по какому фронту срабатывает триггер.

8. Преобразуйте триггер JK в триггер T . Исследуйте его работу.

При сборке схемы на лабораторном макете для контроля истинности используйте светодиоды.

Входные сигналы (уровень логического 0 или 1) подводите от соответствующих клемм макета.

Контрольные вопросы

1. Что такое триггер? Какие входы и выходы имеет триггер?

2. Какие бывают триггеры по способу записи?

3. Какой триггер называется синхронным?

4. Какой триггер называется двухступенчатым?

5. Нарисуйте условно-графическое обозначение и таблицу истинности RS -триггера. Какая комбинация сигналов является запрещенной?

6. Нарисуйте схему синхронного RS -триггера на элементах ИЛИ–НЕ. Объясните его работу с помощью диаграммы.

7. Нарисуйте условно-графическое обозначение и таблицу истинности JK -триггера.

8. Нарисуйте схему синхронного D -триггера и таблицу его истинности.

9. Нарисуйте схему синхронного T -триггера и таблицу его истинности.

Содержание отчета

В отчете должны быть приведены:

1. Название работы.

2. Цель работы.

3. Ответы на вопросы заданий.

4. Схемы триггеров, таблицы истинности, диаграммы работы.

5. Выводы.

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И РАБОТЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ТАЙМЕРОВ

Цель работы: изучение интегральных таймеров и схем формирования точных интервалов времени.

Краткие теоретические сведения

Интегральные таймеры позволяют создавать микроэлектронные формирователи точных интервалов времени длительностью от микросекунд до часов [3, 6, 12].

В современной микроэлектронной аппаратуре наиболее распространена полупроводниковая микросерия 555, отечественным аналогом которой является ИМС КР1106ВИ1. Рассмотрим устройство и принцип работы этой ИМС, функциональная схема которой приведена на рис. 16.1.

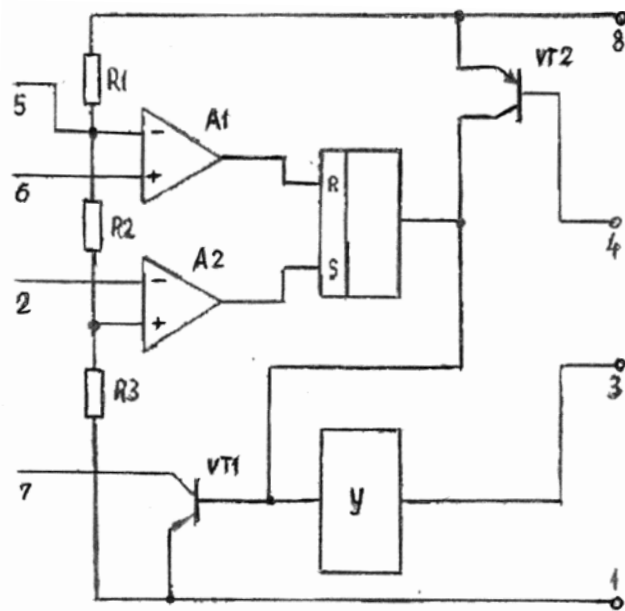


Рис. 16.1. Функциональная схема ИМС КР1106ВИ1

Таймер КР1106ВИ1 содержит четыре функциональных узла; два компаратора напряжения на входе (A_1 и A_2). *RS*-триггер и инвертирующий усилитель мощности $У$ на выходе.

Внутренний резисторный делитель задает пороговые напряжения, равные $2E_n/3$ (для компаратора A_1) и $E_n/3$ (для компаратора A_2). Длительности поддержания на выходе ИМС высокого или низкого уровня напряжения устанавливаются внешней времязадающей цепью *RC*.

Напряжение питания E_n подается на вывод 8 и может быть в пределах 5–16,5 В (вывод 1 – общий).

Таймер способен отдать в нагрузку или принять из нее ток до 200 мА, что позволяет управлять непосредственно лампочками и даже электромагнитным реле.

Выходное сопротивление составляет около 10 Ом как для низкого ($U \sim 0,1$ В), так и для высокого ($U_1 = U_n - 0,5$ В) уровней выходного напряжения. Таймер запускается подачей на вывод 2 напряжения менее $E_n/3$. По отношению к выходу этот вход является инвертирующим. При высоком напряжении на выводе 2 состоянием выхода таймера можно управлять с помощью компаратора A_1 по выводу 6, обычно называемому пороговым входом. Относительно изменений выходного напряжения этот вывод является неинвертирующим входом таймера.

Входной ток, втекающий для компаратора A_1 (вывод 6) и вытекающий для компаратора A_2 (вывод 2), не превышает 0,5 мкА. Для сброса таймера, то есть для установления на его выходе низкого напряжения, независимо от напряжения на выводах 2 и 6, используется вывод 4. Если напряжение на этом выводе $U_4 < 0,4$ В, напряжение на выходе равно 0,1–0,2 В. При напряжении $U_4 > 1$ В цепь сброса выключена и не влияет на работу таймера.

Кроме низкоомного выхода (вывод 3), таймер имеет вспомогательный высокоомный выход (вывод 7), представляющий собой открытый коллектор транзистора VT_1 . Этот вывод обычно используется для организации обратной связи с выхода на входы (выводы 2 и 6) таймера. Допустимое изменение напряжения на выводах 2, 4, 6 и 7 лежит в пределах 0–16,5 В.

В таймере имеется доступ через вывод 5 к входам внутренних компараторов, на которые поданы пороговые напряжения. Этот вывод от резисторного делителя позволяет дополнительно управлять

работой таймера, изменяя пороговые напряжения компараторов при постоянном напряжении питания.

Период колебаний определяется выражением

$$T = t_1 + t_2 = 0,695(R_A + 2R_B)C, \quad (16.1)$$

где t_1 , t_2 – длительность импульса и паузы,
а частота

$$f = 1 / T = 1,44 / (R_A + 2R_B)C. \quad (16.2)$$

Аппаратура, используемая при выполнении работы. К соответствующим клеммам, согласно электрической схеме, изображенной на передней панели, с внутренней стороны панели припаяна интегральная микросхема КР1106ВИ1.

В работе используются следующие приборы:

- стабилизированный источник питания Б5-48;
- осциллограф С9-1;
- вольтметр цифровой В7-27;
- вольтметр переменного тока ВЗ-48А;
- генератор импульсный Г5-63.

Порядок выполнения работы

1. Исследование генератора прямоугольных импульсов.

1.1. Соберите схему генератора прямоугольных импульсов согласно рис. 16.2.

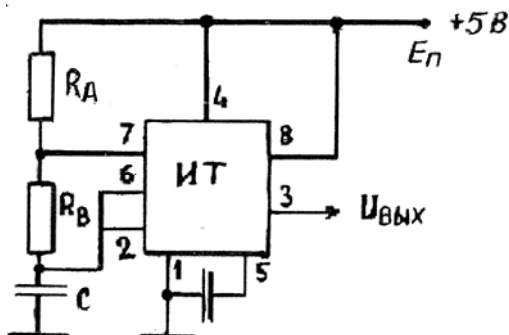


Рис. 16.2. Схема генератора:

C – емкость; R_A , R_B – сопротивления; ИТ – микросхема интегрального таймера

В качестве навесных компонентов R_A , R_B , C используйте элемент, изображенный на рис. 16.3.

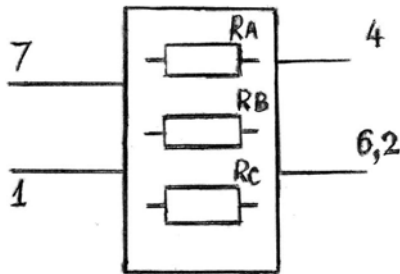


Рис. 16.3. Навесной элемент:
 R_A , R_B – сопротивление; C – емкость; 1 – общий

1.2. Снимите осциллограммы на выходе схемы и на времязадающем конденсаторе C . Зарисуйте их.

1.3. Определите длительность генерируемых импульсов, их частоту, скважность.

