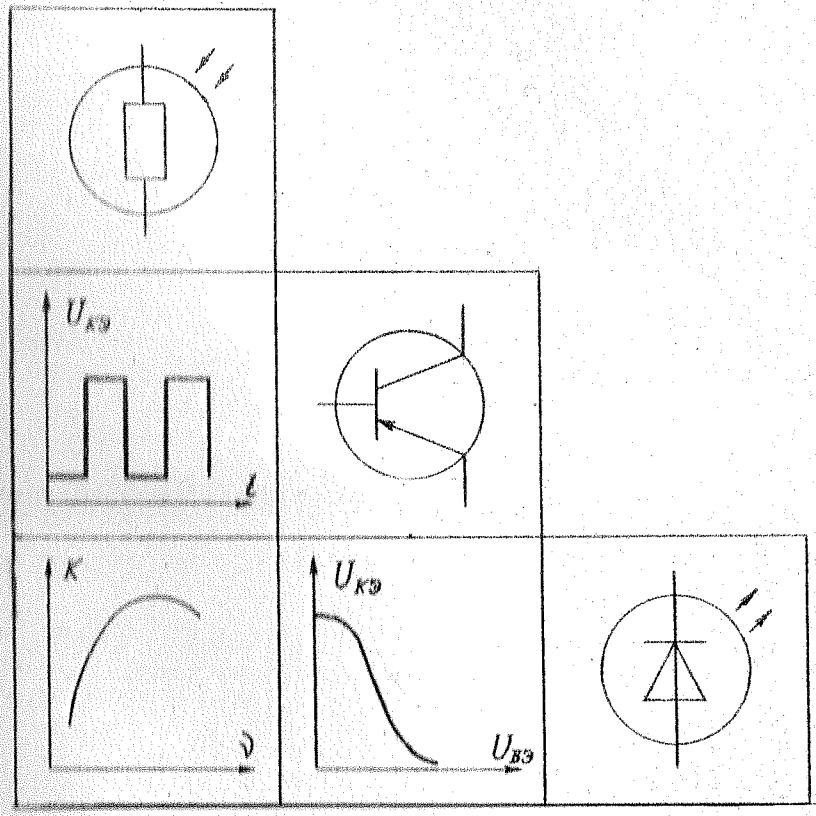
2 руб.

А.А. Ахаян, Т.Р. Берлина

ЭЛЕКТРОНИКА

СПЕЦПРАКТИКУМ



ЛЕНИНГРАД-1991

Министерство образования РСФСР
Российский ордена Трудового Красного Знамени
государственный педагогический университет
имени А.И.Герцена

Малое государственное научно-производственное
предприятие "Внедрение"

А.А.Ахаян, Т.Р.Берлина

Э Л Е К Т Р О Н И К А

Спецпрактикум

(Методическая разработка)

Ленинград 1991

Печатается по решению РИСа РГПУ имени А.И.Герцена

Содержит 7 лабораторных работ, предназначенных для учащихся X-XI классов средней школы. Их выполнение рассчитано на применение комплекта макетов "Электроника", выпускаемого малым предприятием "Внедрение" при РГПУ им. А.И.Герцена

Рецензенты: ст.н.с. А.А.Петров (ЛЭТИ им. Ульянова-Ленина);
к.ф.-м.н., доц. Р.Х.Калимуллин (РГПУ им. А.И. Герцена);
к.ф.-м.н., доц. В.П.Мерзляков (РГПУ им. А.И. Герцена)
к.ф.-м.н., доц. А.Ф.Панарин (РГПУ им. А.И. Герцена)

© Российский ордена Трудового Красного Знамени государственный педагогический университет (РГПУ) им. А.И.Герцена, 1991 г.

Предлагаемый спецпрактикум рассчитан на проведение в X-XI классах средней школы для учащихся, проявляющих склонность к дисциплинам физико-математического цикла. Он направлен на углубление знаний выпускников в области электроники, и должен способствовать дальнейшему обучению в технических вузах.

Спецпрактикум знакомит с распространенными линейными (резистор, фоторезистор) и нелинейными (диод, светодиод, транзистор) элементами, а также с принципами построения на их основе электронных схем трех основных направлений: управляющих, усиливающих, генерирующих.

Спецпрактикум строится на базе комплекта макетов "Электроника", выпускаемого малым предприятием "Внедрение" при РГПУ им. А.И.Герцена, и содержит семь лабораторных работ, данных в логической последовательности.

Ниже приводится вариант проведения спецпрактикума, опробированный нами в средней школе № 4 г.Ленинграда, а также учителями физики А.Е.Корпачевой, А.А.Пироговым, И.А.Веретеновой (школы №№ 210, 305, 491 г.Ленинграда).

Объем спецпрактикума - 16 часов (8 двухчасовых занятий).

Численный состав группы - 8-10 человек при наличии 4-5 комплектов макетов "Электроника".

Календарный план занятий

ПЕРВОЕ ЗАНЯТИЕ

Характеристика областей применения электронных устройств. Обзор содержания спецпрактикума. Знакомство с измерительными приборами, входящими в комплект "Электроника". Определение цены деления приборов.

Домашнее задание - подготовка к работе № I.

ВТОРОЕ ЗАНЯТИЕ

Выполнение работы № I: исследование вольтамперных характеристик линейных (резистор, фоторезистор) и нелинейных (диод, светодиод) элементов. Графическое построение характеристик. Изучение внутреннего уст-

ройства исследованных элементов. Обсуждение полученных экспериментальных результатов, ответы на вопросы по теме.

Домашнее задание - подготовка к работе № 2.

ТРЕТЬЕ ЗАНЯТИЕ

Выполнение работы № 2: знакомство с транзистором, исследование зависимости напряжения на коллекторе транзистора от напряжения на базе в последовательной цепи транзистор-резистор. Графическое изображение полученной зависимости. Расчет и построение графических зависимостей сквозного тока и сопротивления транзистора от напряжения на базе. Объяснение устройства транзистора, токораспределения в транзисторе, рассмотрение транзистора, как управляемого сопротивления. Обсуждение полученных экспериментальных результатов, ответы на вопросы по теме.

Домашнее задание - подготовка к работам №№ 3, 4.

ЧЕТВЕРТОЕ ЗАНЯТИЕ

Выполнение работ №№ 3, 4: исследование работы управляющих схем на транзисторе - фотоэлектронного ключа и электронного ключа с задержкой (реле времени). Проведение расчетов в соответствии с заданием. Изучение принципов работы фотоэлектронного ключа и реле времени. Обсуждение полученных экспериментальных результатов, ответы на вопросы по теме.

Домашнее задание - подготовка к работе № 5.

ПЯТОЕ ЗАНЯТИЕ

Выполнение работы № 5: исследование работы схемы, составленной из двух электронных ключей с взаимной обратной связью - транзисторного мультивибратора. Проведение расчетов в соответствии с заданием. Выяснение принципа получения периодических электрических импульсов. Обсуждение полученных экспериментальных результатов и ответы на вопросы по теме.

Домашнее задание - подготовка к работе № 6.

ШЕСТОЕ ЗАНЯТИЕ

Выполнение работы № 6: исследование работы усилительного каскада на транзисторе. Настройка каскада и измерение его характеристик. Проведение расчетов и графическое построение характеристик. Обсуждение принципа усиления синусоидальных электрических колебаний цепью тразистор-резистор. Обсуждение экспериментально полученных характеристик усилительного каскада, ответы на вопросы по теме.

Домашнее задание - подготовка к работе № 7.

СЕДЬМОЕ ЗАНЯТИЕ

Выполнение работы № 7: исследование работы транзисторного генератора с трехзвенной RC-цепью обратной связи. Настройка генератора, измерение его характеристик. Проведение расчетов и графическое построение характеристик. Обсуждение условий генерации колебаний и экспериментально полученных характеристик, ответы на вопросы по теме.

Домашнее задание - подготовка к зачетному занятию.

ВОСЬМОЕ ЗАНЯТИЕ

Зачетное занятие посвящено ретроспективному обзору изученного материала с опросом по всему курсу и обсуждению возможных предложений по продолжению работы.

Авторы выражают признательность рецензентам - к.ф.-м.н., доц. Р.Х.Калимуллину, к.ф.-м.н., доц. В.П. Мерзлякову, к.ф.-м.н., доц. А.Ф.Панарину, к.ф.-м.н., ст.н. с. А.А.Петрову - за внимательное отношение к рукописи и конструктивные замечания.

Предложения и замечания просим направлять по адресу: 191186, Ленинград, наб.р.Мойки, 48, РГПУ, кафедра физической электроники.

Авторы

Работа № I

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗИСТОРОВ И ДИОДОВ

I. Теоретические основы

Резисторы и диоды — широко распространенные элементы электронных цепей. Основной характеристикой элементов является зависимость тока J, протекающего через элемент, от напряжения U, приложенного к элементу, $J=f(U)$ (вольтамперная характеристика – ВАХ). Для ряда элементов характерна ВАХ в виде прямой (или близкой к прямой) линии, проходящей через начало координат. Такие элементы называются линейными. Если же ВАХ элемента имеет нелинейный характер, то элемент называется нелинейным.

В рамках настоящей работы познакомимся с двумя линейными элементами:

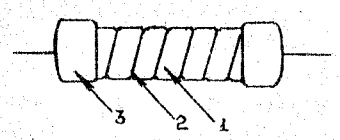
- резистором (на примере металлопленочного резистора),
- фоторезистором (на примере сульфид-кадмиевого фоторезистора),

и двумя нелинейными элементами:

- полупроводниковым диодом (на примере точечного кремниевого диода),
- светодиодом (на примере арсенид-галлиевого светодиода).

Металлопленочный резистор представляет собой керамический стержень, на поверхность которого нанесен в виде спирали материал с малой электропроводностью (см.рис.I). На концы стержня надеты колпачки с проволочными выводами. Стержень вместе с колпачками покрыт эмалью. Вольтамперная характеристика резистора линейна. Пользуясь законом Ома, по котангенсу угла наклона ВАХ можно определить сопротивление резистора. Диапазон сопротивлений металлопленочных резисторов весьма широк: от долей ома до сотен мегаом.

Фоторезистор – полупроводниковый прибор с двумя выводами, сопротивление которого изменяется под действием светового излучения. Конструкция фоторезистора приведена на рис.2. Работу



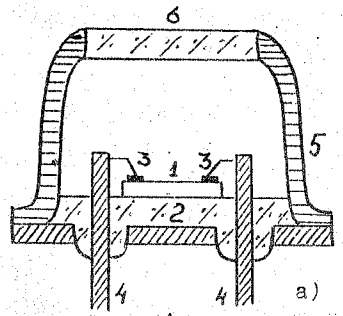
а)

б)

Рис. I. Металлопленочный резистор

а) Внешний вид:
I- керамическая трубка с проводящим покрытием;
2- спиральная канавка;
3- колпачок с проволочным выводом;

б) Условное обозначение.



а)

б)

Рис. 2. Фоторезистор

а) Внешний вид:
I- фоточувствительный слой полупроводника CdS;
2- стеклянная подложка;
3- контакты;
4- металлические выводы;
5- металлический корпус;
6- стеклянное окно

б) Условное обозначение.

прибора обеспечивает фоточувствительный полупроводниковый слой (сульфид кадмия или селенид кадмия), нанесенный на стеклянную подложку. Поверх фоточувствительного слоя нанесены контакты, к которым припаяны металлические выводы. Подложка с фоточувствительным слоем и выводами заключена в металлический корпус. Выводы электрически изолированы от корпуса. В верхней части корпуса имеется плоскопараллельное окно с установленной в него стеклянной пластиной для освещения фоточувствительного слоя.

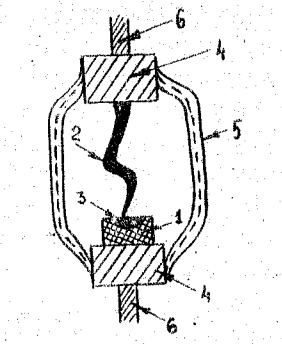
ВАХ фоторезистора близка к линейной. В темноте сопротивление фоточувствительного слоя составляет 10^6-10^7 Ом. Освещение генерирует в полупроводниковом слое дополнительные носители тока (электроны и дырки) и тем самым снижает сопротивление фоторезистора тем сильнее, чем больше световой поток.

Полупроводниковый диод – полупроводниковый прибор, содержащий электрический переход и два вывода. Диоды классифицируются по ряду признаков:

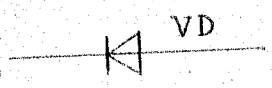
- по виду электрического перехода ($p-n$-переход, контакт металл–полупроводник, гетеропереход);
- по исходному материалу (кремний, германий, арсенид галлия и др.);
- по конструктивным особенностям (точечный, микросплавной, плоскостной, эпитаксиальный диоды и др.).

На рис.3 схематично изображена конструкция точечного кремниевого диода. Электрический переход в этом диоде образован контактом металлической иглы с кристаллом кремния n-типа. В процессе изготовления диода через контакт пропускают мощные импульсы тока, разогревающие металлическую иглу. При этом в результате термодиффузии атомы металла проникают в кристалл кремния, образуя в кристалле вблизи острия иглы область с p-типом проводимости. Таким образом, в кристалле возникает переход $pSi - nSi$. Кристалл и игла крепятся на металлических основаниях, впаянных в стеклянный баллон. С внешней стороны баллона к основаниям припаяны металлические проволочные выводы. В ряде случаев баллон покрывают эмалью.

Рис.3. Точечный кремниевый диод



а) Внешний вид:
I – кристалл кремния n-типа;
2 – металлическая игла;
3 – область кристалла кремния p-типа;
4 – металлические основания;
5 – стеклянный баллон;
6 – металлические проволочные выводы

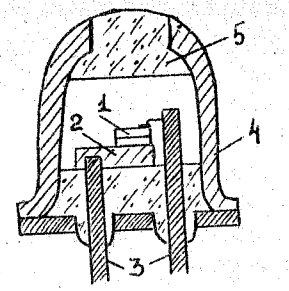


б) Условное обозначение

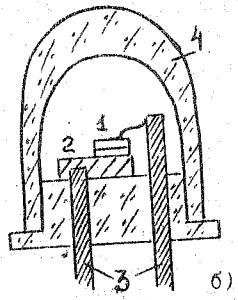
ВАХ полупроводникового диода имеет вид существенно отличный от линейного. При приложении напряжения к $p-n$-переходу в прямом направлении электроны из n-области инжектируют в p-область, а дырки – в обратном направлении. С увеличением напряжения ток экспоненциально нарастает. Приложение напряжения в обратном направлении вызывает очень незначительный ток, обусловленный движением неосновных носителей заряда. Величина тока практически не изменяется при увеличении напряжения вплоть до напряжения пробоя диода.

Светодиод – полупроводниковый прибор с электрическим переходом и двумя выводами, преобразующий энергию электрического тока в энергию светового излучения видимого или инфракрасного диапазона. Излучение обусловлено самопроизвольной излучательной рекомбинацией электронов и дырок, инжектированных через $p-n$-переход при приложении к нему напряжения в прямом направлении. Этим светодиод отличается от обычного диода, где энергия, выделяемая при рекомбинации, передается кристаллической решетке, т.е. превращается в теплоту. Основную роль в излучении играет межзонная излучательная рекомбинация, поэтому длина волны излучения (или энергия кванта $h\nu$) связана с шириной запрещенной зоны ΔE_g полупроводника: $h\nu \simeq \Delta E_g$. Наиболее распространены арсенидгаллиевые светодиоды на основе твердого раствора $GaAsP$ с красным ($h\nu$ = I,9 эВ) и зеленым ($h\nu$ = 2,2 эВ) цветом излучения.

Конструкция светодиода изображена на рис.4. Кристаллическая пластина $GaAsP$ с $p-n$-переходом укреплена на металлической подложке, которая обеспечивает электрический контакт



а)



б)

в)

Рис.4. Полупроводниковый светодиод

а) Внешний вид (в металлическом корпусе):
1 - пластина GaAsP с p-n-переходом;
2 - металлическая подложка;
3 - металлические выводы;
4 - металлический корпус;
5 - стеклянное окно-линза

б) Внешний вид (в пластмассовом корпусе):
1 - пластина GaAsP с p-n-переходом;
2 - металлическая подложка;
3 - металлические выводы;
4 - пластмассовый корпус

в) Условное обозначение

с одной из областей полупроводника. Контакт со второй областью полупроводника обеспечивается с помощью тонкой металлической проволоки. Подложка с кристаллом и выводами заключена в металлический корпус. В верхней части корпуса имеется окно с установленной в него стеклянной линзой для вывода наружу излучения кристалла. В последние годы при изготовлении светодиодов применяются как металло стеклянные, так и пластмассовые корпуса. Конструкция светодиода в пластмассовом корпусе приведена на рис.4б

II. Принципиальная схема макета

Принципиальная схема макета приведена на рис.5. Макет позволяет проводить измерения зависимости тока от напряжения $J = f(U)$ (вольтамперной характеристики) линейных элементов (резистора, фоторезистора) и нелинейных элементов (полупроводникового диода, светодиода). Напряжение питания $U_п$ подается на гнезда Г8 (-), Г9 (+). Напряжение на элементе измеряется вольтметром, подключенным к гнездам Г6, Г7. Ток, проходящий через элемент, измеряется миллиамперметром, установленным между гнездами Г5 и одним из гнезд Г1, Г2, Г4, Г3. Переменное сопротивление R3 позволяет управлять величиной, а тумблер К - полярностью напряжения U, приложенного к исследуемому элементу.

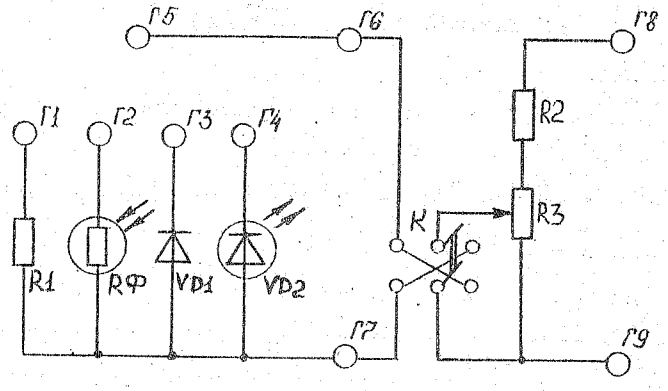


Рис.5. Принципиальная схема макета "Резисторы и диоды"

Детали макета:
VD1 - диод Д-18;
VD2 - светодиод АЛ-307;
RФ - фоторезистор СФ-2;
R1 - резистор МЛТ-0,25, 620 Ом;
R2 - резистор МЛТ-0,25, 430 Ом;
R3 - переменное сопротивление СП-04, 150 Ом;
K - тумблер ТВ2-I

Экспериментально измеряемые величины:

- напряжение U на исследуемом элементе (гнезда Г6,Г7);
- ток J через резистор (гнезда Г5,Г1);
- ток J через фоторезистор (гнезда Г5,Г2);
- ток J черед диод (гнезда Г5,Г3);
- ток J через светодиод (гнезда Г5,Г4).

Ш. Оборудование

- макет "Резисторы и диоды";
- вольтметр с пределом шкалы 4 В;
- миллиамперметр с пределом шкалы 5мА;
- источник питания 9 В;
- провода соединительные (6 шт.);
- настольная лампа.

IУ. Порядок работы

I. Подготовьте таблицы I,2,3,4.

Таблица I. Вольтамперная характеристика резистора

U, В	- 3	- 2	- I	0	I	2	3
J, mA							

Таблица 2. Вольтамперная характеристика фоторезистора

U, В	-2,5	2,0	-I,5	I,0	-0,5	0	0,5	I,0	I,5	2,0	2,5
а) в условиях рассеянного дневного света											
J, mA											
б) при дополнительном освещении настольной лампой											
$J_{осв}$, mA											

Таблица 3. Вольтамперная характеристика диода

U, В	-2,0	-I,0	-0,5	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,70	0,75	0,8
J, mA											

Таблица 4. Вольтамперная характеристика светодиода

U, В	-2,0	-I,0	0	0,5	I,0	I,20	I,30	I,40	I,50	I,60
J, mA										

2. Соберите схему, изображенную на рис.6.

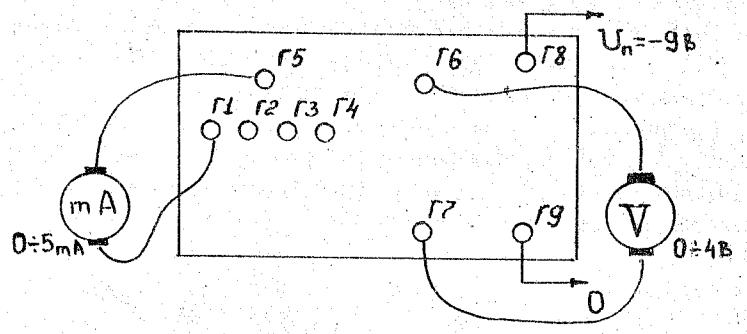


Рис.6. Электрическая схема измерений

3. Включите источник питания. Исследуйте зависимость $J=f(U)$ резистора. Для этого, изменяя величину и полярность напряжения U, приложенного к исследуемому резистору R1, измерьте значение протекающего через R1 тока J при различных значениях U. Результаты измерений занесите в таблицу I.
4. Исследуйте ВАХ фоторезистора. Для этого подключите миллиамперметр к гнездам Г5, Г2. Сначала исследуйте ВАХ фоторезистора при рассеянном дневном свете. Результаты измерений занесите в таблицу 2а. Затем установите над макетом настоль-

ную лампу и исследуйте ВАХ фоторезистора при дополнительном освещении. Результаты измерений занесите в таблицу 2б.

5. Исследуйте ВАХ диода. Для этого подключите миллиамперметр к гнездам Г5, Г3. Результаты измерений занесите в таблицу 3.

6. Исследуйте ВАХ светодиода. Для этого подключите миллиамперметр к гнездам Г5, Г4. Результаты измерений занесите в таблицу 4.

У. Обсуждение экспериментальных результатов

I. По результатам, сведенным в таблицы I,2,3,4, постройте графики ВАХ резистора, фоторезистора, диода и светодиода.

2. Пользуясь графиком ВАХ резистора, определите его сопротивление. Сравните полученное значение с номиналом, указанным в принципиальной схеме макета.

3. Пользуясь графиком ВАХ фоторезистора, определите сопротивление фоторезистора в условиях рассеянного дневного света и при дополнительном освещении светом настольной лампы.

4. Предположим, что на исследованный вами диод подается напряжение U, которое измеряется во времени по закону $U(t)$, изображенному на рис.7. Нарисуйте качественную зависимость тока, проходящего через диод, от времени $J(t)$.

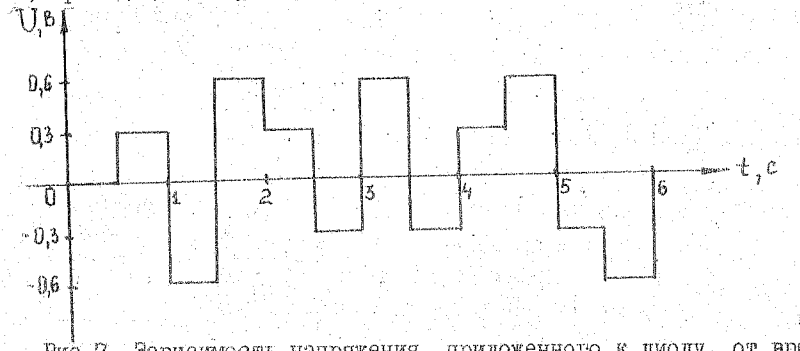


Рис.7. Зависимость напряжения, приложенного к диоду, от времени $U=f(t)$

5. Предположим, что на исследованный вами светодиод подается синусоидальное напряжение с эффективным значением U =I,5 В. В течение какого времени (в процентном отношении к периоду) светится светодиод?

Работа № 2

ТРАНЗИСТОР КАК УПРАВЛЯЕМОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

I. Теоретические основы

Транзистор представляет собой полупроводниковый прибор, содержащий комбинацию двух p-n- переходов в одном полупроводящем кристалле и имеющий три вывода.

Классификация транзисторов проводится по исходному материалу (германий, кремний), по типу проводимости (p-n-p , n-p-n), по технологии изготовления (сплавная, диффузно-сплавная, планарная), по типу корпуса (металло стеклянный, металло керамический, пластмассовый, бескорпусный), по мощности (малая, средняя, большая), по частотному диапазону (низкочастотный, высокочастотный), по ряду других признаков.

Конструкция низкочастотного германиевого транзистора малой мощности структуры p-n-p , изготовленного по сплавной технологии, изображена на рис.I.

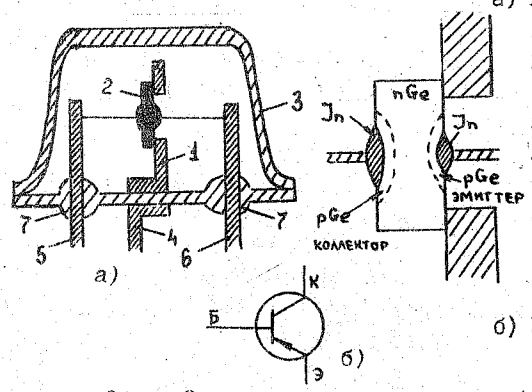


Рис.I. Сплавной германиевый транзистор структуры p-n-p

а) Внешний вид:
I - металлический держатель;
2 - пластина германия n -типа;
3 - металлический корпус;
4- вывод базы (n Ge);
5 - вывод эмиттера (pGe);
6 - вывод коллектора (pGe);
7 - стеклянные изоляторы

б) Условное обозначение

Основой транзистора служит кристаллическая пластина германия n-типа. Технология изготовления транзистора сводится к сле-

дующему: на обе поверхности пластины наносятся капли расплавленного индия. Часть германиевой пластины, соприкасающаяся с расплавленным индием, растворяется в нем и при последующем охлаждении кристаллизуется в виде материала p-типа. Центральная n-область пластины называется базой, две крайние p-области – эмиттером и коллектором. Металлический держатель с германиевой пластиной припаян к основанию корпуса транзистора. Тем самым обеспечивается контакт корпуса с областью базы. К эмиттеру и коллектору припаяны металлические выводы, изолированные от корпуса с помощью стеклянных изоляторов.