1.4. Определите уровни напряжений на конденсаторе.

2. Исследование ждущего мультивибратора.

2.1. Соберите схему ждущего мультивибратора согласно рис. 16.4.

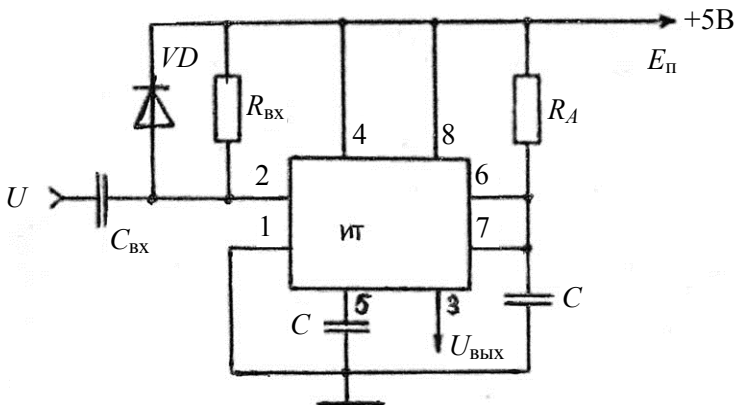


Рис. 16.4. Схема ждущего мультивибратора:
 C_{BX} , C – емкости; VD – диод; R_{BX} , R_A – сопротивления

В качестве навесных компонентов используйте элемент, изображенный на рис. 16.5.

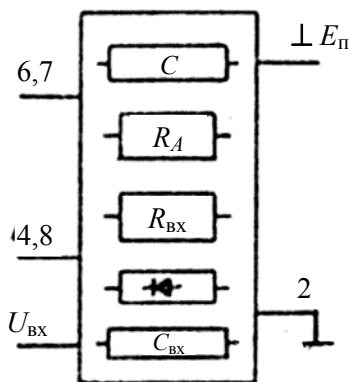


Рис. 16.5. Навесной элемент:

$C, C_{\text{вх}}$ – емкость; $R, R_{\text{вх}}$ – сопротивление; $E_{\text{п}}$ – клемма подключения источника питания; $U_{\text{вх}}$ – клемма подключения входного напряжения

2.2. Подключите к выходу схемы генератор импульсов. Подавая на вход импульсы отрицательной полярности 6–7 В, получите осциллограммы на входе, выходе схемы и времязадающем конденсаторе.

Зарисуйте осциллограммы и определите длительность импульсов.

Контрольные вопросы

1. Логические элементы СПЭ. Классификация ЛЭ. Логические элементы типа И, ИЛИ, НЕ.
2. Базовы логические элементы И–НЕ, ИЛИ–НЕ. Параметры логических элементов.
3. Элемент сравнения на логических приборах.
4. Ждущий мультивибратор. Электрическая схема, принцип работы.
5. Генератор прямоугольных импульсов на логических элементах.
6. D-триггер задержки импульсных сигналов. Схема, принцип работы, параметры.
7. Формирователь временных интервалов на логических элементах. Структурная схема, принцип работы.

8. Функциональная схема интегрального таймера. Принцип работы таймера.

9. Методы формирования временных интервалов.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Исследуемые схемы.
5. Осциллограммы и результата.
6. Выводы.

3. УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Лабораторная работа № 17

ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, ТОКОВ И СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цель работы: изучить методы измерения постоянных и переменных напряжений и токов, а также сопротивлений, получить практические навыки работы с современными цифровыми и аналоговыми приборами.

Краткие теоретические сведения

Измерения напряжения и токов в электронных схемах имеют существенные отличия от измерений в электротехнических цепях, что обусловливается специфическими особенностями электронных цепей и используемых в них электрических сигналов:

- измерение тока и напряжения в электронных схемах проводят в диапазоне от постоянного тока до сверхвысоких частот (1–2 КГц),
- диапазон измеряемых напряжений и токов весьма велик – от долей микровольта и наноампера до десятков киловольт и сотен ампер;
- форма измеряемых сигналов может быть самой различной;
- мощность источника сигнала может быть весьма небольшой.

Для измерений токов и напряжений отечественная промышленность выпускает большую номенклатуру приборов, причем весьма распространенными являются универсальные приборы, позволяющие проводить измерения в цепях постоянного и переменного токов широкого диапазона частот [13, 14].

Выбор прибора для проведения измерения определяется совокупностью факторов, важнейшими из которых являются: род измеряемого тона, частотный диапазон и амплитудное значение измеряемой величины, форма измеряемого напряжения или тока, требуемая точность измерения.

Для измерения тока и напряжения используется метод непосредственной оценки и метод сравнения. При использовании метода непосредственной оценки применяются аналоговые и цифровые амперметры и вольтметры.

При измерениях тока амперметр включается в цепь последовательно, то есть в разрыв цепи, а при измерении напряжения вольтметр включается параллельно исследуемой цепи, без нарушения схемы соединений (рис. 17.1).

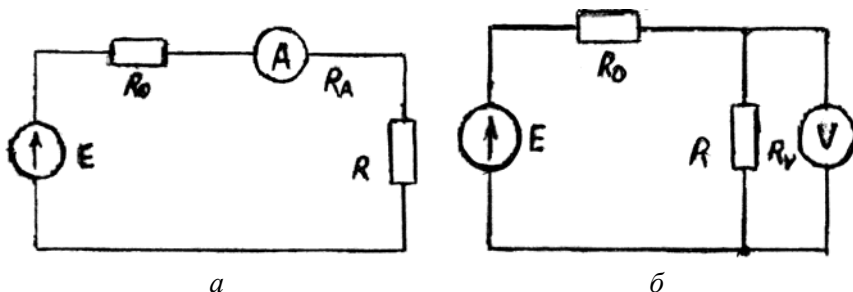


Рис. 17.1. Измерение тока (а) и напряжения (б) методом непосредственной оценки

Так как включение измерительного прибора в цепь вызывает определенное изменение режима цепи, то для сведения к минимуму этого влияния внутреннее сопротивление амперметра R_A должно быть много меньше сопротивления цепи R , а внутреннее сопротивление вольтметра R_V должно быть много больше сопротивления того участка цепи, напряжение на котором измеряется.

Метод сравнения основан на компенсации измеряемого напряжения. При измерениях этим методом мощность от измеряемой цепи не потребляется. Этот метод обеспечивает высокую точность измерений и реализуется с помощью специальных схем компенсации.

Измерение напряжений. В электронных и радиотехнических устройствах напряжение измеряют в основном электронными вольтметрами, которые классифицируются по ряду признаков:

1. *По виду измеряемого напряжения:* вольтметры постоянного тока (B_2), переменного тока (B_3), импульсного тока (B_4), фазочувствительные (B_5), селективные (B_6), универсальные (B_7).

2. *По типу отсчетного устройства:* аналоговые (стрелочные) и цифровые.

3. *По методу измерения:* непосредственной оценки (метод прямого сравнения с мерой) и компенсационный (нулевой).

4. *По значению измеряемого напряжения:* пиковые (амплитудные), среднеквадратического и средневыпрямленного значений.

5. По частотному диапазону: низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные, широкодиапазонные.

При измерении напряжения вольтметр подключается параллельно участку цепи, на котором измеряется напряжение (см. рис. 17.1). При этом возникает методическая погрешность, обуславливаемая протеканием некоторого дополнительного тока через подключенный вольтметр. Так, при измерении постоянного напряжения на сопротивлении в цепи с источником энергии, ЭДС которого E и внутреннее сопротивление R_0 , величина относительной погрешности определяется выражением

$$\delta_m = \frac{U_x - U}{U} = \frac{\frac{R}{R_x}}{1 + \frac{R}{R_x} + \frac{R}{R_0}}, \quad (17.1)$$

где U – действительное значение напряжения на сопротивлении R до подключения вольтметра;

U_x – измеренное значение напряжения на сопротивлении R .

При измерении переменных напряжений на результаты измерений влияет и входная емкость вольтметра C_v .