Рассмотрим протекание тока через транзистор структуры $p-n-p$. На рис.2 изображен транзистор, между эмиттером и коллектором которого включен источник постоянного напряжения $U_{кэ}$ (минусом – к коллектору), а между базой и эмиттером – источник постоянного напряжения $U_{бэ}$ (минусом – к базе), причем $U_{бэ} \ll U_{кэ}$ (обычно: $U_{бэ} \simeq 0{,}1 \div 0{,}5$ В; $U_{кэ} \simeq 5 \div 15$ В).

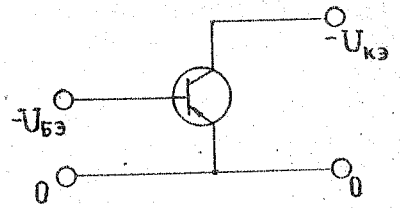
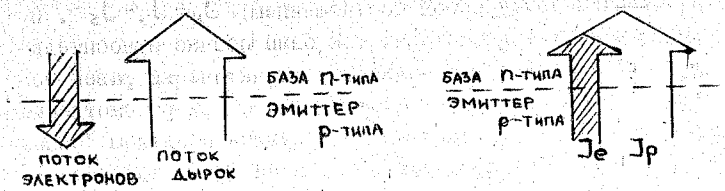


Рис.2. Транзистор структуры $p-n-p$ с источниками $U_{кэ}$, $U_{бэ}$

Приложение отрицательного потенциала к базе относительно эмиттера обеспечивает смещение $p-n-$ перехода база–эмиттер в прямом направлении и "вытягивает" положительные дырки из эмиттера в область базы, а электроны из базы – в область эмиттера. Таким образом, ток через переход база–эмиттер с учетом направления движения и заряда частиц представляет собой сумму тока дырок J_p и электронов J_e: $J_э = J_p + J_e$ (см.рис.3)



а) б)

Рис.3. Иллюстрация прохождения тока через $p-n$-переход база–эмиттер:
а) потоки электронов и дырок через $p-n$ –переход база–эмиттер;
б) ток электронов J_e и дырок J_p через $p-n$ – переход база–эмиттер

Ток, регистрируемый в цепи эмиттера, получил название эмиттерного тока ($J_э$). Электронная составляющая эмиттерного тока J_e обычно значительно меньше дырочной J_p, поскольку степень легирования эмиттера обычно значительно ниже, нежели базы. Электронная составляющая эмиттерного тока J_e регистрируется в цепи базы, образуя базовый ток $J_б$. Основная часть тока дырок J_p проходит из эмиттера сквозь тонкую область базы в коллектор за счет тянущего потенциала коллектора ($U_{кэ}$), образуя коллекторный ток $J_к$. Незначительная часть дырок (J_p^{rec}) рекомбинирует в области базы, не достигая коллектора, увеличивая базовый ток и уменьшая ток коллектора: $J_б = J_e + J_p^{rec}$, $J_к = J_p - J_p^{rec}$

Протекание тока через открытый транзистор иллюстрирует рис.4.

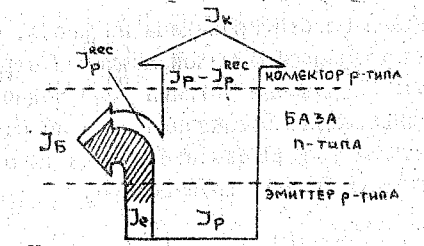


Рис.4. Иллюстрация прохождения тока по открытому транзистору

Мы видим, что токи эмиттера, базы и коллектора связаны между собой соотношением: $J_к = J_э - J_б$. В сплавных германиевых транзисторах ток базы обычно относительно мал ($J_б \leq 0{,}1 \cdot J_э$) и ток коллектора практически равен току эмиттера: $J_к \geq 0{,}9 \cdot J_э$. Поэтому часто при рассмотрении прохождения тока через транзистор, пользуются понятием "сквозного тока" (от эмиттера к коллектору), имея при этом ввиду ток коллектора и считая, что ток эмиттера по величине от него практически не отличается.

Мы рассмотрели прохождение тока при подаче на базу транзистора структуры $p-n-p$ – отрицательного смещения (т.е. при прямом смещении p-n – перехода эмиттер-база). При подаче на базу нулевого или положительного смещения $U_{бэ}$ электронный и дырочный токи через p-n – переход эмиттер-база отсутствуют. Поэтому отсутствует эмиттерный и, как следствие, коллекторный ток независимо от величины тянущего потенциала коллектора $U_{кэ}$. Такое состояние транзистора называется закрытым.

Таким образом, сквозной ток транзистора при одном и том же тянущем потенциале коллектора может быть как большим (открытый транзистор), так и малым или вообще отсутствовать (закрытый транзистор) в зависимости от потенциала базы относительно эмиттера $U_{бэ}$, что позволяет рассматривать транзистор как своего рода управляемое сопротивление. Это свойство транзистора лежит в основе создания множества различных электронных схем.

II. Принципиальная схема макета

Принципиальная схема макета приведена на рис.5. Схема собрана на германиевом транзисторе малой мощности структуры $p-n-p$ типа МП-39. Напряжение питания $U_п$ подается на гнезда Г5(–), Г6(+). Индикация прохождения тока по открытому транзистору осуществляется излучением светодиода типа АЛ-102, установленного в коллекторной цепи транзистора.

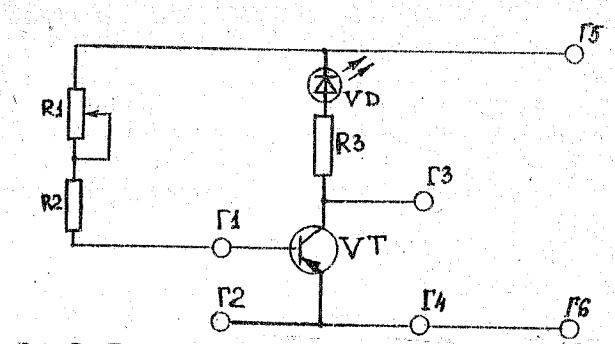


Рис.5. Принципиальная схема макета "Транзистор как управляемое сопротивление"

Детали макета:

VT – транзистор МП-39;
VD – светодиод АЛ-102;
R1 – переменное сопротивление СП-04, 100 кОм;
R2 – резистор МЛТ-0,25, 8,2 кОм;
R3 – резистор МЛТ-0,25, 1,0 кОм.

Экспериментально измеряемые величины:

- напряжение на базе транзистора $U_{бэ}$ (гнезда Г1, Г2);
- напряжение на коллекторе транзистора $U_{кэ}$ (гнезда Г3, Г4).

III. Оборудование

- макет "Транзистор как управляемое сопротивление";
- вольтметр с пределом шкалы 1 В;
- вольтметр с пределом шкалы 10 В;
- источник питания 9 В;
- провода соединительные (6 шт.).

IV. Порядок работы

1. Подготовьте таблицу 1.

Таблица I. Сквозной ток $J_к$ и сопротивление транзистора $R_{vт}$ при различных значениях $U_{бэ}$

$U_{бэ}$, В	0,10	0,12	0,15	0,17	0,20	0,22	0,25	0,27
$U_{кэ}$, В								
$J_к$, А								
$R_{vт}$, кОм								

2. Соберите схему, изображенную на рис.6.

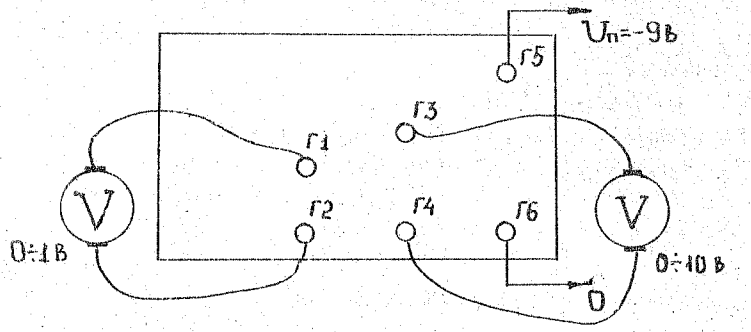


Рис.6. Электрическая схема измерений

3. Включите источник питания. Убедитесь в том, что схема собрана правильно. Для этого поверните ручку реостата R1 по часовой стрелке до упора. Светодиод должен засветиться. Поверните ручку R1 до упора в противоположную сторону. Светодиод должен погаснуть.

4. Проведите измерение зависимости напряжения на коллекторе транзистора $U_{кэ}$ от напряжения на базе транзистора $U_{бэ}$. Для этого, плавно изменяя положение ручки реостата R1, установите последовательно значения $U_{бэ}$, приведенные в таблице и определите соответствующие им значения $U_{кэ}$.

У. Обсуждение экспериментальных результатов

I. По результатам, занесенным в таблицу, постройте график зависимости $U_{кэ} = f(U_{бэ})$.

2. Определите значение сквозного тока $J_к$ при различных значениях $U_{бэ}$, указанных в таблице. Для расчета значений $J_к$ можно воспользоваться законом Ома для участка цепи, включающем в себя резистор R3 и светодиод VD. Пренебрегая сопротивлением светодиода по сравнению с R3, имеем:

$$J_к \approx \frac{U_п - U_{кэ}}{R3}.$$

При расчете $J_к$ используйте значение R3, указанное в деталировке макета. За напряжение питания $U_п$ примите максимальное из измеренных значений $U_{кэ}$. Результаты расчета занесите в таблицу I.

3. Определите значения сопротивления транзистора сквозному току $R_{vт}$ для данной конкретной схемы при различных значениях $U_{бэ}$, указанных в таблице.

$$R_{vт} = \frac{U_{кэ}}{J_к}.$$

Результаты расчета занесите в таблицу I.

Примечание. Не следует путать понятие "сопротивление транзистора сквозному току" $R_{vт}$ с понятием "дифференциальное сопротивление транзистора" $R'_{vт} = \frac{dU_{кэ}}{dJ_к}$, которое в данном случае не используется.

4. По результатам таблицы постройте график зависимости сопротивления транзистора сквозному току от напряжения на базе $R_{vт} = f(U_{бэ})$. Сравните значение сопротивления открытого и закрытого транзистора со значением сопротивления нагрузки R3.

5. Попытайтесь объяснить, почему на участке цепи, где расположен транзистор, бóльшим значениям тока соответствуют меньшие значения напряжения? Как совместить этот факт с законом Ома?

Работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА

I. Теоретические основы

Убедившись в том, что транзистор является управляемым сопротивлением, рассмотрим, как на его основе можно сконструировать схему фотоэлектронного ключа – устройства, срабатывающего под действием света. Один из простейших вариантов фотоэлектронного ключа на транзисторе представлен на рис.I.

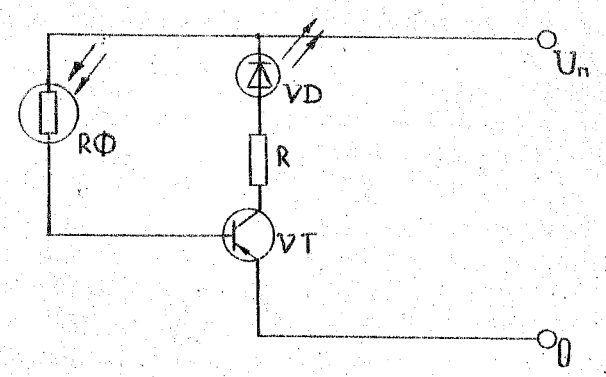


Рис.I. Схема фотоэлектронного ключа

Сравним схему, изображенную на рис.I, со схемой на рис.5 (стр.I9). Как видно, фотоэлектронный ключ получен путем замены переменного сопротивления $R1$ на фоторезистор $R\Phi$.

В темноте сопротивление фоторезистора велико ($I0^6$-$I0^7$ Ом), поэтому напряжение на базе транзистора $U_{бэ}$ близко к нулю, транзистор закрыт и светодиод не излучает. При попадании на входное окно фоторезистора рассеянного света сопротивление фоторезистора уменьшается до значений, при которых на базе транзистора появляется напряжение смещения $U_{бэ} \simeq 0{,}2 \div 0{,}25$ В. Транзистор открывается и светодиод начинает излучать.

Напряжение на коллекторе $U_{кэ}$ изменяется до значений, близких к напряжению питания (при закрытом транзисторе) до

значений, близких к нулю (при полностью открытом транзисторе).

II. Принципиальная схема макета

Принципиальная схема макета приведена на рис.2. Фотоэлектронный ключ собран на основе германиевого транзистора малой мощности структуры $p-n-p$ типа МП-39. Напряжение питания подается на гнезда Г5(-), Г6(+). В роли фоточувствительного элемента выступает фоторезистор СФ-2. Индикатором работы ключа служит светодиод типа АЛ-I02, установленный в коллекторной цепи транзистора.

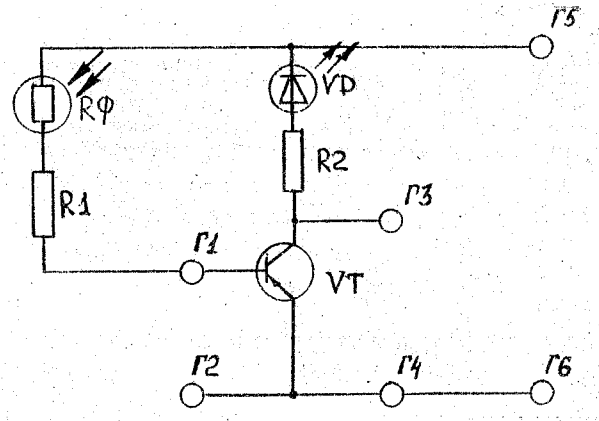


Рис.2. Принципиальная схема макета "Фотоэлектронный ключ"

Детали макета:

VT – транзистор МП-39;
VD – светодиод АЛ-I02;
RФ – фоторезистор СФ-2;
R1 – резистор МЛТ-0,25, 8,2 кОм;
R2 – резистор МЛТ-0,25, I,0 кОм

Экспериментально измеряемые величины

- напряжение на базе транзистора $U_{бэ}$ (гнезда Г1, Г2);
- напряжение на коллекторе транзистора $U_{кэ}$ (гнезда Г3, Г4).

Ш. Оборудование

- макет "Фотоэлектронный ключ";
- вольтметр с пределом шкалы I В;
- вольтметр с пределом шкалы I0 В;
- источник питания 9 В;
- провода соединительные (6 шт.);
- набор бумажных дисков ∅ I0 мм различной плотности.

IУ. Порядок работы

I. Подготовьте таблицу I.

Таблица I.

№ п/п	Условия опыта	$U_{бэ}$, В	$U_{кэ}$, В	Степень свечения (ярко, средняя яркость, тускло, нет свечения)
I.	Полное затемнение			
2.	Плотная бумага			
3.	Тетрадный лист			
4.	Калька			
5.	Открытое окно			

2. Соберите схему, изображенную на рис.3.

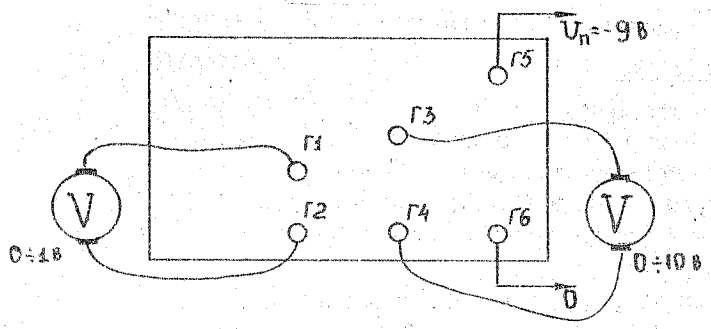


Рис.3. Электрическая схема измерений

3. Включите источник питания. Убедитесь в том, что схема собрана правильно. При открытом окне фоторезистора в условиях обычного дневного освещения светодиод должен излучать. При полном затемнении окна фоторезистора (очень плотная бумага или однокопеечная монета) светодиод гаснет.

4. Изменяя условия освещенности входного окна фоторезистора, исследуйте зависимость от степени освещенности следующих величин:
   - напряжения на базе транзистора $U_{бэ}$;
   - напряжения на коллекторе транзистора $U_{кэ}$;
   - степени свечения светодиода.

Полученные результаты сведите в таблицу.

У. Обсуждение экспериментальных результатов

I. По результатам, сведенным в таблицу, постройте график зависимости $U_{кэ}=f(U_{бэ})$. Сравните построенный график с графиком аналогичной зависимости из работы 2.

2. Сравнивая принципиальные схемы макетов № 3 и № 2, оцените порядок величины сопротивления фоторезистора при полном затемнении и с открытым окном в условиях рассеянного дневного света.

3. Не заметили ли вы, что подключение вольтметра, измеряющего напряжения на базе, сказывается на яркости свечения светодиода? Почему?

4. Как следует изменить схему ключа, чтобы светодиод излучал в темноте и прекращал излучение при включении света в помещении?

Работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА С РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

I. Теоретические основы

Другой пример практического применения транзистора как управляемого сопротивления - схема электронного ключа с задержкой (реле времени), см.рис.I.

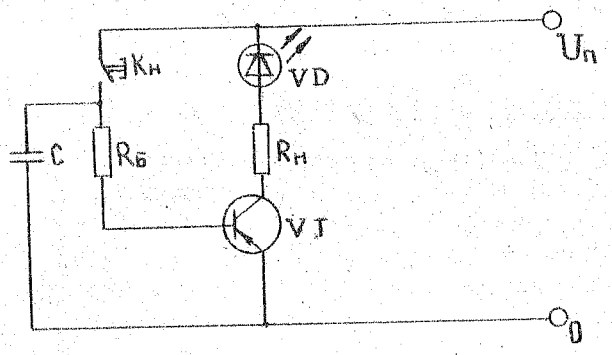


Рис.I. Электронный ключ с задержкой

Сравнивая эту схему со схемой, изображенной на рис.5 (стр.I9), можно увидеть, что новая схема получена путем добавления конденсатора C в цепь управления (цепь базы транзистора).

Схема работает следующим образом: исходное состояние - кнопка $K_н$ разомкнута. Напряжение на базе транзистора $U_{бэ}$ близко к нулю, транзистор закрыт и светодиод в его коллекторной цепи не излучает. При замыкании контактов кнопки $K_н$ на базу транзистора подается напряжение $U_{бэ} \simeq 0{,}2$ В, достаточное для отпирания транзистора. Ток в коллекторной цепи резко возрастает и светодиод начинает излучать. При размыкании контактов кнопки $K_н$ конденсатор C , заряженный до напряжения питания $U_п$, начинает разряжаться по цепи $C(+) \rightarrow 0 \rightarrow$ эмиттер-база $VT \rightarrow R_б \rightarrow C(-)$. Время, в течение которого

разряжается конденсатор, определяется сопротивлением цепи разряда и емкостью конденсатора. В тех случаях, когда $R_б$ много больше, чем сопротивление открытого перехода эмиттер-база, время τ полного разряда конденсатора (на 99% начального напряжения) может быть приближенно определено по формуле $\tau \approx 5 \cdot R_б \cdot C$. Ток разряда создает на базо-эмиттерном переходе падение напряжения, которое определяет потенциал базы. Уменьшаясь во времени, ток разряда в течение некоторого времени τ^* поддерживает на базе потенциал, достаточный для того, чтобы транзистор оставался открытым и светодиод продолжал излучать. Увеличивая емкость конденсатора C, можно довести время послесвечения τ^* светодиода до нескольких минут.

II. Принципиальная схема макета

Принципиальная схема макета приведена на рис.2. Электронный ключ собран на основе германиевого транзистора малой мощности структуры $p-n-p$ типа МП-39. Напряжение питания подается на гнезда Г5(-), Г6(+). Индикация работы ключа осуществляется излучением светодиода типа АЛ-I02, установленного в коллекторной цепи транзистора.

Схема работает безинерционно, если конденсаторы $C1$ и $C2$ отключены (тумблеры $K1$ и $K2$ разомкнуты), см.рис.2. Подключение конденсаторов $C1$ и $C2$ преобразует схему в реле времени. В этом случае после размыкания кнопки $K_н$ напряжение на базе $U_{бэ}$ уменьшается практически до нуля за время τ , равное времени разряда конденсатора через сопротивление $R1$ и базо-эмиттерный переход транзистора ($\tau 1 \approx 5 \cdot R1 \cdot C1$, $\tau 2 \approx 5 \cdot R2 \cdot C2$). При этом в течение некоторого времени τ^* (пока напряжение на базе не понизилось до значений $U_{бэ} \simeq 0{,}15$ В) транзистор продолжает оставаться открытым, а светодиод излучать.

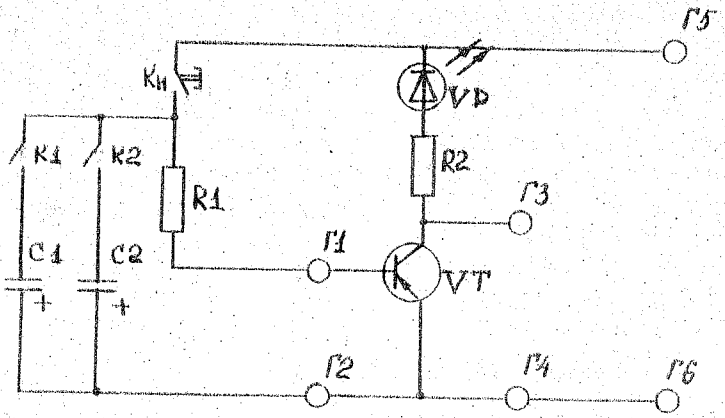


Рис.2. Принципиальная схема макета "Электронный ключ с задержкой"

Детали макета:

VT – транзистор МП-39;
VD – светодиод АЛ-102;
$K_н$ – микрокнопка МП2-18;
K1, K2 – тумблер ТВ2-1;
R1 – резистор МЛТ-0,25, 30 кОм;
R2 – резистор МЛТ-0,25, 1,0 кОм;
C1 – конденсатор КДС 25 мкФ;
C2 – конденсатор КДС 150 мкФ.

Экспериментально измеряемые величины:

- напряжение на базе транзистора $U_{бэ}$ (гнезда Г1, Г2);
- напряжение на коллекторе транзистора $U_{кэ}$ (гнезда Г3, Г4);
- время полного разряда конденсаторов τ_1, τ_2 ;
- время послесвечения светодиодов τ_1^* , τ_2^* .

Ш. Оборудование

- макет "Электронный ключ с задержкой";
- вольтметр с пределом шкалы 1 В;
- вольтметр с пределом шкалы 10 В;
- источник питания 9 В;
- провода соединительные (6 шт.);
- секундомер.

IУ. Порядок работы

1. Подготовьте таблицы 1 и 2.

Таблица 1. Напряжение на базе $U_{бэ}$ и коллекторе $U_{кэ}$ транзистора

Состояние кнопки $K_н$	$U_{бэ}$, В	$U_{кэ}$, В
Замкнута		
Разомкнута		

Таблица 2. Время разряда конденсатора τ и время послесвечения светодиода τ^*

Подключен конденсатор	τ^*, с	τ, с	$\tau^{теор}$, с
C1			
C2			

2. Соберите схему, изображенную на рис.3.

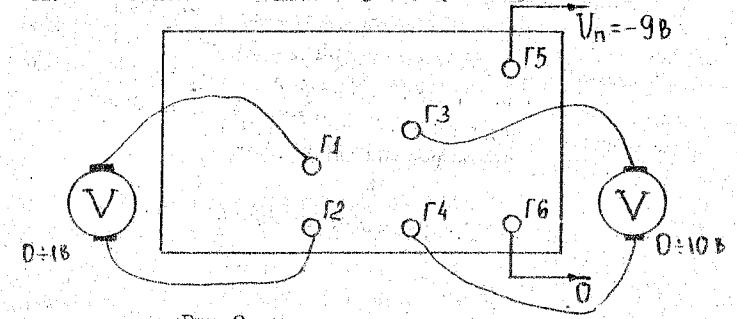


Рис.3. Электрическая схема измерений.

3. Включите источник питания. Убедитесь в том, что схема собрана правильно. Для этого установите тумблеры K1 и K2 в положение "откл.". Замкните кнопку $K_н$. Светодиод должен засветиться. Разомкните кнопку $K_н$. Светодиод должен мгновенно погаснуть.

4. Проверьте, что конденсаторы C1 и C2 отключены (тумблеры K1 и K2 в положение "откл."). Включая и выключая кнопку $K_н$, измерьте напряжение на базе $U_{бэ}$ и коллекторе $U_{кэ}$ транзистора VT. Результаты занесите в таблицу № 1. Убедитесь в том, что полученные значения $U_{бэ}$ и $U_{кэ}$ качественно согласуются с зависимостью $U_{кэ}=f(U_{бэ})$, измеренной в работе № 2.

5. Подключите к базе транзистора конденсатор C1 (включите тумблер K1). Нажмите на 1-2 секунды и отпустите кнопку $K_н$. Пользуясь секундомером, определите длительность послесвечения светодиода τ_1^* и время τ_1, в течение которого напряжение на базе транзистора $U_{бэ}$ уменьшается до ~0. Для надежного определения значения τ_1^* и τ_1 повторите опыт 3-4 раза. Полученные значения τ_1^* и τ_1 занесите в таблицу 2.

6. Повторите операции п.5, заменив конденсатор C1 на C2 (включите тумблер K2, выключите тумблер K1). Измеренные значения τ_2^* и τ_2 занесите в таблицу 2.

7. Определите, при каком напряжении на базе $U_{бэ}^*$ транзистор закрывается и светодиод гаснет. Для этого повторите операции п.6, внимательно наблюдая одновременно за свечением светодиода и показаниями вольтметра, подключенного к базе транзистора. Запишите значение $U_{бэ}^*$.