Таким образом, как это следует из выражения (17.1), для уменьшения методической погрешности измерения входное сопротивление вольтметра должно быть много больше сопротивления того участка цепи, на котором изменяется напряжение. При измерении переменных напряжений, кроме того, необходимо применять вольтметры с небольшой входной емкостью.

Измерение токов. Диапазон токов, измеряемых в науке и технике, лежит от значений 10^{-17} А до десятков и сотен тысяч ампер. Поэтому методы и средства измерения токов весьма различны.

При включении амперметра, имеющего внутреннее сопротивление R_A в цепь с источником ЭДС E и сопротивлением R (где R есть суммарное сопротивление источника и нагрузки) общее сопротивление цепи возрастает, что ведет к уменьшению тока, протекающего в цепи, и, следовательно, к погрешности измерения.

Относительная погрешность измерения тока определяется выражением

$$\gamma_j = \frac{I_k - I}{I} = \frac{\frac{R_A}{R}}{1 + \frac{R_A}{R}}, \quad (17.2)$$

где I – значение тока в цепи до включения амперметра;

I_x – измеряемое значение тока.

Измерение постоянного тока может выполняться с помощью электромеханических амперметров, магнитоэлектрических, электромагнитных, электродинамических систем, а также с помощью аналоговых и цифровых электронных амперметров и цифровых мультиметров.

При измерении малых токов величиной 10^{-9} – 10^{-6} А используются высокочувствительные магнитоэлектрические зеркальные гальванометры и гальванометрические компенсаторы. При необходимости измерения токов величиной менее 10^{-10} – 10^{-9} А используются косвенные методы измерения тока с помощью образцовых резисторов, заключаемых в разрыв цепи, и высокочувствительных измерителей напряжения.

Величина тока

$$I_x = \frac{U_0}{R_0},$$

где U_0 – падение напряжения на образцовом резисторе R_0 .

При измерении переменных токов значительной величины на частотах 50–1000 Гц, как правило, применяются электромеханические амперметры электромагнитной и электродинамической системы.

Переменные токи измеряют в цепях небольшой мощности осуществляют выпрямительными, термоэлектрическими, электронными цифровыми амперметрами, аналоговыми и цифровыми электронными вольтметрами и мультиметрами на резисторах с известным сопротивлением. При измерениях токов повышенной и высокой частоты на точность измерения существенно влияют паразитные емкости.

При измерении токов высокой частоты преимущественно используются термоэлектрические амперметры. Такие приборы содержат термоэлектрический преобразователь, представляющий собой нагреватель и связанную с ним термопару. При протекании через нагреватель измеряемого тока выделяется тепло, нагревающее горячий

спай термопары, холодные концы которой подключены к магнитоэлектрическому прибору. Шкалы термоэлектрических приборов проградуированы в среднеквадратических значениях тока. Поэтому термоэлектрические приборы могут быть использованы для измерения как постоянных, так и переменных токов в диапазоне частот 50 Гц – 200 МГц. Термоэлектрические приборы пригодны и для измерения несинусоидальных токов, так как их показания не зависят от формы кривой тока.

Измерение сопротивлений. Непосредственное измерение сопротивлений наиболее просто осуществляется методом амперметра-вольтметра. Этот метод заключается в измерении тока или напряжения, функционально связанных с измеряемым сопротивлением. Метод амперметра-вольтметра используется в омметрах – приборах, измеряющих сопротивление на постоянном токе.

Для измерения средних и больших сопротивлений (10^3 Ом и выше) используют последовательные схемы омметров, а для измерения малых сопротивлений – параллельные схемы.

Последовательная схема омметра (рис. 17.2) содержит последовательно соединенные: источник постоянного напряжения U , в качестве которого обычно используются гальванические элементы, индикатор I магнитоэлектрической системы с внутренним сопротивлением R_H дополнительное сопротивление $R_{доп}$. Измеряемое сопротивление R_x включают последовательно с индикатором.

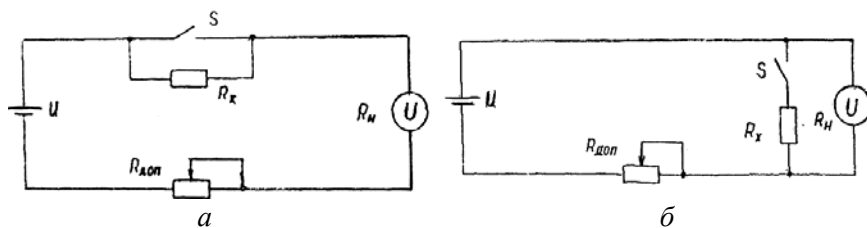


Рис. 17.2. Схемы омметров:
а – последовательная; б – параллельная

Дополнительное сопротивление подбирают с таким расчетом, чтобы при $R_x = 0$, то есть при замкнутом ключе S , через индикатор протекал ток полного отклонения стрелки индикатора:

$$I = U / R_M + R_{доп}. \quad (17.3)$$

При разомкнутом ключе ток в цепи

$$I = U / R_m + R_{\text{доп}} + R_H. \quad (17.4)$$

Разница в показаниях индикатора при замкнутом и разомкнутом ключе K равна разнице между величинами $R_{\text{доп}}$ и $R_x + R_{\text{доп}}$, так как U – величина постоянная. Обычно нулевое деление на шкале индикатора соответствует положению стрелки при разомкнутом ключе. При замыкании ключа стрелка отклоняется на угол, соответствующий значению измеряемого сопротивления. У последовательных омметров нуль размещается в правой части шкалы, а верхний предел измерения – в левой.

Параллельная схема омметра (рис. 17.2, б) отличается от последовательной только способом включения измеряемого сопротивления, которое подсоединяется параллельно индикатору. Дополнительное сопротивление подбирают так, чтобы при разомкнутом ключе S' через индикатор протекал ток, равный току полного отклонения. При замкнутом ключе измеряемое сопротивление шунтирует индикатор, и ток через него уменьшается. По изменению тока судят о величине измеряемого сопротивления.

При параллельном включении нулевое деление на шкале индикатора соответствует положению стрелки при замкнутом ключе. Характер шкалы здесь тот же, что и у последовательных омметров, но шкала получается прямой: нуль размещается в левой части шкалы, а верхний предел измерений – в правой части.

Основная характеристика, омметра – входное сопротивление $R_{\text{вх}}$, которое определяет пределы измеряемых сопротивлений.

Цифровые комбинированные приборы. Комбинированные цифровые приборы измеряют постоянное и переменное напряжение, силу постоянного и переменного тока, величину сопротивления. Универсальные приборы часто называют мультиметрами. Они представляют собой сочетание цифрового вольтметра постоянного тока и высокоточных измерительных преобразователей. Преобразователи, как правило, содержатся во входном блоке структурной схемы. При измерении постоянного и переменного тока, сопротивления, переменного напряжения их величины преобразуются в пропорциональное напряжение постоянного тока. В свою очередь напряжение постоянного тока преобразуется аналогоцифровым пре-

образователем в цифровой код, соответствующий величине измеряемого параметра. Цифровой код поступает на дешифратор, который преобразует его в код, соответствующий цифровому индикатору, используемому в приборе.

Значение измеряемого параметра отображается индикатором в цифровой форме.

Аппаратура, используемая при выполнении работы. Схема передней панели лабораторного макета приведена на рис. 17.3. Она состоит из трех частей. На рис. 17.3, *а* изображена схема, позволяющая исследовать влияние входного сопротивления вольтметра на точность измерения постоянных напряжений. Она содержит гнезда для подключения источника питания X_1 и контроля входного напряжения X_2 , набор резисторов R_1-R_{14} , переключатель S_1 , гнезда для подключения приборов к выходу схемы X_3, X_4 . Нечетные сопротивления R_1-R_{13} имитируют внутреннее сопротивление исследуемой цепи R . В макете сопротивления делителей выбраны равными: $R_{0i} = R_i$, то есть $R_1 = R_2, R_3 = R_4$ и т. д.