У. Обсуждение экспериментальных результатов

1. Рассчитайте время полного разряда конденсаторов C1 и C2: $\tau_1^{теор}$, $\tau_2^{теор}$. При расчете используйте номиналы элементов C1, C2 и R1, установленных в макете. Рассчитанные значения $\tau_1^{теор}$ занесите в таблицу 2. Сравните рассчитанные значения $\tau_1^{теор}$ с экспериментальными τ.

2. Сравните время полного разряда конденсатора τ со временем послесвечения светодиода τ^*. Какое из них больше? Почему?

3. Объясните, в какой момент и по какой цепи происходит зарядка конденсаторов C1 и C2. Сколько времени необходимо для их зарядки?

4. Предположим, что Вам необходимо увеличить время послесвечения светодиода в 10-20 раз, доведя его до нескольких минут. Как вы поступите: увеличите емкость конденсатора или величину резистора R1? Почему?

Работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО МУЛЬТИВИБРАТОРА

I. Теоретические основы

На рис.I изображены два электронных ключа: левый (транзистор VT1 , резисторы R1 , R3) и правый (транзистор VT2 , резисторы R4 , R2), соединенные посредством двух конденсаторов C1 и C2 . Причем конденсатор C1 соединяет выход левого ключа (коллектор VT1) со входом правого (база VT2), а конденсатор C2 – выход правого ключа (коллектор VT2) с входом левого (база VT1). Два ключа, соединенные таким образом, образуют (как мы увидим ниже) простейший генератор – устройство, в котором без внешних воздействий возникают периодические электрические колебания.

Генераторы электрических колебаний подразделяются по форме колебаний на генераторы синусоидальных колебаний и генераторы колебаний релаксационного типа.

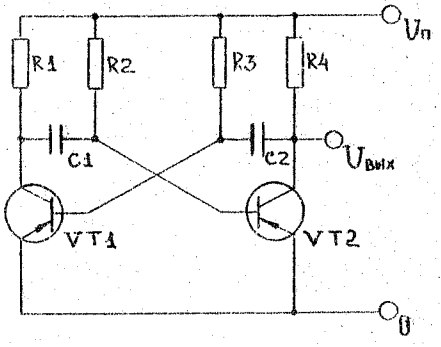


Рис.I. Два ключа: левый (VT1 , R1 , R3) и правый (VT2 , R4 , R2) – соединенные конденсаторами C1 и C2 образуют транзисторный мультивибратор

Колебания релаксационного типа могут иметь треугольную, трапецевидную, прямоугольную и другие формы. В схеме, изображенной на рис.I, возникают колебания (импульсы) прямоугольной формы (см.рис.2).

Как известно, математическая функция $U(t)$ прямоугольной формы, изображенная на рис.2, может быть получена путем графического сложения большого числа синусоид различной частоты. Следовательно, генерация прямоугольных импульсов равносильна одновременной генерации множества синусоидальных колебаний различных частот. Поэтому схема, изображенная на рис.I, получила название мультивибратор (от слова "мульт" – много).

Импульсы мультивибратора характеризуются рядом параметров (см.рис.2)

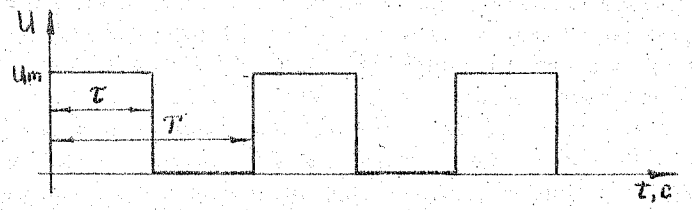


Рис.2. График импульсного напряжения прямоугольной формы

Амплитуда импульса U_m – наибольшее значение напряжения импульса данной формы;

длительность импульса τ – время от момента возникновения до момента исчезновения импульса;

период повторения импульса T – отрезок времени между началами однополярных соседних импульсов;

частота следования импульсов f – величина, обратная периоду повторения, $f = 1/T$;

скважность Q – соотношение между периодом повторения и длительностью импульса $Q = T/\tau$;

коэффициент заполнения $K_з$ – величина, обратная скважности, $K_з = 1/Q$.

Импульсы, имеющие не прямоугольную, но близкую к прямоугольной форму (см.рис.3), характеризуются дополнительными

параметрами:

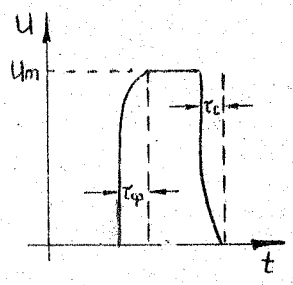


Рис.3. Импульс формы, близкой к прямоугольной

длительность фронта $\tau_{ф}$ -время нарастания от минимального до максимального значения;
длительность спада $\tau_{с}$ - время спада напряжения от максимального до минимального значения;
крутизна фронта $S_{ф}$ и крутизна спада $S_{с}$ импульса:

$$S_{ф}=\frac{U_m}{\tau_{ф}} \quad ; \quad S_{с}=\frac{U_m}{\tau_{с}}$$

Рассмотрим процессы, протекающие в мультивибраторе. В момент включения источника питания оба транзистора приоткрываются. Это обусловлено следующим (см.рис.I): протекание тока по цепи (0) → эмиттер-база VT1 → R3 →(-)$U_п$ создает падение напряжения на сопротивлении база-эмиттерного перехода VT1. На базе VT1 возникает отрицательный потенциал относительно эмиттера, достаточный для приоткрывания транзистора. Аналогичным образом протекание тока по цепи (0) → эмиттер-база VT2 →R2 →(-)$U_п$ создает отрицательный потенциал на базе транзистора VT2 и он так же приоткрывается. Такое состояние схемы оказывается неустойчивым. Любая незначительная флуктуация сквозного тока в цепи VT1 или VT2 приводит к лавинообразному росту тока через один из транзисторов и уменьшению тока до полного исчезновения через другой. Действительно, пусть, к примеру, в некоторый момент времени незначительно возрос ток коллектора транзистора VT1 ($\uparrow\Delta J_{к1}$). Это вызовет соответствующее увеличение падения напряжения на R2 ($\uparrow\Delta J_{к1}R1$) и уменьшение абсолютного значения потенциала коллектора VT1 ($\downarrow\Delta U_{кэ1}$). Уменьшение потенциала коллектора передается через конденсатор C1 на базу транзистора VT2, понижая величину напряжения на базе ($\downarrow\Delta U_{бэ2}$), что вызовет уменьшение сквозного тока через VT2 ($\downarrow\Delta J_{к2}$) и соответствующее

уменьшение падения напряжения на сопротивлении R4 ($\downarrow\Delta J_{к2}R4$) и, следовательно, флуктуацию потенциала коллектора VT2 в сторону увеличения ($\uparrow\Delta U_{кэ2}$). Эта флуктуация передается через конденсатор C2 на базу транзистора VT1, увеличивая напряжение на базе ($\uparrow\Delta U_{бэ1}$), что, в свою очередь, вызовет увеличение сквозного тока через транзистор VT1 ($\uparrow\Delta J_{к1}$). Подытоживая все перечисленное, делаем вывод: случайное незначительное увеличение тока в цепи первого транзистора вызывает дальнейшее увеличение этого тока и одновременно уменьшение тока второго транзистора. Этот процесс, происходящий практически мгновенно, получил название "лавины".

В результате лавины транзистор VT1 полностью открывается, а VT2 - полностью закрывается. Потенциал коллектора открывающегося транзистора VT1 становится близким к нулю ($U_{кэ1}\approx 0$) в ходе лавины. Потенциал коллектора закрывающегося транзистора VT2 возрастает до значения $U_{кэ2}\approx U_п$ спустя некоторое время $\tau_{ф}$ после окончания лавины. За это время конденсатор C2 заряжается по цепи (0) → эмиттер-база VT1 →C2→R4→(-)$U_п$. Время заряда $\tau_{ф}$ определяется емкостью C2 и сопротивлением R4 : $\tau_{ф}\approx C2\,R4$.

В новом состоянии, при котором VT1 открыт, а VT2 - закрыт, схема не может находиться бесконечно долго. VT2 удерживается в закрытом состоянии положительным напряжением, возникшим на его базе в результате лавины. Но, как видно из схемы (рис.I), база VT2 связана с правой обкладкой конденсатора C1 и через R2 - с "минусом" источника питания. Отрицательный заряд от источника (-)$U_п$ устремляется на правую обкладку конденсатора C1. Конденсатор перезаряжается по цепи: правая обкладка C1 → R2 →(-)$U_п$→ 0 → открытый VT1 → левая обкладка C1. Время полной перезарядки определяется величиной емкости C1 и сопротивлением R2 : $\tau\approx R2\,C1$. В момент, когда потенциал правой обкладки C1, соединенной с базой VT2, изменяясь, проходит через нулевое значение, транзистор VT2 приоткрывается и возникает лавина, в результате которой VT2 открывается полностью, а VT1 закрывается.

Схема лавинообразного процесса такова: увеличение коллек-

торного тока транзистора VT2 ($\uparrow \Delta J_{K2}$) приводит к уменьшению потенциала на его коллекторе ($\downarrow \Delta U_{КЭ2}$), которое передается через C2 на базу транзистора VT1 ($\downarrow \Delta U_{БЭ1}$). Это влечет за собой уменьшение коллекторного тока ($\downarrow \Delta J_{K1}$) и повышение потенциала коллектора VT1 ($\uparrow \Delta U_{КЭ1}$), которое через C1 передается базе VT2 и повышает ее потенциал ($\uparrow \Delta U_{БЭ2}$) и коллекторный ток VT2 ($\uparrow \Delta J_{K2}$).

В результате лавины, приводящей к полному открыванию транзистора VT2, напряжение на его коллекторе скачком уменьшается до нуля, а потенциал коллектора закрывшегося транзистора VT1 возрастает до $\sim U_п$ за время $\tau_ф \simeq R1 \cdot C1$, связанное с зарядкой конденсатора C1. В новом состоянии (при котором VT1 - закрыт, а VT2 - открыт) схема остается в течение времени τ перезарядки конденсатора C2 по цепи: левая обкладка C2 → R3 → (-) $U_п$ → 0 → открытый VT2 → правая обкладка C2, $\tau = R3 \cdot C2$. В момент, когда потенциал левой обкладки C2, изменяясь, проходит через нулевое значение, транзистор VT1 приоткрывается, возникает лавинообразный процесс и схема снова переключается.

Диаграммы напряжений на базах и коллекторах транзисторов приведены на рис.4. Диаграммы соответствуют случаю симметричного мультивибратора, т.е. мультивибратора с одинаковыми номиналами элементов правого и левого ключей: R1=R4 ; R2=R3 ; C1=C2. Поэтому время $\tau_1 \simeq R3 \cdot C2$, в течение которого закрыт транзистор VT1, равно времени $\tau_2 \simeq R2 \cdot C1$, в течение которого закрыт транзистор VT2 ; равны и времена переходных процессов: $\tau_{ф1} = \tau_{ф2}$, где $\tau_{ф1} \simeq R1 \cdot C1$, $\tau_{ф2} \simeq R4 \cdot C2$.

Как видно из рис.4, для получения импульсов прямоугольной (или близкой к прямоугольной) формы, длительность фронта должна быть много меньше длительности импульса. В симметричном мультивибраторе при равенстве емкостей (C1=C2) прямоугольная форма импульсов обеспечивается подбором сопротивлений R1=R4 « R2=R3 .

Выходное напряжение мультивибратора снимается с коллектора правого ($U_{вых} = U_{КЭ1}$) либо левого ($U_{вых} = U_{КЭ2}$) транзистора.

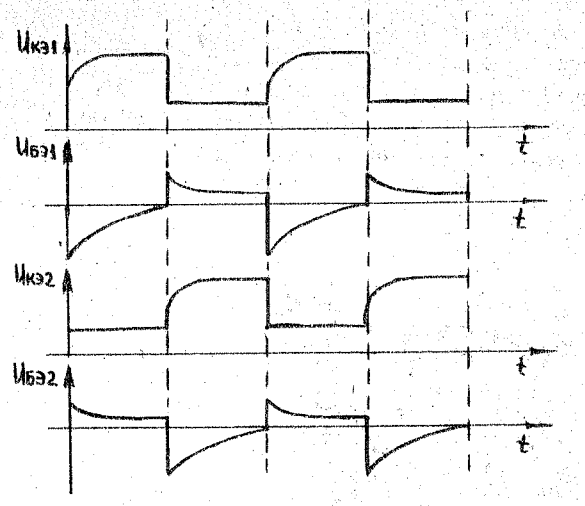


Рис.4. Временные диаграммы напряжений на коллекторе $U_{КЭ1}(t)$ и базе $U_{БЭ1}(t)$ первого транзистора, на коллекторе $U_{КЭ2}(t)$ и базе $U_{БЭ2}(t)$ второго транзистора.

II. Принципиальная схема макета

Принципиальная схема макета приведена на рис.5. Мультивибратор собран по схеме сочетания двух электронных ключей на германиевых транзисторах малой мощности структуры p-n-p типа МП-39. Напряжение питания $U_п$ подается на гнезда Г7 (-) и Г8 (+). Индикацией работы мультивибратора является попеременное излучение светодиодов типа АЛ-102, установленных в коллекторных цепях транзисторов.

Период колебания схемы T составляет 5-10 секунд. В среднем положении движка переменного сопротивления R3 время работы первого и второго транзисторов одинаково и составляет $\tau_{р1} = \tau_{р2} = T/2$ (симметричный мультивибратор). В крайних положениях движка соотношение $\tau_{р1} : \tau_{р2}$ составляет 1:5 или 5:1 (несимметричный мультивибратор). Длительность периода T не зависит от соотношения $\tau_{р1} : \tau_{р2}$ и определяется суммой $T = \tau_{р1} + \tau_{р2}$.

Примечание. Не следует путать τ_{p1} и τ_1. Время τ_1 – это время, в течение которого VT1 закрыт, а напряжение на его коллекторе почти равно напряжению питания $U_{к1} \approx U_п$. Время τ_{p1} – время, в течение которого VT1 открыт и светодиод VD1 светится. Таким образом, $\tau_{p1} = \tau_2$, $\tau_{p2} = \tau_1$.

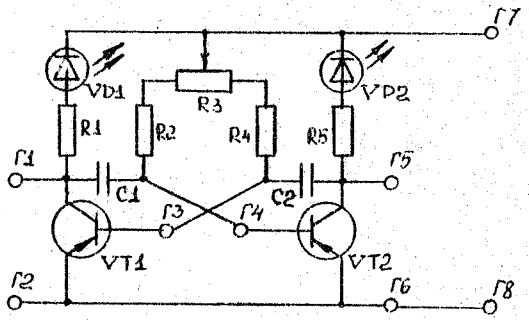


Рис.5. Принципиальная схема макета мультивибратора со светодиодной индикацией

Детали макета:

VT1, VT2 – транзистор МП-39;
VD1, VD2 – светодиод АЛ-307;
R1, R5 – резистор МЛТ-0,25, 1,0 кОм;
R2, R4 – резистор МЛТ-0,25, 8,2 кОм;
R3 – переменное сопротивление СП-04, 47 кОм;
C1, C2 – конденсатор К52-1, 150 мкФ.

Экспериментально измеряемые величины:

- напряжение на коллекторе левого транзистора $U_{кэ1}$ (гнезда Г1, Г2);
- напряжение на коллекторе правого транзистора $U_{кэ2}$ (гнезда Г5, Г6);
- напряжение на базе левого транзистора $U_{бэ1}$ (гнезда Г3, Г2);

- напряжение на базе правого транзистора $U_{бэ2}$ (гнезда Г4,Г5);
- время работы левого транзистора τ_{p1};
- время работы правого транзистора τ_{p2}.

Ш. Оборудование

- макет "Мультивибратор со светодиодной индикацией";
- вольтметр с пределом шкалы 10 В (2 шт.);
- источник питания 9 В;
- провода соединительные (6 шт.);
- секундомер.

IУ. Порядок работы

1. Подготовьте таблицы 1 и 2.

Таблица 1. Напряжение на коллекторах транзисторов

Светится светодиод	$U_{кэ1}$, В	$U_{кэ2}$, В
Левый		
Правый		

Таблица 2. Длительность работы правого и левого транзисторов

Положение ручки R3	Длит. свечения	
	τ_{p1}, с	τ_{p2}, с
Крайнее левое		
Среднее		
Крайнее правое		

2. Соберите схему, изображенную на рис.6.

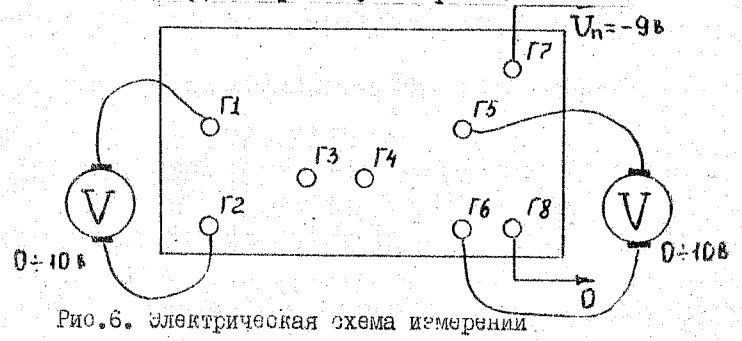


Рис.6. Электрическая схема измерений

3. Включите источник питания. Установите ручку потенциометра приблизительно в среднее положение. Убедитесь в нормальной работе схемы: светодиоды должны светиться попеременно с длительностью свечения по несколько секунд каждый.

4. Вращая ручку потенциометра R3 , добейтесь одинаковой длительности свечения левого и правого светодиодов. Измерьте напряжение на коллекторах транзисторов $U_{кэ1}$ и $U_{кэ2}$ в те моменты, когда светится левый и когда светится правый светодиод. Результаты занесите в таблицу I.

5. Пользуясь секундомером замерьте время работы левого $\tau_{р1}$ и правого $\tau_{р2}$ транзисторов по длительности свечения соответствующих светодиодов. Занесите результаты в таблицу 2, в графу "среднее положение". Поверните ручку потенциометра R3 в крайнее положение против часовой стрелки. Замерьте длительность свечения светодиодов. Занесите результаты измерений в таблицу 2. Повторите операцию, повернув ручку R3 в крайнее положение по часовой стрелке.

6. Вновь установите ручку R3 в среднее положение. Определите полярность и оцените величину напряжения $U_{бэ1}$, поступающего на базу левого транзистора в тот момент, когда гаснет левый светодиод. Для этого используйте вольтметр, подключенный к правому транзистору: перенесите штекер из гнезда Г5 в гнездо Г3, а подключение к гнезду Г6 оставьте без изменений. Если прибор в интересующий нас момент времени будет "зашкаливать" влево, сделайте вывод о полярности напряжения $U_{бэ1}$ и поменяйте местами провода, подходящие к гнездам Г3 и Г6. Запишите измеренное напряжение $U_{бэ1}$. Сделайте вывод о причине, по которой гаснет светодиод.

У. Обсуждение экспериментальных результатов

I. Перерисуйте схему макета, оставив только те элементы, которые образуют электронный ключ на левом транзисторе.

2. Перерисуйте схему макета, оставив только те элементы, которые образуют электронный ключ на правом транзисторе.

3. По результатам таблиц I и 2 постройте графики зависимости от времени напряжений на коллекторе левого и правого транзистора:

$$U_{кэ1} = f(t)\ ;\ U_{кэ2} = f(t),$$

Графики расположите один под другим, как показано на рис.7.

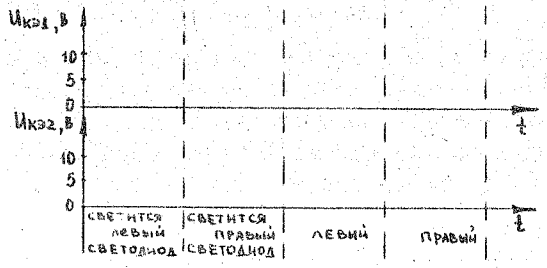


Рис.7. Заготовка для графиков $U_{кэ1} = f(t)$; $U_{кэ2} = f(t)$.

4. Подготовьте таблицу 3

Таблица 3. Сравнение расчетных и экспериментальных значений длительности работы транзисторов

Положение ручки R3	Длительность работы левого транзитора	
	$\tau_{р1}^{теор}$, с	$\tau_{рь}$ с
Крайнее левое		
Среднее		
Крайнее правое		

5. Рассчитайте длительность работы левого транзистора при трех положениях движка R3 : левом, среднем, правом. При расчете используйте номиналы элементов C1 , R2 , R3 , установленных в макете. Рассчитанные значения $\tau_{р1}^{теор}$ запишите в первый столбец таблицы 3. Второй столбец таблицы 3 за-

полните экспериментальными значениями τ_{p1} из числа приведенных в таблице 2. Сравните экспериментальные значения τ_{p1} с соответствующими рассчитанными $\tau_{p1}^{теор}$.

6. Докажите, что у мультивибратора с одинаковыми конденсаторами ($C1 = C2$) период колебаний T не должен зависеть от положения движка $R3$.

7. Заметили ли Вы, что светодиоды в исследованном мультивибраторе вспыхивают мгновенно, а гаснут постепенно? Чем это объясняется.

8. В симметричном мультивибраторе (см.рис.I) выходное напряжение $U_{вых}(t) = U_{кэ2}(t)$ изменяется во времени по закону, приведенному на рис.4. Изменится ли длительность импульсов и промежутки между ними, если I) емкость $C2$ увеличить вдвое; 2) емкость $C1$ и $C2$ уменьшить вдвое?

Работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

I. Теоретические основы

В предыдущих работах мы познакомились со свойствами последовательной цепи транзистор – постоянное сопротивление и рассмотрели способы образования на основе этой цепи ряда схем – электронного и фотоэлектронного ключей, реле времени, мультивибратора.

Настоящая работа знакомит с усилительными свойствами транзистора, а именно – усилением электрических колебаний синусоидальной формы. Рассмотрим последовательную цепь, состоящую из транзистора VT и сопротивления $R3$ (см.рис.I).

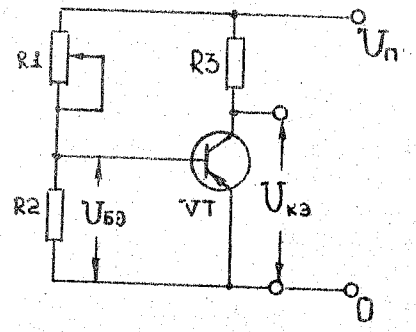


Рис.I. Последовательная цепь транзистор VT – резистор $R3$ с регулируемым напряжением на базе транзистора $U_{бэ}$

Напряжение на базе транзистора $U_{бэ}$ определяется величиной переменного сопротивления $R1$, которое совместно с резистором $R2$ образует делитель напряжения, позволяющий изменять напряжение $U_{бэ}$ в пределах приблизительно от 0 до 0,3 В. При этом, как известно, состояние транзистора изменяется от полностью закрытого до полностью открытого, а напряжение на его коллекторе $U_{кэ}$ – от 0 до $U_п$.

На рис.2 изображен график зависимости $U_{кэ}=f(U_{бэ})$, знакомый нам по работе с ключевыми схемами.

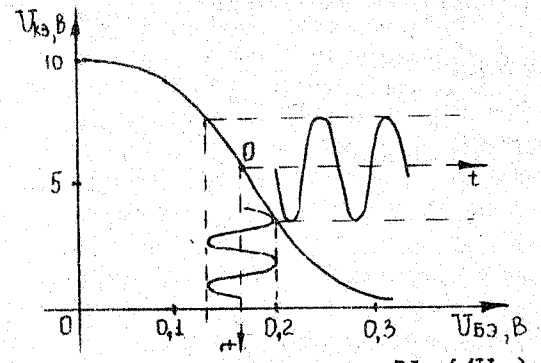


Рис.2. Зависимость $U_{кэ}=f(U_{бэ})$ при $U_{п}$ = 10 В

Выберем на графике $U_{кэ}=f(U_{бэ})$ точку "0", соответствующую наиболее крутому участку кривой. Как правило, точке "0" соответствует такое напряжение $U^{0}_{бэ}$, при котором $U^{0}_{кэ} \approx U_{п}/2$ (на рис.2: для точки "0": $U^{0}_{бэ}$ = 0,16 В; $U^{0}_{кэ}$ = 5 В). Если теперь изменять значение $U_{бэ}$ во времени (например, регулируя R1) по синусоидальному закону, то, как видно из рис.2, по тому же закону, но в противофазе, будет изменяться $U_{кэ}$. Причем, незначительным изменениям $U_{бэ}$ (~0,05 В) соответствуют значительные изменения $U_{кэ}$ (~5 В). В этом и состоит принцип усиления синусоидального напряжения цепью транзистор – постоянное сопротивление. Напряжение $U^{0}_{бэ}$, которое соответствует наиболее крутому участку зависимости $U_{кэ}=f(U_{бэ})$, является, очевидно, оптимальным с точки зрения усилительных свойств схемы.

Добавив к схеме, изображенной на рис.1, два конденсатора C1 и C2, получаем простейшую схему усилительного каскада (см.рис.3).

В этой схеме входной сигнал в виде напряжения $U_{вх}$ синусоидальной формы и небольшой амплитуды поступает на базу транзистора через разделительный конденсатор C1. Конденсатор пропускает на базу транзистора переменную составляющую входного сигнала и задерживает постоянную составляющую (ес-

ли она имеется). Тем самым, C1 защищает оптимальное значение $U^{0}_{бэ}$ от нежелательных изменений. Усиленный сигнал в виде синусоидального напряжения $U_{вых}$ снимается с коллектора транзистора через разделительный конденсатор C2. Постоянная составляющая напряжения коллектора (напряжение покоя коллектора $U^{0}_{кэ}$) задерживается конденсатором C2 и на выход схемы не поступает.