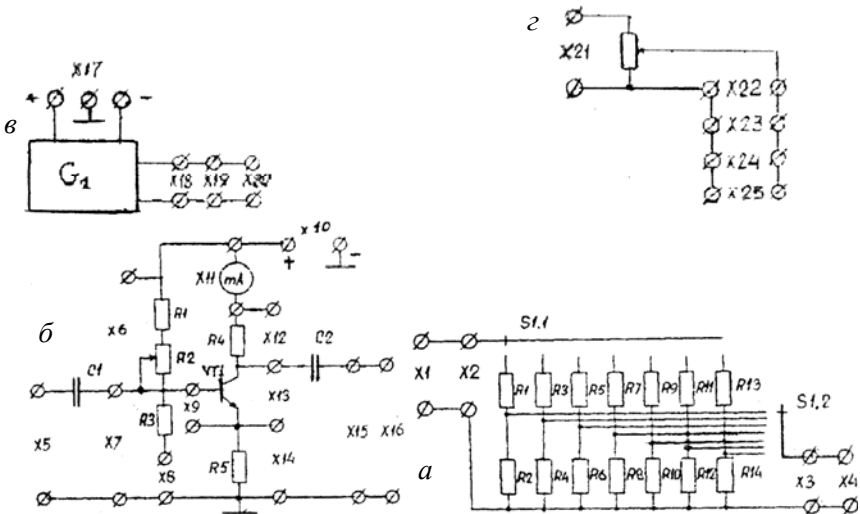


Рис. 17.3. Схема передней панели лабораторного стенда

На рис. 17.3, *б* представлена принципиальная схема усилителя. Она содержит транзистор VT_1 , резисторы R_2-R_5 , конденсаторы C_1, C_2 .

C_2 , гнезда X_5 – X_{16} . К гнездам X_{10} подключается источник питания, а к гнездам X_8 может быть подключен источник отрицательного смещения, или же резистор R_3 может быть соединен с общей шиной. С помощью переменного резистора R_2 задается напряжение смещения на базу транзистора VT_1 , определяющее режим работы транзистора и отсутствие входного сигнала. Величина тока коллектора контролируется с помощью подключаемого к гнездам X_{11} миллиамперметра постоянного тока.

Схема, изображенная на рис. 17.3, в, предназначена для исследования зависимости показаний вольтметров от формы измеряемого напряжения. Она содержит автогенератор C_1 -импульсов прямоугольной формы с симметричными полупериодами положительной и отрицательной полярности (меандр). Ниже автогенератора расположена схема, содержащая гнезда X_{21} – X_{25} и переменный резистор (рис. 17, з). Она служит для подключения внешнего генератора (гнезда X_{21}) и подсоединения измерительных приборов (гнезда X_{22} – X_{25}).

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с техническими описаниями приборов В7-27, В7-26, В3-38, 4323А.

2. Исследовать влияние входных сопротивлений универсального цифрового вольтметра В7-27, комбинированных приборов В7-26, 4323А на точность измерения постоянного напряжения. Исследования проводить в следующей последовательности:

2.1. Подготовить перечисленные приборы к проведению измерений согласно руководствам и инструкциям по эксплуатации этих приборов.

2.2. Подключить вольтметр В7-27 к гнездам макета X_3 и с его помощью измерить внутренние сопротивления R_0 , устанавливая последовательно переключатель S_1 в положения 1–7 (измерения проводить согласно п. 10.1.5 инструкции по эксплуатации вольтметра В7-27); результаты измерений зафиксировать в табл. 17.1.

2.3. Подключить источник питания к гнездам X_1 макета, переключить вольтметр В7-27 с выхода макета на вход (гнезда X_2), установив перед этим переключатель рода работ и пределов измерения вольтметра в положение для измерения напряжения, и включить источник питания.

2.4. Проконтролировать на выходе источника требуемое значение напряжения E_n (12, 10, 8 или 5 В), после чего вольтметр В7-27 снова переключить на выход макета (гнезда X_3).

2.5. Измерить с помощью вольтметра В7-27 выходные напряжения макета U_x при положениях 1–7 переключателя S_1 (измерения проводить согласно п. 10.2.2 инструкции по эксплуатации вольтметра В7-27); результаты измерений занести в табл. 19.1.

2.6. Подключить прибор 4323А к выходу макета и повторить измерения; результаты измерений занести в таблицу произвольной формы.

2.7. Подключить прибор 4323А к выходу макета и повторить измерения; результаты измерений занести в таблицу произвольной формы.

2.8. Подключить прибор В7-26 к выходу макета и повторить измерения; результаты занести в табл. 17.1.

2.9. Рассчитать погрешность метода по формуле

$$\delta_M = (U_x - U) / U,$$

где U – действительное значение напряжения на сопротивлении R до подключения вольтметра, которое определяется как:

$$U = K \cdot U_{\text{вх}},$$

где $K = 0,5$ для приборов В7-27, 4323А, В7-26.

2.10. Найти инструментальные погрешности δ_n приборов В7-27, 4323А, В7-26.

2.11. Исключить из результатов измерений U_x погрешность метода с помощью поправки:

$$U = U_x - \eta_n,$$

где $\eta_n = \delta_n U_x / 100 + \delta_n$.

Результаты расчетов занести в табл. 17.1.

3. Снять амплитудно-частотную характеристику приборов В7-27, 4323А, В3-38В. Измерения проводить в следующей последовательности:

3.1. Подготовить к проведению измерений приборы В7-27, 4323А, В3-38 и генератор синусоидальных сигналов (согласно инструкции по эксплуатации).

3.2. Установить по шкале генератора частоту 50 Гц, напряжение на выходе 12, 10, 8 или 5 В, подключить к выходу генератора вольтметр В7-27, измерить установленное значение напряжения и занести результаты измерения в таблицу произвольной формы.

3.3. Перестраивая генератор, повторить измерения на других частотах.

3.4. Подключить к выходу прибор 4323А и повторить измерения, результаты занести в таблицу произвольной формы.

3.5. Подключить к выходу прибор ВЗ-38А и повторить измерения, результаты занести в таблицу произвольной формы.

3.6. По результатам измерений построить график $U_x = f(F)$ и определить по ним частоты, начиная с которых погрешность измерения, рассчитанная по формуле (17.1), превышает основную погрешность измерения, указанную в технических характеристиках приборов В7-27, 4323А, ВЗ-38А.

4. Исследовать зависимость показаний вольтметров ВЗ-13, В7-26, В4-14 от формы измеряемого напряжения. Исследования проводить в следующей последовательности:

4.1. Подготовить к проведению измерений приборы ВЗ-36, В7-26, В4-14, импульсный генератор, осциллограф С1-57 (согласно инструкции по эксплуатации).

4.2. Подключить к клеммам макета X_{17} от двух источников питания напряжения +15 и -15 В в соответствии с обозначением клемм согласно рис. 17.4.

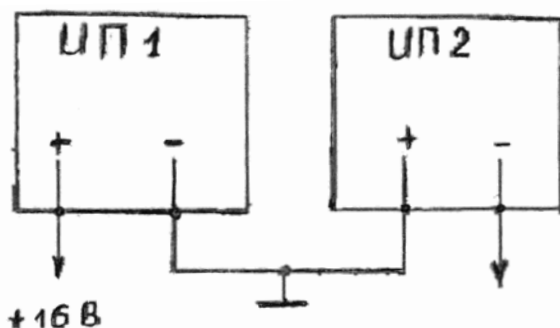


Рис. 17.4. Схема подключения макета от двух источников питания:
ИП1, ИП2 – источники питания

4.3. Получить на экране осциллографа устойчивое изображение исследуемого напряжения, замерить его размах и зарисовать форму, результаты занести в таблицу произвольной формы.

4.4. Подсоединить вышеперечисленные приборы к клеммам X_{23} – X_{25} , к клеммам X_{22} подсоединить выход импульсного генератора.

4.5. Подавая импульсы различной амплитуды, длительности и меняя частоту их следования, снять показания подсоединенных вольтметров; для каждого измерения форму напряжения и его амплитуду контролировать с помощью осциллографа.