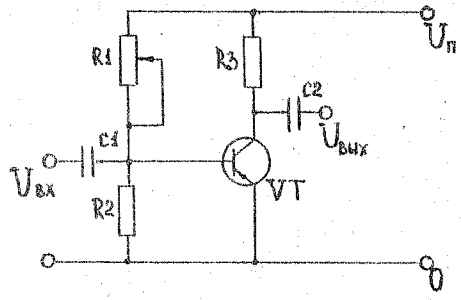


Рис.3. Простейшая схема усилительного каскада на транзисторе

На рис.4 приводятся временные диаграммы напряжений $U_{вх}(t)$, $U_{бэ}(t)$, $U_{кэ}(t)$, $U_{вых}(t)$. Сравнивая графики $U_{вх}(t)$ и $U_{вых}(t)$, отметим, что усиление входного сигнала транзисторным каскадом сопровождается сдвигом фазы сигнала на π (на $T/2$).

Отношение $K=U_{вых}/U_{вх}$ получило название коэффициента усиления каскада по напряжению. Свойства усилительного каскада достаточно полно могут быть представлены двумя характеристиками:

- амплитудная характеристика (зависимость $U_{вых}=f(U_{вх})$), снимается при фиксированной частоте входного сигнала;
- амплитудно-частотная характеристика (зависимость $K=f(\nu)$), снимается при фиксированной величине входного сигнала $U_{вх}$.

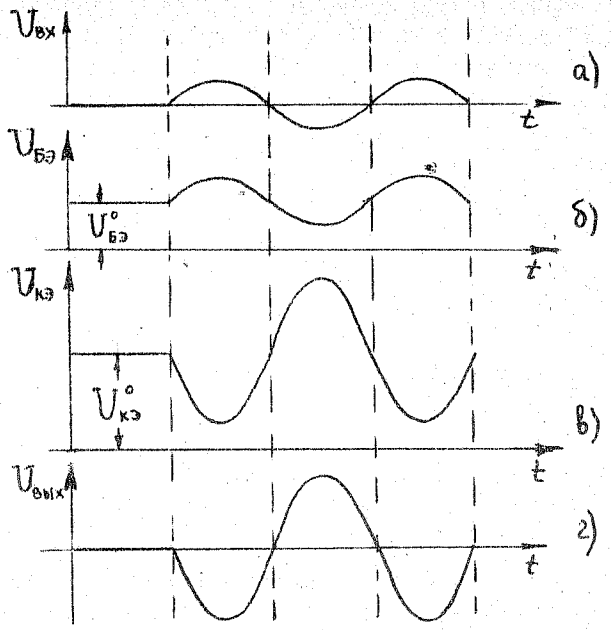


Рис.4. Временные диаграммы:
а) входного сигнала $U_{вх}(t)$;
б) напряжения на базе транзистора $U_{бэ}(t)$;
в) напряжения на коллекторе транзистора $U_{кэ}(t)$;
г) выходного сигнала $U_{вых}(t)$.

II. Принципиальная схема макета

Принципиальная схема макета приведена на рис.5. Усилительный каскад собран на основе германиевого транзистора малой мощности структуры p – n – p типа МП-39. Напряжение питания $U_{вх}$ подается на гнезда Г9(–), Г10(+). Входной сигнал в виде напряжения звуковой частоты синусоидальной формы подается на гнезда Г1, Г2. Усиленный сигнал $U_{вых}$ с гнезд Г7, Г8

подается на вход осциллографа, либо на вольтметр переменного тока, либо на головные телефоны типа ТОН-2.

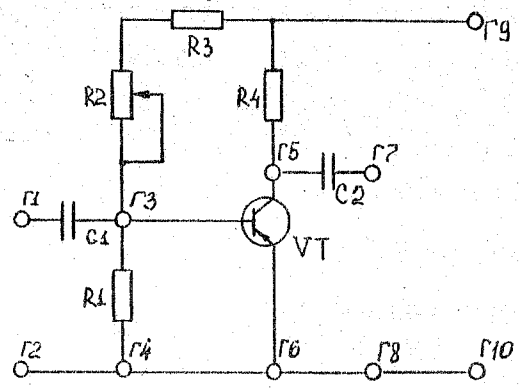


Рис.5. Принципиальная схема макета "Усилительный каскад"

Детали макета:

VT – транзистор МП-39;
R1 – резистор МЛТ-0,25, 1,2 кОм;
R2 – переменное сопротивление СП-04, 100 кОм;
R3 – резистор МЛТ-0,25, 6,2 кОм;
R4 – резистор МЛТ-0,25, 1,8 кОм;
C1, C2 – конденсатор КДС 0,047 мкФ.

Регулировка переменного сопротивления R2 изменяет напряжение покоя базы транзистора $U_{бэ}$ в пределах от 0 до 0,25 В. При этом состояние транзистора изменяется от полностью закрытого (коллекторный ток $J_к$ отсутствует) до полностью открытого ($J_к$ максимален и определяется величиной напряжения питания $U_п$ и сопротивлением нагрузки R4 : $J_к = U_п / R_4$); напряжение покоя коллектора $U_{кэ}$ изменяется от значений $U_{кэ} = U_п$ до $U_{кэ} = 0$.

При подаче на вход усилителя (гнезда Г1, Г2) сигнала $U_{вх}$ синусоидальной формы звуковой частоты от генератора типа Г3-36 (или его аналога) на выходе (гнезда Г7,Г8) возникает усиленный сигнал $U_{вых}$, величина которого зависит от состояния транзистора. Регулировка R2 позволяет изменять

коэффициент усиления каскада по напряжению $K = U_{вых}/U_{вх}$ в широких пределах.

Экспериментально измеряемые величины:

- напряжение покоя базы транзистора $U_{бэ}$ (гнезда Г3, Г4);
- напряжение покоя коллектора транзистора $U_{кэ}$ (гнезда Г5, Г6);
- выходное напряжение $U_{вых}$ (гнезда Г7, Г8).

Ш. Оборудование

- макет "Усилительный каскад";
- вольтметр с пределом шкалы I В;
- вольтметр с пределом шкалы I0 В;
- вольтметр переменного тока с пределом шкалы I0 В;
- осциллограф С1-72 или его аналог;
- генератор синусоидальных электрических колебаний звуковых частот Г3-36 или его аналог;
- источник питания 9 В;
- провода соединительные (I0 шт.).

IУ. Порядок работы

I. Соберите схему, изображенную на рис.6.

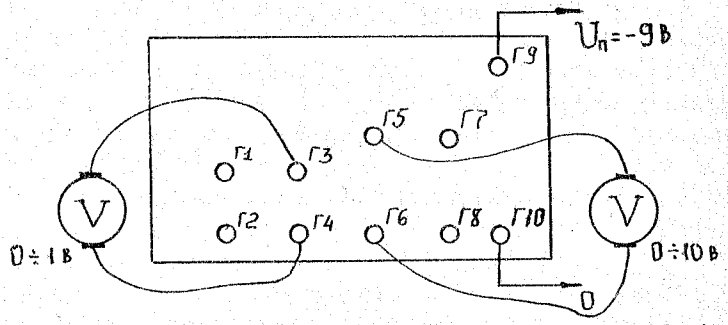


Рис.6. Электрическая схема измерений зависимости $U_{кэ} = f(U_{бэ})$

2. Исследуйте зависимость напряжения покоя коллектора транзистора от напряжения покоя базы $U_{кэ} = f(U_{бэ})$. Для этого включите источник питания и, устанавливая регулировкой R1 различные значения $U_{бэ}$ из диапазона 0÷0,3 В, определите соответствующие им значения $U_{кэ}$. Результаты измерений сведите в таблицу I.

Таблица I. Зависимость $U_{кэ} = f(U_{бэ})$

$U_{бэ}$, В	
$U_{кэ}$, В	

3. Определите оптимальное напряжение покоя базы $U^{\circ}_{бэ}$. Для этого соберите схему, изображенную на рис.7: подключите к входным гнездам макета (Г1, Г2) генератор Г3-36 (или его аналог), а к выходным гнездам (Г7, Г8) – осциллограф С1-72 (или его аналог). При отсутствии осциллографа к выходным клеммам макета можно подключить вольтметр переменного тока с пределом шкалы I0 В.

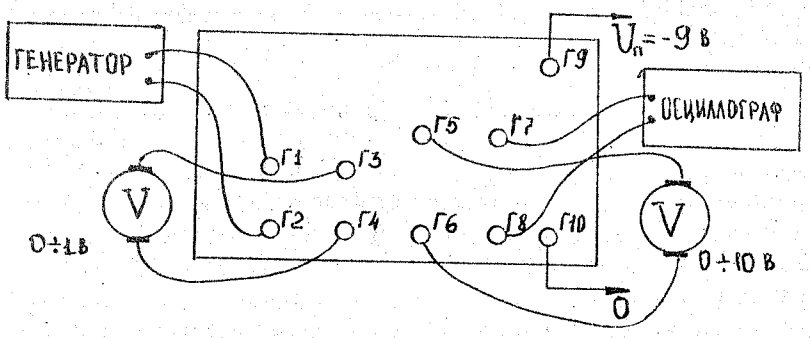


Рис.7. Электрическая схема измерений оптимального напряжения покоя базы $U^{\circ}_{бэ}$, амплитудной $U_{вых} = f(U_{вх})$ и амплитудно-частотной $K = f(\nu)$ характеристик усилительного каскада

Установите входной сигнал $U_{вх} = 0{,}1$ В частотой $\nu = 5$ кГц. Плавно вращая движок потенциометра R2 и наблюдая за экраном осциллографа, добейтесь максимального выходного сигнала $U_{вых}$. По вольтметру, измеряющему напряжение постоянного смещения базы, определите величину $U^{о}_{бэ}$. По вольтметру, измеряющему постоянное напряжение коллектора, определите соответствующее напряжение покоя коллектора $U^{о}_{кэ}$. Полученные значения $U^{о}_{бэ}$ и $U^{о}_{кэ}$ запишите.

4. Исследуйте зависимость коэффициента усиления каскада от напряжения покоя базы $K = f(U_{бэ})$. Для этого замените осциллограф, подключенный к входным гнездам каскада, на вольтметр переменного тока с пределом шкалы 10 В. Изменяя регулировкой R2 напряжение смещения $U_{бэ}$, измерьте величину $U_{вых}$ при 10–12 значениях $U_{бэ}$. Результаты измерений $U_{бэ}$, $U_{вых}$ и расчета K сведите в таблицу 2.

Таблица 2. Зависимость $K = f(U_{бэ})$ при $U_{вх} = 0{,}1$ В, $\nu = 5$ кГц

$U_{бэ}$, В										
$U_{вых}$, В										
K										

5. Исследуйте амплитудную характеристику каскада $U_{вых} = f(U_{вх})$. Для этого подайте на вход макета сигнал с генератора Г3-36 величиной $U_{вх} = 0{,}05$ В, частотой $\nu = 5$ кГц. Установите оптимальное напряжение $U^{о}_{бэ}$. Увеличивая напряжение входного сигнала $U_{вх}$ от значения 0,05 В до 1 В, измерьте соответствующие значения выходного сигнала $U_{вых}$. Результаты сведите в таблицу 3.

Таблица 3. Амплитудная характеристика каскада $U_{вых} = f(U_{вх})$ $\nu = 5$ кГц

$U_{вх}$, В	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,0
$U_{вых}$, В								

6. Исследуйте амплитудно-частотную характеристику каскада $K = f(\nu)$. Для этого подайте на вход макета сигнал с генератора Г3-36 величиной $U_{вх} = 0{,}1$ В, $\nu = 200$ Гц. Увеличивая частоту входного сигнала, измерьте величину выходного сигнала $U_{вых}$ при 10–12 значениях ν в диапазоне от 200 Гц до 100 кГц. Результаты сведите в таблицу 4.

Таблица 4. Амплитудно-частотная характеристика каскада $K = f(\nu)$, $U_{вх} = 0{,}1$ В

f, кГц	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200
$U_{вых}$, В										
K										

5. Обсуждение экспериментальных результатов

1. По результатам измерений, сведенным в таблицу 1, постройте график зависимости $U_{кэ} = f(U_{бэ})$. Обозначьте на графике точку, соответствующую оптимальному значению $U^{о}_{бэ}$.

2. По результатам измерений, сведенным в таблицу 2, постройте график зависимости $K = f(U_{бэ})$.

3. По результатам измерений, сведенным в таблицу 3, постройте график амплитудной характеристики каскада $U_{вых} = f(U_{вх})$.

4. По результатам измерений, сведенным в таблицу 4, постройте график амплитудно-частотной характеристики каскада $K = f(\nu)$.

5. Пользуясь графиком амплитудной характеристики, определите максимальное значение входного сигнала, который может быть усилен каскадом без искажений.

6. Пользуясь графиком амплитудно-частотной характеристики, определите величину выходного сигнала, если известно, что на вход каскада подается сигнал напряжением $U_{вх} = 0{,}2$ В, частотой 15 кГц.

7. Предположим, что на вход исследуемого каскада подали синусоидальный сигнал $U_{вх1} = 0{,}1$ В частотой $\nu_1 = 1{,}5$ кГц, а затем изменили напряжение и частоту сигнала $U_{вх2} = 0{,}05$ В, $\nu_2 = 15$ кГц. В каком случае выходной сигнал будет больше по величи-

не?