4.6. Результаты занести в таблицу произвольной формы.

Контрольные вопросы

1. Виды средств измерений, методы измерений.
2. Систематические погрешности измерений электрических величин.
3. Случайные погрешности измерений электрических величин.
4. Основные характеристики измерительных приборов.
5. Аналоговые электроизмерительные приборы.
6. Электронные аналоговые приборы.
7. Цифровые измерительные приборы.
8. Методы измерения постоянных напряжений и токов. Погрешности измерений.
9. Измерение переменных напряжений и переменных токов.
10. Измерение мощности в электрических цепях постоянного и переменного тока.
11. Измерение низкоомных и высокоомных сопротивлений.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Исследуемые схемы.
5. Осциллограммы и результаты.
6. Выводы.

ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: изучение методов осциллографических измерений, а также отечественных осциллографов, и приобретение практических навыков работы с ними.

Краткие теоретические сведения

Принципы построения электронных осциллографов. Электронный осциллограф представляет собой сложный прибор, позволяющий наблюдать, измерять и записывать изменяющиеся во времени электрические процессы [6, 15].

Основным назначением осциллографа является наблюдение и исследование формы как периодических, так и непериодических сигналов, а также случайных и одноразовых процессов. Осциллографы широко распространены в самых различных областях инженерной и научной деятельности.

Сегодня существует большое разнообразие схем конструкций осциллографов. Все электронные осциллографы строятся по единому принципу и содержат одинаковые функциональные узлы. Обобщенная структурная схема электронного осциллографа представлена на рис. 18.1. Его основными функциональными узлами являются: электронно-лучевая трубка, канал вертикального отклонения, канал горизонтального отклонения, канал измерительных устройств и источники питания (на структурной схеме не показаны).

В осциллографе в основном используется электронно-лучевая трубка с электростатическим управлением луча. Под действием управляющих напряжений, которые подаются на две пары отклоняющихся пластин, электронный луч может отклоняться в двух взаимно перпендикулярных направлениях (горизонтальном и вертикальном). Для отклонения луча на пластины необходимо подавать исследуемое и развертывающее напряжение.

Параметры электрического сигнала измеряются с помощью канала измерительных устройств, который имеет в своем составе калибраторы амплитуды и длительности.

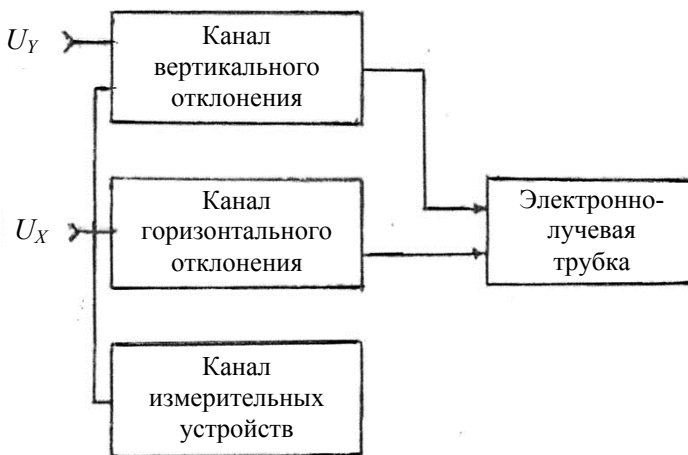


Рис. 18.1. Структурная схема электронного осциллографа

Все осциллографы характеризуются следующими основными техническими данными: размером экрана, чувствительностью каналов, максимальным напряжением исследуемого сигнала, полосой пропускания каналов, входным сопротивлением, входной емкостью, видами разверток, погрешностью измерения временных интервалов.

Осциллографы делятся на универсальные, скоростные, стробоскопические, запоминающие и специальные. Они могут быть однолучевыми или многолучевыми. Многолучевые осциллографы позволяют одновременно получать изображения нескольких сигналов.

Техника осциллографических измерений. Правильный выбор осциллографа во многом определяет качество проводимых измерений или эксперимента. Технические характеристики осциллографа должны соответствовать целям и задачам эксперимента и основным характеристикам исследуемых сигналов.

Прежде всего выбор осциллографа зависит от спектра частот сигнала. Современные осциллографы допускают неискаженное воспроизведение сигнала частотой до сотен и тысяч мегагерц. Полоса пропускания осциллографа определяется частотной характеристикой усилителя вертикального отклонения. Необходимая полоса пропускания при исследовании прямоугольного импульса длительностью t_u вычисляется из соотношения

$$\Delta f = 2 / t_u.$$

Верхняя граничная частота полосы пропускания определяется по формуле

$$F_{\text{в}} = 0,4 / t_{\text{ф}},$$

где $t_{\text{ф}}$ – длительность фронта импульса.

Указанными расчетными соотношениями необходимо руководствоваться при выборе осциллографа.

Импульсы с очень крутыми фронтами лучше подавать непосредственно на пластины. При этом устраняется влияние ограниченной полосы пропускания усилителя и входной емкости осциллографа. При исследовании импульсного сигнала осциллограф должен работать в режиме ждущей развертки и скорость ее должна быть высокой, чтобы импульс малой длительности можно было развернуть на значительную часть экрана.

С учетом амплитуды исследуемого сигнала и для полного использования экрана выбирают чувствительность осциллографа. При исследовании сигналов с большими амплитудами следует пользоваться делителями или подавать сигнал непосредственно на отклоняющие пластины.

Непрерывные сигналы не очень высоких частот подводятся ко входу осциллографа с помощью обычных проводов, а импульсные сигналы и напряжения высоких частот – с помощью коаксиальных кабелей.

Приборы, используемые при выполнении работы:

- осциллограф С9-1;
- генератор сигналов низкочастотный ГЗ-109;
- генератор сигналов высокочастотный Г4-158;
- генератор прямоугольных импульсов Г5-63;
- вольтметр В7-27.

Порядок выполнения работы

1. Измерить чувствительность осциллографа по каналу X при максимальном усилении усилителей:

1.1. Подготовить к работе приборы С9-1 и ГЗ-109.

1.2. Переключатель рода работ блока развертки осциллографа установить в положение «Вход X ».

1.3. На вход X блока развертки подать сигнал частотой 1000 Гц с выхода генератора ГЗ-109, установив среднеквадратичное значение выходного напряжения в диапазоне от 0,9 до 5 В.

1.4. Измерить отклонение луча A_x (в мм) на экране осциллографа.

1.5. Определить чувствительность осциллографа по каналу X по формуле

$$H_x = \frac{A_x}{\sqrt[2]{2U_{\text{ВХ}}}}, \text{ мм/В.}$$

1.6. Рассчитать коэффициент усиления усилителя по формуле

$$K_x = \frac{H_x}{h_x},$$

где h_x – чувствительность электронно-лучевой трубки по пластинам $X = 2,4$ В/мм.

2. Измерение чувствительности осциллографа по каналу Y при максимальном усилении усилителей:

2.1. Переключатель «Умн. X_1, X_{10} » поставить в положение 1 .

2.2. Потенциометр «Вольт/дел» плавно повернуть по часовой стрелке до упора.

2.3. Подать на закрытый вход канала Y сигнал частотой 5000 Гц с генератора Г5-109, установив среднеквадратичное значение выходного напряжения в диапазоне от 3 до 4,6 В.

2.4. Измерить отклонение луча (в мм) на экране осциллографа.

2.5. Определить чувствительность по каналу Y по формуле

$$H_y = \frac{A_y}{\sqrt[2]{2U_{\text{ВХ}}}}, \text{ мм/В.}$$

2.6. Рассчитать коэффициент усиления усилителя Y по формуле

$$K_y = \frac{H_y}{h_y},$$

где h_y – чувствительность электронно-лучевой трубки по пластинам $Y = 1,67$ В/мм.

3. Оценка погрешности измерения амплитуды напряжения осциллографом С9-1. Оценку производить путем измерения с помощью поверяемого осциллографа калиброванной амплитуды напряжения:

3.1. Подать синусоидальное напряжение от генератора на вход канала вертикального отклонения, установив частоту в диапазоне от 20 до 300 кГц;

3.2. Амплитуду подаваемого напряжения U_k установить последовательно такой, чтобы получить наименьший и наибольший размах изображения, при котором гарантируется точность измерения (I и 8 делений).

3.3. Измерить размах изображения (двойная амплитуда) и определить амплитуду напряжения U_m , которая равна половине напряжения размаха.

3.4. Одновременно измерять вольтметром среднеквадратичное значение подаваемого напряжения U_k , определять его амплитудное значение U_m по осциллографу.

3.5. Рассчитать погрешность измерения в процентах:

$$\delta = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \frac{U_k - U_m}{U_k} \cdot 100 \%,$$

где U_k – подаваемое напряжение;

U_m – амплитудное напряжение, измеренное по осциллографу.

4. Снятие амплитудно-частотной характеристики канала вертикального отклонения луча:

4.1. Переключатель «Умн. X_1, X_{10} » поставить в положение I .

4.2. Потенциометр «Вольт/дел» плавно повернуть по часовой стрелке до упора.

4.3. Устанавливая последовательно на выходе генератора сигналы с частотами от 1 кГц до 35 мГц, измерить отклонение луча l по вертикали на экране осциллографа, результаты свести в таблицу.

4.4. Определить неравномерность частотной характеристики канала Y :

$$P = \frac{20 \lg l}{l_f},$$

где l_f – отклонение луча на $F = 100$ кГц.

4.5. Построить график $P = f(F)$.

5. Наблюдение формы и измерение параметров выходных прямоугольных импульсов генератора Г5-65 (амплитуды, длительности):

5.1. Откалибровать усилитель Y осциллографа согласно техническому описанию.

5.2. Установить на выходе генератора сигнал, задавшись произвольными значениями длительности импульсов (мкс), частотой следования (кГц), временной задержкой (мкс) полярностью, напряжением (В).

5.3. Подать этот сигнал на закрытый вход осциллографа.

5.4. На вход синхронизации блока развертки подать синхроимпульсы с соответствующего выхода генератора, установив напряжение синхронизации 2 В, а полярность синхроимпульсов – соответствующую полярности входного сигнала.

5.5. Измерить параметры поданного на вход осциллографа импульса.

5.6. Повторить измерения для трех сигналов.

5.7. Занести результаты в таблицу.

5.8. Оценить погрешность измерений и сравнить с погрешностями установки параметров импульсов по техническим характеристикам Г5-63.

Контрольные вопросы

1. Основные типы осциллографов: светолучевые, электронно-лучевые.

2. Характеристики и параметры осциллографов.

3. Электронно-лучевые осциллографы. Электронно-лучевая трубка осциллографа.

4. Структурная схема осциллографа. Принцип работы канала вертикального отклонения.

5. Назначение и принцип работы канала горизонтального канала X на канале Z .

6. Техника осциллографических измерений.

7. Осциллографические измерения синусоидальных и импульсных сигналов.

8. Универсальные, скоростные, запоминающие осциллографы.

9. Электронные осциллографы с цифровой обработкой сигнала.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
4. Таблицы экспериментальных данных.
5. Выводы.

Лабораторная работа № 19

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Цель работы: изучение принципов построения измерительных генераторов. Приобретение практических навыков работы с измерительными генераторами.

Краткие теоретические сведения

Получение сигналов с заданными параметрами обеспечивает измерительный генератор – источник электрических сигналов, частота, напряжение (мощность), спектральный состав или степень модуляции сигнала которого может регулироваться в некоторых пределах и устанавливаться (или отсчитываться) с гарантированной для данного прибора точностью [3, 9, 13, 16].

С помощью измерительных генераторов можно снимать амплитудные, амплитудно-частотные и переходные характеристики четырехполосников (например, усилителей), определять их коэффициенты передачи, настраивать радиоприемники, телевизоры, радиопередатчики и т. д.

Независимо от вида генерируемых колебаний, назначения и диапазона рабочих частот все измерительные генераторы формируются по обобщенной структурной схеме (рис. 19.1).

Задающий генератор является основным узлом измерительного генератора.

Для обеспечения точности установки частоты и высокой стабильности элементы схемы задающего генератора экранируются.

Промежуточное устройство служит для придания сигналу требуемой формы, а также для повышения его энергетического уровня.

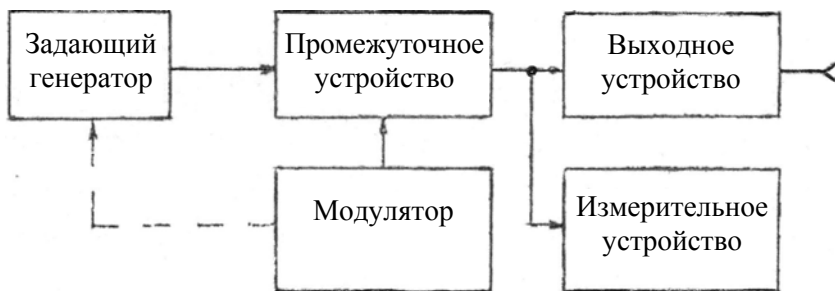


Рис. 19.1. Обобщенная структурная схема измерительного генератора

Выходное устройство предназначено для установки требуемого уровня выходного сигнала и согласования выхода генератора с нагрузкой.

Модулятор применяется для осуществления одного или нескольких видов модуляции и представляет собой автогенератор, работающий обычно на фиксированных частотах.

Измерительные устройства обеспечивают определение параметров выходных колебаний. Обычно измеряется уровень выходного сигнала (напряжение или мощность) и параметры модуляции.

Основной эксплуатационной характеристикой генератора является диапазон перекрываемых им частот $f_{\min}-f_{\max}$.

Частота измерительных генераторов, как правило, регулируется двумя ступенями: переключением и плавно. Часть частотного диапазона, в которой частота сигнала устанавливается плавно, называется поддиапазоном.

Перекрытие поддиапазонов обеспечивает непрерывность регулировки частоты во всем диапазоне.

Регулировка амплитуды выходного сигнала производится в широких пределах и осуществляется двумя ступенями: изменением опорного уровня сигнала $U_{\text{оп}}$ (величина выходного сигнала при нулевом ослаблении в тракте) и изменением величины ослабления, вводимого в тракт выходного сигнала после установки опорного уровня.

Пределы изменения выходного сигнала $U_{\max}-U_{\min}$ или $P_{\min}-P_{\max}$ определяются обычно диапазоном величины ослабления аттенюатора, которая выражается формулой:

$$A = 20 \lg \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \quad \text{или} \quad A = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}}.$$

К основным эксплуатационным характеристикам генератора относится также значение его выходного сопротивления (импеданс).

Основные рекомендации по применению измерительных генераторов.

Работа с измерительным генератором включает четыре основных этапа: подготовку к работе, соединение с объектом, согласование с объектом и установку заданных значений параметров выходных сигналов.

Подготовка к работе

Прежде чем включить генератор в сети, надо проверить работу всех органов управления и механически откорректировать положение стрелок встроенных измерительных приборов, проверить исправность элементов присоединения, наличие штатных кабелей и вспомогательных принадлежностей. Перед включением надо убедиться, что условия применения прибора (климатические и другие) соответствуют требованиям инструкции по эксплуатации, генератор не подвергается тряске и вибрациям, воздействию сильных магнитных и электрических полей, а также в том, что он удобно расположен на рабочем месте.

После этого все органы управления приводятся в исходные положения и генератор может быть включен в сеть. Надо обратить особое внимание на то, чтобы установленный уровень выходного сигнала был минимальным, а неиспользуемые выходы генератора были закрыты заглушками или отключены. Генератор должен быть прогрет в течение времени, указанного в инструкции по эксплуатации.

Соединение с объектом. Для присоединения генератора к объекту надо пользоваться штатными кабелями со стандартными элементами присоединения. Соединять генератор с объектом можно только тогда, когда во входных цепях объекта нет источников постоянного напряжения с малым внутренним сопротивлением. Соединительные кабели предварительно целесообразно проверить для выявления скрытых обрывов.