8. Предположим, что на вход исследуемого каскада подали синусоидальный сигнал $U_{вх}$ = 0,3 В частотой ν = 1 кГц, после чего частоту сигнала начали плавно увеличивать. При какой частоте в выходном сигнале начнутся искажения синусоидальной формы?

9. Оценить коэффициент усиления каскада по напряжению можно не подавая на него входного сигнала. Как это сделать?

Работа № 7

ИЗУЧЕНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО RC-ГЕНЕРАТОРА

I. Теоретические основы

Исследованный в предыдущей работе усилительный каскад на транзисторе может быть легко преобразован в генератор синусоидальных электрических колебаний. В отличие от усилителя, на выходе генератора имеется сигнал (напряжение синусоидальной формы), в то время как на вход сигнала извне не подается.

Для преобразования усилительного каскада в генератор часть сигнала с выхода каскада (с коллектора транзистора) подается обратно на вход каскада (на базу транзистора). Это схематично показано на рис.I.

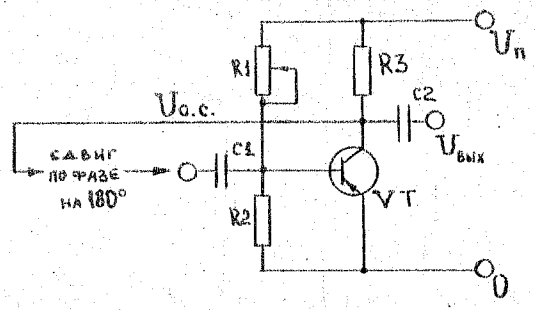


Рис.I. К принципу преобразования усилительного каскада в генератор

Часть выходного сигнала, возвратившегося с выхода на вход каскада, получила название сигнала обратной связи $U_{о.в.}$. Рассмотрим принцип работы генератора. Даже при отсутствии входного сигнала потенциал базы транзистора не остается строго постоянным во времени. На базе (как, впрочем, и в любой другой точке схемы) постоянно возникают небольшие по величине и различные по длительности отклонения напряжения от среднего во времени значения (флуктуации). Но вызвать генерацию колебаний они могут

только в том случае, если выполняются два условия: условие "балланса фаз" и условие "балланса амплитуд". Условие балланса фаз состоит в том, что сигнал обратной связи $U_{o.c}$ должен возвращаться на вход каскада в той же фазе, что и сигнал первоначальной флуктуации напряжения на базе транзистора. Проходя через транзистор, сигнал сдвигается по фазе на 180^0. Поэтому для выполнения условия балланса фаз цепь обратной связи должна обеспечивать дополнительный сдвиг по фазе еще на 180^0. Эту функцию выполняет цепочка, состоящая из нескольких последовательно соединенных RC -звеньев, см.рис.2 (отсюда и название генератора: RC -генератор).

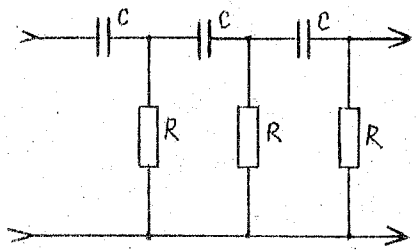


Рис.2. Трехзвенная RC-цепь

Каждое звено RC сдвигает фазу на угол от 0^0 до 90^0 в зависимости от частоты сигнала. Для сдвига фазы на 180^0 обычно используют трехзвенную RC-цепь (три звена со сдвигом на 60^0 в каждом). Флуктуации напряжения, постоянно возникающие на базе транзистора, имеют самые разнообразные частоты, но условие необходимого сдвига фазы на 180^0 удовлетворяется лишь для одной частоты $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$. На этой частоте и возникает генерация, если выполнено второе условие генерации - условие балланса амплитуд.

Условие балланса амплитуд состоит в том, что усиление сигнала при прохождении через транзистор должно компенсировать потери, которые испытывает сигнал при прохождении по цепи обратной связи.

Если обозначить через K коэффициент усиления транзис-

торного каскада $K = U_{вых}/U_{вх}$, а через β - коэффициент обратной связи $\beta = U_{o.c}/U_{вых}$, то условие балланса амплитуд запишется в виде: $K\beta \geq 1$. Для выполнения этого условия, во-первых, подбирают транзистор из числа тех, что имеют как можно более высокий коэффициент усиления по току и, во-вторых, тщательно устанавливают оптимальное напряжение покоя базы $U^{o}_{бэ}$ (путем подбора R5, см.рис.3, при котором усиление каскада максимально).

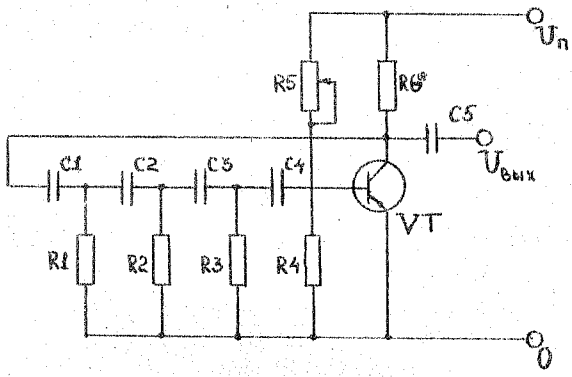


Рис.3. RC -генератор на транзисторе

RC -генератор обычно используется для получения электрических синусоидальных колебаний в диапазоне звуковых частот (до нескольких десятков килогерц).

II. Принципиальная схема макета

Принципиальная схема макета приведена на рис.4. Макет представляет собой RC -генератор с трехзвенной цепью обратной связи, собранный на основе германиевого транзистора малой мощности структуры p - n - p типа МП-41А. Напряжение питания $U_п$ подается на гнезда Г7 (-), Г8 (+). Сигнал генерации $U_г$ синусоидальной формы с гнезд Г5, Г6 подается на вход осциллографа, либо на вольтметр переменного тока, либо на головные телефоны типа ТОН-2.

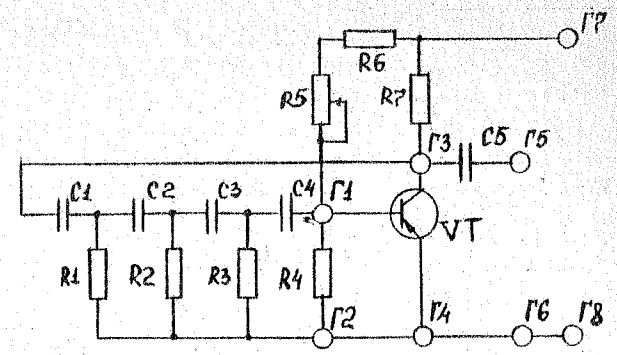


Рис.4. Принципиальная схема макета "Генератор электрических синусоидальных колебаний"

Детали макета:

VT – транзистор МП-41А;
R1÷R4 – резистор МЛТ-0,25 2,7 кОм;
R5 – переменное сопротивление СП-04, 68 кОм;
R6 – резистор МЛТ-0,25, 10 кОм;
R7 – резистор МЛТ-0,25, 1,0 кОм;
C1÷C5 – конденсатор КДС 0,047 мкФ.

Экспериментально измеряемые величины:

- напряжение покоя базы транзистора $U_{бэ}$ (гнезда Г1, Г2);
- напряжение покоя коллектора транзистора $U_{кэ}$ (гнезда Г3, Г4);
- напряжение генерации $U_г$ (гнезда Г5, Г6);
- частота генерации ν.

Ш. Оборудование

- макет "Генератор синусоидальных электрических колебаний";
- вольтметр с пределом шкалы 1 В;
- вольтметр с пределом шкалы 10 В;
- вольтметр переменного тока с пределом шкалы 10 В;
- осциллограф С1-72 или его аналог;

- набор соединительных проводов (10 шт.).

IУ. Порядок работы

1. Соберите схему, изображенную на рис.5.

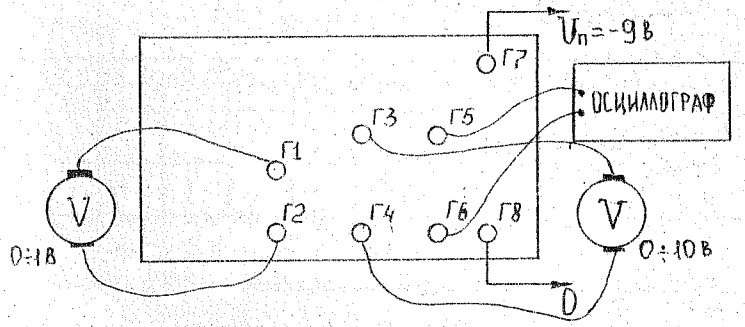


Рис.5. Электрическая схема измерений

2. Включите источник питания. Плавно изменяя величину R5, добейтесь генерации колебаний $U_г$ максимальной величины. (Осциллограф должен показать наличие синусоидального сигнала амплитудой несколько вольт). Определите по осциллографу максимальное значение величины $U_г$ и по показаниям вольтметра оптимальную величину постоянного смещения на базе $U^{o}_{бэ}$ и соответствующее значение постоянного напряжения на коллекторе $U^{o}_{кэ}$. Запишите полученные значения $U_г^{max}$, $U^{o}_{бэ}$, $U^{o}_{кэ}$.
3. Определите частоту ν колебания. Для этого одновременно с подачей сигнала с исследуемого макета на вход "У" осциллографа подайте на вход "Х" осциллографа сигнал величиной 1-2 вольта с генератора Г3-36. Изменяя частоту сигнала Г3-36, добейтесь изображения на экране фигуры Лиссажу в виде круга или овала. Определите частоту генерации ν и запишите это значение.
4. Исследуйте зависимость напряжения покоя коллектора от постоянного смещения на базе транзистора $U_{кэ} = f(U_{бэ})$, а также зависимость напряжения генерации от постоянного смеще-

ния на базе $U_г = f(U_{бэ})$. Для этого подключите к выходным гнездам макета (Г5,Г6) вольтметр переменного тока вместо осциллографа. Плавно изменяя положение движка переменного сопротивления R5, исследуйте зависимость $U_{кэ} = f(U_{бэ})$ и $U_г = f(U_{бэ})$. Результаты измерений сведите в таблицу I.

Таблица I. Зависимости $U_{кэ} = f(U_{бэ})$ и $U_г = f(U_{бэ})$

$U_{бэ}$, В	0,I0	0,I2	0,I4	0,I6	0,I7	0,I8	0,I9	0,20	0,22	0,23	0,24	0,26
$U_{кэ}$, В												
$U_г$, В												

У. Обсуждение экспериментальных результатов

I. По результатам измерений, сведенным в таблицу I, изобразите зависимости $U_{кэ} = f(U_{бэ})$ и $U_г = f(U_{бэ})$ на одном графике.

2. По графику зависимости $U_г = f(U_{бэ})$ определите минимальное и максимальное значение постоянного смещения на базе в пределах, которых генерация наблюдается. В каких пределах при этом изменяется напряжение на коллекторе транзистора (по постоянному току)?

3. Рассчитайте частоту генерации $\nu^{теор.}$ и, используя известные значения номиналов $C1 \div C3$, $R1 \div R3$. Сравните расчетное $\nu^{теор.}$ и экспериментальное ν значение частоты генерации.

Рекомендуемая литература

I. Практикум по физике в средней школе: Дидактический материал: Пособие для учителей / Под ред. В.А.Бурова, Ю.И. Дика. М.: Просвещение, I987.

2. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. М.: Радио и связь, I985.

3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: Мир, I983.

4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 2 т. М.: Мир, I984.

5. Гершензон Е.М., Поленина Г.Л., Сонна М.В. Радиотехника. М.: Просвещение, I986.

6. Сомойлов В.Ф., Маковеев В.Г. Импульсная техника. М.: Связь, I97I.

7. Бурсиан Э.В. Физические приборы. М.: Просвещение, I984.

8. Мэндл М. 200 избранных схем электроники. М.: Мир, I980.

9. Электронные приборы /Под ред. Г.Г.Шишкина. М.: Энергоатомиздат, I989.

СОДЕРЖАНИЕ

Работа № I. Исследование вольтамперных характеристик резисторов и диодов. 6

Работа № 2. Транзистор как управляемое сопротивление. I5

Раабота № 3. Изучение фотоэлектронного ключа 22

Работа № 4. Изучение электронного ключа с реле времени. 26

Работа № 5. Изучение транзисторного мультивибратора. 32

Работа № 6. Изучение усилительного каскада 43

Работа № 7. Изучение транзисторного RC-генератора. 53

Андрей Андреевич Ахаян
Татьяна Робертовна Берлина

ЭЛЕКТРОНИКА
Спецпрактикум
(Методическая разработка)

Редактор Г.Н.Петрова

Подписано к печати 5.02.91. Формат 60 x $84^{I}/I6$. Объем: 3,75 уч.-изд.л.; 3,75 усл. печ. л. Тираж 2500 экз. Бумага писчая. Печать офсетная. Заказ 13. Цена 2 руб.

Российский ордена Трудового Красного Знамени государственный педагогический университет имени А.И.Герцена. I9II86, Ленинград, наб. р. Мойки, 48.

РПП РПУ им. А.И.Герцена, I9II86, Ленинград, наб.р. Мойки,48.