Согласование с объектом. Для обеспечения лучших условий согласования выхода измерительного генератора со входом объекта по мощности необходимо добиться равенства выходного и входного сопротивлений.

Если выходные устройства генератора не позволяют выполнить согласование, необходимо применить внешние согласующие устройства. В тех случаях, когда генератор работает на малую нагрузку (велико входное сопротивление объекта), рекомендуется включать внутреннюю нагрузку.

При подключении измерительного генератора к резонансным цепям следует помнить, что небольшое выходное сопротивление генератора может шунтировать контур и значительно снизить его добротность. В таких случаях соединение с объектом должно осуществляться через конденсатор небольшой емкости.

Установка заданных значений параметров выходных сигналов.

Установка значений параметров выходных сигналов начинается с установки частоты генератора. При этом обязательно надо пользоваться нониусными устройствами, шкалами «Расстройка» и т. п.

После установки частоты производится контроль или установка уровня выходного сигнала. В этом случае все органы управления должны быть поставлены в положения, указанные в инструкции по эксплуатации. Затем с помощью аттенуаторов, выносных штатных делителей и т. п. устанавливается заданное напряжение или мощность на выходе.

В генераторах модулированных колебаний при необходимости могут быть установлены соответствующие параметры модуляции.

В процессе работы рекомендуется периодически контролировать уровень колебаний.

Классификация измерительных генераторов. По виду выходного сигнала различают следующие измерительные генераторы: синусоидальных колебаний, синусоидальных модулированных колебаний, импульсные, сигналов специальной формы, качающейся частоты, шумов.

По диапазону частот генераторы синусоидальных колебаний подразделяют на низкочастотные (20 Гц–200 кГц), высокочастотные (30 кГц–30 МГц), сверхвысокочастотные с коаксиальным выходом (30 МГц–10 ГГц) и сверхвысокочастотные с волноводным выходом (выше 10 ГГц). К низкочастотным генераторам, как правило, относят генераторы инфранизких частот (0,01–100 Гц).

По виду модуляции различают генераторы с амплитудной синусоидальной модуляцией, частотной синусоидальной модуляцией, импульсной модуляцией (амплитудной манипуляцией), частотной

манипуляцией, фазовой манипуляцией, несколькими видами манипуляции и комбинированной модуляцией (с одновременным наложением двух или более видов модуляции).

Импульсные измерительные генераторы принято классифицировать по числу каналов, характеру последовательности импульсов и основной погрешности установки значений параметров импульсов.

Основными параметрами импульсных генераторов являются амплитуда, длительность, частота следования (период следования) импульсов и их временной сдвиг.

Низкочастотные измерительные генераторы. Низкочастотные генераторы сигналов представляют собой источники синусоидальных немодулированных колебаний.

Диапазоны частот различных типов генераторов могут изменяться в широких пределах: от сотых долей герца до сотен килогерц. Обычно для отдельного генератора коэффициент перекрытия по частоте составляет в среднем 10^4 . Частота колебаний может устанавливаться плавно или дискретно. Точность установки частоты определяется классом прибора.

ГОСТ 10501-74 разделяет генераторы на классы точности по частотным параметрам (F -параметрам) и параметрам выходного напряжения (U -параметрам). За индекс класса принимается значение основной погрешности установки частоты и опорного уровня выходного напряжения в процентах. Так, обозначение класса точности F_2U_x показывает, что генератор имеет основную погрешность по частоте 2 % и основную погрешность установки опорного уровня выходного напряжения – 4 %. Установлено шесть классов по точности отсчета частоты: F_{01} , F_{05} , F_1 , $F_{1.5}$, F_2 , F_3 и пять классов по точности отсчета уровня выходного сигнала: U_1 , U_2 , $U_{2.5}$, U_4 , U_6 .

Остальные параметры генератора: нестабильность частоты, коэффициент гармоник, погрешность ослабления аттенюатора, дополнительные погрешности частоты и амплитуды.

Низкочастотные генераторы сигналов строятся в соответствии с общей структурной схемой измерительных генераторов.

По назначению и способу построения низкочастотные генераторы подразделяются на три большие группы: RC -генераторы, генераторы с непрерывным перекрытием диапазона (на биениях) и генераторы с диапазонно-кварцевой стабилизацией частоты (ДКС).

В качестве измерительных устройств в генераторах применяются вольтметры. Для упрощения схемы вольтметра он включается на выходе промежуточного устройства перед аттенюаторами (рис. 19.2). Вольтметр собирается по схеме преобразователя средневых значений и градуируется в действующих значениях синусоидального напряжения. Конечные значения рабочей части шкалы у вольтметров измерительных генераторов устанавливаются $1 \cdot 10^n$ и $3,16 \cdot 10^n$ (n – любое целое положительное или отрицательное число или ноль).



Рис. 19.2. Схема включения электронного вольтметра в тракт генератора низкой частоты

Высокочастотные измерительные генераторы. К высокочастотным измерительным генераторам относят обширную номенклатуру источников модулированных электрических колебаний, которые работают в диапазоне частот от 30 кГц до 17,44 ГГц. Ширина частотного диапазона обуславливает различие схемных и конструктивных решений, а также их метрологических характеристик. Вследствие этого высокочастотные измерительные генераторы подразделяют по частоте на следующие группы:

- генераторы с частотой колебаний от 30 кГц до 300 МГц;
- генераторы с коаксиальным выходом с частотой колебаний выше 0,3 ГГц;
- генераторы с волноводным выходом с частотой колебаний до 17,44 ГГц.

Номинальное значение выходного сопротивления высокочастотного генератора при работе на согласованную нагрузку обычно со-

ставляет 50 Ом. Все измерительные высокочастотные генераторы строятся на основе обобщенной структурной схемы.

Импульсные генераторы. Импульсные генераторы, представляющие собой источник импульсных сигналов различных форм, применяются при исследованиях, испытаниях и регулировке электронных систем. Они используются в качестве задающих генераторов в импульсных схемах, служат для модуляции маломощных генераторов, применяются при работе с оптическими квантовыми генераторами.



Рис. 19.3. Структурная схема импульсного генератора

Импульсные измерительные генераторы (рис. 19.3) позволяют создавать как одиночные импульсы, так и их последовательности с частотами повторения до десятков мегагерц, длительностями импульсов от 0,1 нс до 1 с и амплитудами от единиц милливольт до десятков тысяч вольт. Точность воспроизведения основных параметров импульсов варьируется в широких пределах и может составлять от 0,01 до 20 %.

Приборы, используемые при выполнении работы:

- осциллограф С9-1;
- генератор сигналов низкой частоты ГЗ-109;
- генератор импульсный Г5-63;
- частотомер электронно-счетный 13-33;
- вольтметр В3-38;
- измеритель нелинейных искажений С6-1А;
- импульсный вольтметр В4-14.

Порядок выполнения работы

1. Проверка метрологических характеристик генератора ГЗ-109.
Погрешность установки частоты:

1.1. Определить погрешность установки частоты по шкале частот в трех точках каждого поддиапазона: 20, 60, 140; 200, 600, 1400; $20 \cdot 10^2$, $60 \cdot 10^2$, $140 \cdot 10^2$; $20 \cdot 10^3$, $60 \cdot 10^3$, $140 \cdot 10^3$.

1.2. С помощью электронно-счетного частотомера 43-33 дважды (при подходе к измеряемому значению частоты справа и слева).

1.3. За действительное значение частоты генератора принять среднее арифметическое двух отсчетов по электронно-счетному частотомеру.

1.4. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности установки частоты генератора.

1.5. Результаты измерений свести в таблицу.

Погрешности установки выходного напряжения:

1.6. Определить погрешность установки выходного напряжения с помощью встроенного вольтметра методом смещения по показаниям образцового вольтметра ВЗ-38 при включенной внутренней нагрузке; погрешность определить в трех отметках каждой шкалы прибора на одной из частот каждого из приведенных выше поддиапазонов.

1.7. Погрешность выходного напряжения определить дважды (при подходе к проверяемой отметке справа и слева).

1.8. Определить результат измерений как среднее арифметическое двух измерений.

1.9. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности; результаты измерений свести в таблицу.

Коэффициент нелинейных искажений выходного сигнала:

1.10. Подготовить к работе измеритель нелинейных искажений.

1.11. Измерить нелинейные искажения при номинальной мощности и включенной внутренней нагрузке не менее чем на трех частотах каждого поддиапазона.

2. Проверка метрологических характеристик генератора Г5-63.

Погрешность установки частоты следования импульсов:

2.1. Подготовить к работе приборы Г5-63, 43-33; С9-1.

2.2. Определить погрешность установки частоты следования импульсов в трех точках любого из диапазонов согласно табл. 19.1.

Таблица 19.1

№ для показаний	1	2	3	4

2.3. Амплитуду и длительность импульсов выбрать произвольно; поверку производить с помощью частотомера 43-33.

2.4. Определить абсолютную и относительную погрешности.

Погрешность установки длительности импульсов: длительность выходных импульсов определить в трех точках любого диапазона согласно табл. 19.2.

Таблица 19.2

№ для показаний	1	2	3	4

2.5. Выбрать частоту следования произвольно, амплитуду выставить равной 5 В.

2.6. Определить длительность импульсов с помощью осциллографа.

2.7. По результатам измерений вычислить абсолютную и относительную погрешности.

Длительность фронта и спад импульсов:

2.8. Длительность фронта и спад импульсов определить между уровнями 0,1 и 0,9 амплитуды импульса при помощи осциллографа С9-1.

2.9. Измерения проводить для импульсов, имеющих длительность в вашем диапазоне (см. табл. 19.2).

3. Погрешность установки амплитуды выходных импульсов:

3.1. Измерить амплитуду для импульсов с длительностью согласно табл. 19.2.

3.2. Величину амплитуды устанавливать равной 1, 5, 10 В. Измерение провести с помощью вольтметра ВЗ-38 и осциллографа С9-1 как положительных, так и отрицательных импульсов.

3.3. По результатам измерений определить абсолютную и относительную погрешности.

4. Задержка выходных импульсов относительно импульсов для синхронизации внешних устройств:

4.1. Определить временной сдвиг между импульсом синхронизации и выходным импульсом при помощи осциллографа С9-1.

4.2. Синхронизирующие импульсы подать на первый вход осциллографа, а основные выходные – на второй, отсчет вести между серединами фронтов импульсов; полярность и амплитуду выбрать любыми.

4.3. Измерения выполнить в трех точках диапазона задержки; определить абсолютную и относительную погрешности.

Контрольные вопросы

1. Назначение и разновидности измерительных генераторов.
2. Структурная схема измерительного генератора. Задающий генератор.
3. Характеристики и параметры измерительного генератора.
4. Низкочастотные измерительные генераторы. Структурная схема, принцип работы.
5. Высокочастотные измерительные генераторы. Структурная схема, принцип работы.
6. Измерительные генераторы СВЧ. Структурная схема, принцип работы.
7. Импульсные измерительные генераторы. Структурная схема, принцип работы.
8. Использование измерительных генераторов для определения основных электрических параметров в четырехполюсниках и многополюсниках.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Таблицы с экспериментальными данными.
5. Выводы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вербицкий, Н. В. Лабораторные работы (практикум) по разделу «Радиоизмерения» курса «Радиотехника и радиоэлектроника» для студентов специальностей 06.29, 06.43 / Н. В. Вербицкий. – Минск : БПИ, 1987.
2. Епифанов, Г. И. Твердотельная электроника / Г. И. Епифанов, Ю. А. Мома. – М. : Высш. школа, 1966.
3. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника / Ю. С. Забродин. – М. : Высш. школа, 1982.
4. Маллер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Маллер, Т. Кеймикс. – М. : Мир, 1989.
5. Полупроводниковые приборы : справочник / В. И. Галкин [и др.]. – Минск : Беларусь, 1987.
6. Жеребцов, И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. – Л. : Энергоатомиздат, 1989.
7. Антошин, А. А. Инструкция к выполнению лабораторной работы «Исследование статистических характеристик МДП-транзисторов» по дисциплине «Физика полупроводниковых приборов» / А. А. Антошин.
8. Турчин, В. Г. Твердотельная электроника / В. Г. Турчин. – М. : Высш. школа, 2005.
9. Каяцкас, А. А. Основа радиоэлектроники / А. А. Каяцкас. – М. : Высш. школа, 1988.
10. Лосев, А. К. Теория линейных электрических цепей / А. К. Лосев. – М. : Высш. школа, 1987.
11. Вербицкий, Н. В. Лабораторный практикум по курсу «Радиотехника и радиоизмерения» для студ. спец. «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы» : в 2 ч. / Н. В. Вербицкий. – 4.1. Радиотехника. – Минск : БПИ, 1983.
12. Минаев, Е. И. Основы радиоэлектроники / Е. И. Минаев. – М. : Радио и связь, 1985.
13. Измерение электрических и не электрических величин / Н. Н. Евтихеев [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1990.
14. Мирский, Г. Я. Электронные измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Радио и связь, 1986.
15. Росадо, Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо. – М. : Высш. школа, 1991.

16. Воложенко, Ю. И. Основы радиоэлектроники / Ю. И. Воложенко. – М. : МАИ, 1993.
17. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники / И. П. Степаненко. – М. : Сов. радио, 1980.
18. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника: учебник для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. школа, 2005.
19. Осадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника / Ю. Ф. Осадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005.
20. Прянишников, В. А. Электроника: полный курс лекций / В. А. Прянишников. – СПб. : Корона принт, 2004.
21. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – М. : Высш. школа, 1988.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Общие вопросы выполнения лабораторных работ	3
Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ	4
1. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ	5
Лабораторная работа № 1. Изучение приборов, используемых при выполнении работ по радио- и твердотельной электронике	5
Лабораторная работа № 2. Исследование выпрямительных диодов и стабилитронов	13
Лабораторная работа № 3. Снятие и анализ характеристик полевых транзисторов	19
Лабораторная работа № 4. Исследование свойств биполярного транзистора, включенного по схемам с общей базой и общим эмиттером	26
Лабораторная работа № 5. Исследование полупроводниковых диодов и тиристоров	31
Лабораторная работа №6. Исследование работы биполярного транзистора в режиме насыщения	39
Лабораторная работа № 7. Изучение импульсного режима работы МДП-транзистора	45
Лабораторная работа № 8. Исследование основных характеристик полупроводниковых источников света	50
2. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ В АНАЛОГОВЫХ И ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВАХ	57
Лабораторная работа № 9. Изучение принципов работы усилительных каскадов на полупроводниковых приборах	57
Лабораторная работа № 10. Изучение цепей постоянного тока	62
Лабораторная работа № 11. Изучение операционных усилителей и схем с применением операционных усилителей	69
Лабораторная работа № 12. Исследование работы вторичных источников питания	79
Лабораторная работа № 13. Изучение работы автогенераторов гармонических колебаний	87

Лабораторная работа № 14. Исследование амплитудного модулятора и детектора амплитудно-модулированных колебаний	94
Лабораторная работа № 15. Изучение RC -цепей импульсных устройств	103
Электронные триггеры	109
Лабораторная работа № 16. Изучение принципов построения и работы интегральных таймеров	118
3. УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ	124
Лабораторная работа № 17. Изучение методов и приборов измерения напряжений, токов и сопротивлений	124
Лабораторная работа № 18. Изучение методов осциллографических измерений	135
Лабораторная работа № 19. Изучение измерительных генераторов	141
Библиографический список	151

Учебное издание

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-41 01 01
«Технология материалов и компонентов электронной техники»

Составитель
СЫЧИК Василий Андреевич

Редактор *А. С. Кириллова*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 14.02.2020. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 9,01. Уч.-изд. л. 7,05. Тираж 100. Заказ 425.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.